

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MATEUS MEDEIROS VIEIRA DANTAS

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
A PARTIR DE ENSAIOS COM APLICAÇÃO DE CARGAS REPETIDAS COM O
PÓRTICO MODULAR (Dynamic Shear Procedure/LEP)**

**JOÃO PESSOA
2017**

MATEUS MEDEIROS VIEIRA DANTAS

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
A PARTIR DE ENSAIOS COM APLICAÇÃO DE CARGAS REPETIDAS COM O
PÓRTICO MODULAR (Dynamic Shear Procedure/LEP)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Lopes Soares
Coorientador: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues

JOÃO PESSOA
2017

D192e Dantas, Mateus Medeiros Vieira

Estudo da resistência ao cisalhamento de misturas asfálticas a partir de ensaios com aplicação de cargas repetidas com o pórtico modular (Dynamic Shear Procedure/Lep)./ Mateus Medeiros Vieira Dantas. – João Pessoa, 2017.

50f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Fábio Lopes Soares

Coorientador: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. *Leutner* 2. *Creep* 3. Ensaios 4. Deformação 5. Estático. I. Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed. 624.04 (043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

MATEUS MEDEIROS VIEIRA DANTAS

ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS A PARTIR DE ENSAIOS COM APLICAÇÃO DE CARGAS REPETIDAS COM O PÓRTICO MODULAR (Dynamic Shear Procedure/LEP)

Trabalho de Conclusão de Curso em 07/06/2017 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Fábio Lopes Soares

Prof. Dr. Fábio Lopes Soares

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO

Isabelle Yruska de Lucena Gomes Braga

Prof. Dra. Isabelle Yruska de Lucena Gomes Braga

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO

John Kennedy Guedes Rodrigues

Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues

Departamento de Engenharia Civil CTRN/UFCG

APROVADO

Profª. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga

Matrícula Siape: 1668619

Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

AGRADECIMENTOS

Sou grato a Deus e a todos aqueles que estiveram do meu lado durante toda essa jornada, em especial aos meus pais, que sempre me deram força nas frustrações e comemoraram comigo as conquistas, além de proporcionar todo apoio e suporte para que eu me preocupasse somente em desempenhar um bom papel acadêmico.

Agradeço ao meu irmão, que sempre me aconselhou durante essa caminhada. Não posso deixar de citar meus avós e demais familiares. Vocês foram essenciais para minha formação.

Aos meus amigos, que compartilharam comigo grandes momentos, o meu muito obrigado.

A toda equipe do Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande, em especial aos pesquisadores Daniel Beserra Costa e Mauro Henrique Alves Nascimento pela paciência e disposição para tirar todas as dúvidas durante a realização dos ensaios.

Agradeço ao Professor Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues, primeiramente pela idealização desta pesquisa e por toda atenção, dedicação e ensinamento transmitido durante a orientação deste trabalho.

Ao Professor Dr. Fábio Lopes Soares por toda experiência passada durante a graduação, além da disposição, incentivo e colaboração para produção deste estudo.

A todos que não foram citados, mas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, muito obrigado!

RESUMO

Considerando que os principais tipos de defeitos observados em pavimentos flexíveis são: trinca térmica, trincamento por fadiga e deformação permanente, pode-se inferir que estudos que visam solucionar ou, pelo menos, minimizar significativamente o surgimento destes defeitos, contribuem de forma considerável para o aprimoramento da qualidade dos revestimentos asfálticos. A deformação permanente é caracterizada por depressões longitudinais e está relacionada, principalmente, com o número e intensidade das solicitações provenientes do tráfego, temperatura, dosagem, tipo de asfalto, etc. Dentre uma série de ensaios de avaliação desse tipo de falha, destacam-se: ensaio de *Leutner*, *creep* estático e *creep* dinâmico.

Nesse contexto, este trabalho busca contribuir, baseado em ensaios de avaliação de deformação permanente, para uma nova metodologia de avaliação desses defeitos a partir da utilização de um novo equipamento, o Pórtico Modular, desenvolvido pelo Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) e que submete as amostras de misturas asfálticas ao cisalhamento com carregamentos dinâmicos.

O procedimento supracitado baseia-se no ensaio de *creep* dinâmico. Um dos parâmetros resultantes e que dá nome ao novo procedimento é o ***Flow Shear Number***, que é o número de ciclo correspondente a aplicação de um carregamento cíclico paralelo ao plano de corte do corpo de prova, cuja deformação de cisalhamento passa a ser não recuperável.

O FN *Shear*, ponto onde a taxa de deformação é mínima, pode ser obtido através da maior raiz real da derivada segunda da curva deformação versus número de ciclos. A função que melhor representa os pontos obtidos durante os ensaios foi encontrada neste trabalho com o auxílio do método de ajuste de curvas. Para os ensaios realizados, a função que caracterizou de forma mais adequada à curva deformação versus número de ciclos, foi a polinomial de quinto grau.

O outro ensaio realizado foi o ensaio de *Leutner*, diferenciando-se dos primeiros arranjos, unicamente, pela utilização do pórtico modular e multiensaio desenvolvido pelo LEP, que traz maior versatilidade e economia na utilização de aço em sua fabricação. Neste ensaio, obtém-se a força máxima de corte, aplicada na mesma direção do ensaio de *Flow Shear Number*, com a diferença que o carregamento é estático. A análise dos resultados demonstra que o equipamento desenvolvido pode ser utilizado para realização do ensaio de *Leutner* sem quaisquer alterações significativas nos resultados obtidos.

Palavras Chave: *Leutner*, *Creep*, Ensaios, Deformação, Fluência, Asfalto, Curvas, Dinâmico, Estático.

ABSTRACT

As the main types of pavement failure are low-temperature cracking, fatigue cracking and permanent deformation, we can infer that studies searching for solving or at least reducing those pavement defects are strongly contributive for the improvement of pavement design. Permanent deformation is characterized by the longitudinal depression in the wheel path and is mainly related to the road traffic intensity, temperature conditions, type of asphalt, mix design, etc. Analyzing a bunch of permanent deformation evaluation tests, some of the most important are static creep test, dynamic creep test and leutner shear test.

In that regard, this work intends to contribute, based on previous tests of permanent deformation, introducing a new method for evaluation of those defects by using a new equipment, the Pórtico Modular, developed by the Laboratory of Pavement Engineering (LEP). In this equipment, samples of asphalt mixtures are subjected to dynamic shear loads.

The above mentioned procedure is based on the dynamic creep test. An important parameter from this test, which is responsible for designate the test, is the Flow Shear Number, which is the number of cycle corresponding to the application of a dynamic load parallel to the shear plane of the specimen, where the deformation cannot be recovered anymore.

The Flow Shear Number, point where deformation rate reaches the minimum, can be obtained from the largest real root of the second derivative of the deformation against the number of cycles curve. The function that better fit the points from the Flow Shear Number test was reached in this study by the curve fitting method. For the performed tests, the function that fits better with the deformation against number of cycles curve was the fifth degree polynomial.

Another test performed in this study was the leutner shear test, which is different from the initial setup only because of the use of the modular and multitest portico developed by LEP, which brings great versatility and economy of steel in the manufacturing process. The maximum shear force, which is statically applied to the specimen at the same direction of the Flow Shear Number test, is obtained in this test. Presented results show that the new equipment can be used in the Leutner shear test without any losses.

Key Words: Leutner, Creep, Tests, Deformation, Flow, Asphalt, Curves, Dynamic, Static.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição das cargas nos pavimentos Rígido e Flexível	5
Figura 2: Classificação dos revestimentos asfálticos	5
Figura 3: Exemplos de corpos de prova com misturas de diferentes graduações	7
Figura 4: Faixas granulométricas para CBUQ	8
Figura 5: Esquema do asfalto drenante	9
Figura 6: Faixa granulométrica para AAUQ	10
Figura 7: Compactador giratório utilizado na dosagem <i>Superpave</i>	13
Figura 8: Escorregamento no pavimento do aeroporto de Newark – NJ	15
Figura 9: Representação da deformação permanente no revestimento e no sistema	16
Figura 10: Deformação devido à aplicação de carregamento estático	17
Figura 11: Deformação devido à aplicação de carregamento dinâmico	18
Figura 12: Informações obtidas no ensaio de <i>creep</i> estático	19
Figura 13: Exemplo de arranjo experimental para o ensaio de <i>creep</i> estático	20
Figura 14: Ensaio de <i>creep</i> estático com as três regiões de deformação por fluência	21
Figura 15: Ciclo de carregamento/descarregamento no <i>creep</i> dinâmico	22
Figura 16: Zonas de deformação da curva do ensaio de <i>creep</i> dinâmico	23
Figura 17: Identificação do FN através da taxa mínima de deformação permanente	23
Figura 18: Equipamento utilizado no <i>Leutner Shear Test</i>	24
Figura 19: Equipamento utilizado no <i>Leutner Shear Test</i>	25
Figura 20: Situação de carregamento provocado pelo contato dos pneus com revestimento..	26
Figura 21: Arranjo do ensaio de leutner modificado	27
Figura 22: Agregados utilizados na preparação da mistura asfáltica	29
Figura 23: Sequência dos procedimentos na preparação dos corpos de prova	30
Figura 24: Secagem dos materiais em estufa	31
Figura 25: Mistura após homogeneização	31
Figura 26: Compactação do corpo de prova	32

Figura 27: Corpo de prova após compactação	32
Figura 28: Identificação dos corpos de prova para período de repouso	33
Figura 29: Curva Carga (kN) x Deformação (mm) para o ensaio de <i>Leutner</i> – CP 01	39
Figura 30: Curva Carga (kN) x Deformação (mm) para o ensaio de <i>Leutner</i> – CP 04	40
Figura 31: Curva de fluência para o ensaio de <i>creep</i> dinâmico	41
Figura 32: Curva de fluência do CP 05 para carregamento repetido de 1,6 kN	42
Figura 33: Curva de fluência do CP 05 para carregamento repetido de 4,8 kN	43
Figura 34: Curva de fluência do CP 06 para carregamento repetido de 4,8 kN	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Proporção de materiais na preparação da mistura asfáltica	29
Tabela 2: Medição das dimensões do CP 01	37
Tabela 3: Medição das dimensões do CP 02	37
Tabela 4: Medição das dimensões do CP 03	37
Tabela 5: Medição das dimensões do CP 04	38
Tabela 6: Medição das dimensões do CP 05	38
Tabela 7: Medição das dimensões do CP 06	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO	3
2.1 Objetivo Geral.....	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
3.1 PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	4
3.2 MISTURAS ASFÁLTICAS	6
3.2.1 Misturas usinadas	6
3.2.2 Mistura feitas no campo em usinas móveis.....	11
3.2.3 Revestimentos obtidos por penetração	12
3.3 DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS	12
3.4 ADERÊNCIA DE CAMADAS DO PAVIMENTO.....	14
3.5 DEFORMAÇÃO PERMANENTE.....	16
3.6 ENSAIOS QUE AVALIAM DEFORMAÇÃO PERMANENTE.....	19
3.6.1 <i>Creep</i> Estático	19
3.6.2 <i>Creep</i> Dinâmico	21
3.6.3 Ensaio de <i>Leutner</i> (Cisalhamento direto sem força normal).....	24
4 MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS	28
4.1.1 Ligante asfáltico	28
4.1.2 Agregados graúdos	28
4.1.3 Agregados miúdos.....	28
4.1.4 Fíler	28
4.2 DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA UTILIZADA	28
4.3 PREPARAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA	30
4.4 PROCEDIMENTO PARA O ENSAIO DE <i>LEUTNER</i> :	33
4.5 PROCEDIMENTO PARA O ENSAIO DE <i>FLOW SHEAR NUMBER</i>	34
4.5.1 Determinação do <i>Flow Shear Number</i>	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
5.1 MEDIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	37
5.2 ENSAIO DE <i>LEUTNER</i>	39

5.2.1 Ensaio de <i>Leutner</i> para o corpo de prova 01	39
5.2.2 Ensaio de <i>Leutner</i> para o corpo de prova 04	40
5.3 <i>FLOW NUMBER</i> CALCULADO DO ENSAIO DE CREEP DINÂMICO	41
5.4 ENSAIO DE <i>FLOW SHEAR NUMBER</i>	42
5.4.1 Ensaio de <i>Flow Shear Number</i> para CP 05 com carregamento cíclico de 1,6 kN ...	42
5.4.2 Ensaio de <i>Flow Shear Number</i> para CP 05 com carregamento cíclico de 4,8 kN ...	43
5.4.3 Ensaio de <i>Flow Shear Number</i> para CP 06 com carregamento cíclico de 4,8 kN ...	44
6 CONCLUSÕES	46
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

Segundo dados levantados no ano de 2015 e divulgados pelo anuário de 2016 da CNT, a malha rodoviária brasileira é composta majoritariamente de estradas não pavimentadas, mais precisamente, por cerca de 1,3 milhão de km de estradas não pavimentadas enquanto que as vias pavimentadas correspondem a um montante de aproximadamente 210 mil km, portanto observa-se a importância da pavimentação e um mercado promissor para engenheiros dessa área, posto que o déficit de vias pavimentadas é muito grande.

Os países considerados de primeiro mundo, como Inglaterra e Alemanha, por exemplo, possuem praticamente a totalidade de suas vias pavimentadas; é claro que a extensão territorial desses países implica em uma malha rodoviária muito menor do que a de países com dimensões continentais como o Brasil. Nos EUA, por exemplo, de acordo com a *Federal Highway Administration* (FHA, 2013) a malha rodoviária pavimentada americana é cerca de 20 vezes maior do que a brasileira, 65% desta malha encontram-se pavimentada, enquanto que apenas 13% das estradas brasileiras encontram-se pavimentadas.

O modal rodoviário é o maior representante da matriz de transporte brasileira correspondendo por cerca de 2/3 do volume de cargas transportados no país, implicando em uma relação direta e de grande dependência entre o custo de produção e as condições das vias pelas quais escoam boa parte dos bens de consumo e bens destinados a exportação. Todo esse contexto apresentado endossa ainda mais a necessidade de ampliação e constante cuidado e observância referente à malha.

Um projeto de pavimentação pode ser considerado bem sucedido quando consegue atender de forma simultânea, de acordo com o horizonte de projeto estabelecido, a critérios de economia, segurança, conforto e durabilidade, considerando o grau de importância socioeconômico e o volume de tráfego ao qual estará submetida àquela via que se pretende implantar o projeto.

Considerando a malha viária total do país, as estradas municipais são a maior responsável pelo alto índice de vias não pavimentadas no Brasil, visto que dispõem de uma extensão muito pequena de vias com pavimento em comparação as vias estaduais e federais. A viabilidade econômica é o grande entrave para a execução e conclusão de pavimento nas cidades brasileiras.

O pavimento flexível, cujo revestimento é de mistura asfáltica, é o mais utilizado no sistema viário brasileiro. Este, em sua maioria, está associado às misturas asfálticas compostas basicamente de agregados e ligantes asfálticos. Na maioria dos países, a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento. O mesmo acontece no Brasil, mais de 95% das estradas foram pavimentadas com material asfáltico. São diversas as razões para o uso intensivo do asfalto em pavimentação.

O concreto asfáltico tem menor custo de implantação, proporciona forte união dos agregados, permite flexibilidade controlável, é impermeável, de fácil aplicação e manuseio quando aquecido. Já as vantagens da pavimentação em concreto é a grande resistência a deformações, distribuição eficaz das tensões, maior resistência à abrasão, alta aderência do pneu, ótima refletividade (ideal para condução noturna), alta taxa de segurança (menor risco de aquaplanagem), por ter melhor aderência) e vida útil prolongada, sendo de aproximadamente 30 anos, mais que o dobro do pavimento asfáltico.

Os danos em revestimentos asfáltico, quando submetido a carregamentos repetidos, estão relacionados a três principais mecanismos de deterioração: a deformação permanente, as trincas por fadiga e as trincas térmicas. Nos últimos anos tem sido bastante comum a ocorrência de problemas associados à deformação permanente nos revestimentos asfálticos aplicados em rodovias brasileiras. Desta forma, em uma análise preliminar, é provável estabelecer a hipótese que o ensaio “*Leutner Shear Test*”, que determina a resistência ao cisalhamento na interface entre duas camadas de revestimento asfáltico, possa ser modificado para que seja possível verificar a resistência ao cisalhamento de misturas asfálticas, almejando proporcionar um maior entendimento do comportamento mecânico e evitar o surgimento de deformações permanentes em misturas asfálticas, que são originárias das solicitações do tráfego sobre a estrutura do pavimento.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é determinar um procedimento para obtenção do *Flow Number Shear* (FN *Shear*), baseado no método de ajuste de curvas, de uma determinada mistura asfáltica submetida a um ensaio, utilizando um novo equipamento desenvolvido pelo LEP, que produz esforços de cisalhamento para carregamentos dinâmicos.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram os seguintes:

- Realizar revisão bibliográfica dos ensaios de *creep* estático, *creep* dinâmico e de *Leutner* para definição de parâmetros necessários ao novo ensaio que se deseja implementar, tais como: parâmetros de intensidade do carregamento, temperatura, frequência de aplicação da carga e nível de deformação máxima a ser utilizado
- Verificar, através do ensaio de *Leutner*, a resistência ao cisalhamento de uma mistura composta por um teor de 5% de CAP 50/70;
- Verificar a significância da diferença encontrada entre o FN obtido através do método de ajuste de curvas e o FN calculado pelo software em ensaio de *creep* dinâmico realizado anteriormente por outro pesquisador.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Um pavimento rodoviário é uma estrutura constituída por um conjunto de camadas de espessura finita, apoiadas num maciço semi-indefinido, o solo de fundação (PEREIRA E MIRANDA, 1999).

As diversas camadas que compõem o pavimento são constituídas de materiais com características distintas em relação à sua composição e conseqüentemente de deformabilidade e resistência. Esse sistema formado por diferentes camadas está em constante interação entre si, resultando em uma estrutura com comportamento estrutural complexo no que diz respeito ao cálculo de tensões e deformações resultantes da ação do tráfego, bem como do intemperismo.

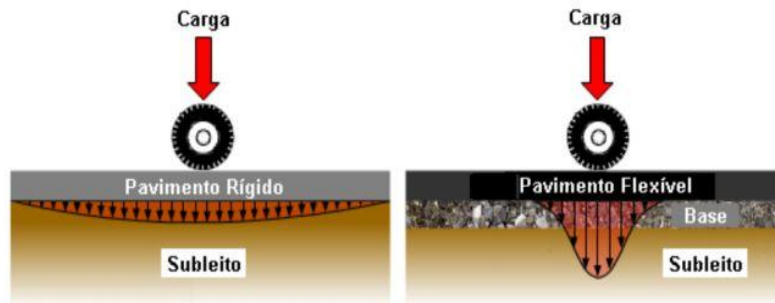
O dimensionamento dos pavimentos busca atender a uma determinada finalidade estabelecida em projeto, portanto, as espessuras e os tipos de materiais utilizados nas camadas do pavimento são dimensionados conforme as necessidades definidas em projeto após o levantamento de algumas variáveis, tais como: volume de tráfego, características geotécnicas dos materiais locais disponíveis, disponibilidade de recursos, horizonte de projeto, etc.

De acordo com o Manual do DNIT (2006), os pavimentos rodoviários são classificados da seguinte forma:

- Flexível: Aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Exemplo típico: pavimento constituído por uma base de brita (brita graduada, macadame) ou por uma base de solo pedregulhoso, revestida por uma camada asfáltica.
- Semi-Rígido – Caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como, por exemplo, por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica.
- Rígido – Aquele em que o revestimento tem elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. Exemplo típico: Pavimento constituído por lajes de concreto de cimento Portland.

Na Figura 1, observa-se a diferença na distribuição das cargas aplicadas sobre pavimentos flexíveis e rígidos:

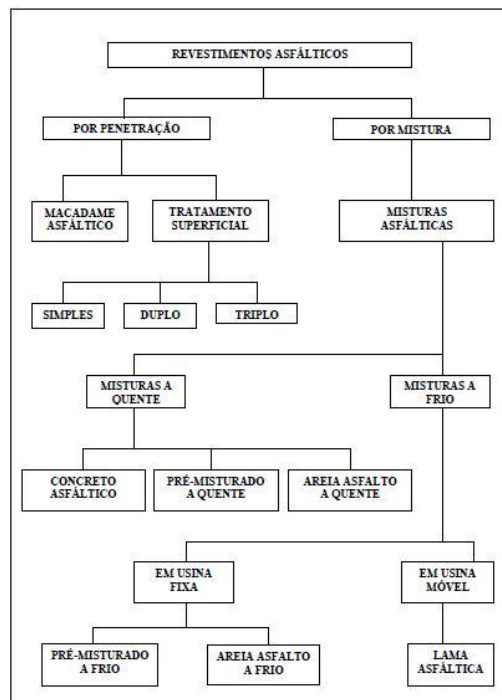
Figura 1: Distribuição das cargas nos pavimentos Rígido e Flexível



(fonte: ARAUJO, 2016, p.5)

Na maioria dos pavimentos brasileiros usa-se como revestimento uma mistura de agregados minerais, de vários tamanhos, podendo também variar quanto à fonte, com ligantes asfálticos que, de forma adequadamente proporcionada e processada, garante ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previsto para o local, (BERNUCCI, 2007). Essa mistura caracterizada por BERNUCCI (2007) é o que se denomina mistura asfáltica. Na figura 2, são exibidas as misturas asfálticas mais utilizadas como revestimento.

Figura 2: Classificação dos revestimentos asfálticos



(fonte: Adaptado de SANTANA, 1993)

3.2 MISTURAS ASFÁLTICAS

3.2.1 Misturas usinadas

As misturas asfálticas podem ser usinadas, na qual a mistura é realizada em usinas estacionárias, onde o agregado e ligante são misturados previamente, e cujos teores são variáveis de acordo com a dosagem pré-estabelecida. Esse tipo de mistura é transportado através de caminhões que a despejam no local de aplicação para as posteriores etapas de espalhamento e compactação com equipamentos adequados. As misturas asfálticas podem variar quanto à temperatura cuja mistura é realizada, denominadas misturas asfálticas a quente, quando ocorre aquecimento dos agregados e ligantes e misturas asfálticas a frio, quando não ocorre aquecimento dos agregados, porém eventualmente o ligante possa sofrer aquecimento.

3.2.1.1 Misturas a quente

Segundo afirma BERNUCCI (2007), as misturas a quente diferenciam-se entre si de acordo com o padrão granulométrico adotado, as exigências de características mecânicas e em função da aplicação a que se destina. Entre as misturas a quente mais comuns, pode-se destacar, principalmente:

Misturas de graduação **densa**: Apresenta uma curva granulométrica bem-graduada e contínua. De acordo com VASCONCELOS (2004), as misturas asfálticas são classificadas como densas e contínuas quando essas apresentam baixos valores de volume de vazios (geralmente em torno de 4%) e uma distribuição granulométrica contando com todas as frações de agregados de forma semelhante. São exemplos desse tipo de mistura o CBUQ e o AAUQ.

Misturas de graduação **aberta**: Apresentam uma curva granulométrica que indica uma predominância de partículas com dimensões muito semelhantes e com baixa proporção de materiais finos, fazendo com que haja muitos vazios interconectados, ocasionando um elevado número de vazios. Esse tipo de granulometria da mistura proporciona uma elevada permeabilidade, permitindo que haja percolação de água no interior da mistura asfáltica. O principal exemplo dessa mistura são misturas asfálticas drenantes, conhecida como CPA no Brasil.

Misturas de graduação **descontínua**: São misturas com granulometria caracterizada por apresentar proporção consideravelmente alta de partículas de maiores dimensões em relação às de dimensões intermediárias. Há um preenchimento complementar com determinada quantidade de finos. Essa proporcionalidade, relativa à granulometria das misturas de graduação descontínuas faz com que a mistura asfáltica seja mais resistente a deformações permanentes, pois há maior contato entre os agregados graúdos. Como exemplos desse tipo de mistura, destacam-se as misturas *SMA* e *Gap-Graded*.

Na figura 3 encontram-se corpos de prova exemplificando as diversas graduações de misturas asfálticas:

Figura 3: Exemplos de corpos de prova com misturas de diferentes graduações



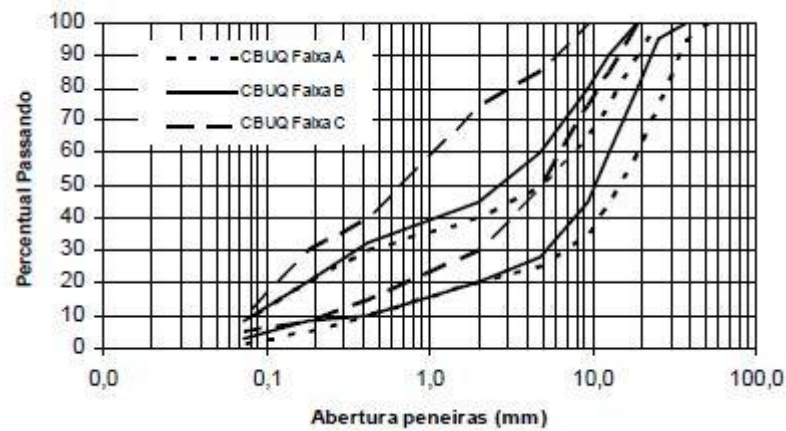
(fonte: BERNUCCI, 2007, p. 161)

CBUQ ± Concreto Betuminoso Usinado a Quente

Os concretos asfálticos se caracterizam por apresentar misturas com resistência considerável, pois são compostos por um arranjo bem-graduado de seus materiais constituintes, apresentando um volume de vazios variável entre 3 a 6%, dependendo da camada que se pretende utilizá-lo. Caso o volume de vazios não seja executado conforme especificado, há um grande risco que ocorra deformações excessivas causadas por fluência.

De acordo com BONET (2002), Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), é um revestimento flexível, resultante da mistura a quente, em usina apropriada, de agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (fíler – eventualmente) e cimento asfáltico de petróleo (CAP) de acordo com proporções definidas previamente em laboratório, de forma a atender os requisitos granulométricos, de densidade, de vazios e de resistência compatíveis com padrões preestabelecidos. Um concreto betuminoso se caracteriza pelo fato de que a operação de mistura é precedida pelo aquecimento de seus componentes a temperaturas elevadas (entre 140° C e 180° C), e sua distribuição e compactação na pista serem também precedidas de aquecimento, estando a mistura em temperaturas entre 80° C e 140° C. As diferentes faixas granulométricas para o CBUQ são exibidas na figura 4:

Figura 4: Faixas granulométricas para CBUQ



(fonte: DNIT, 2006)

Revestimento Asfáltico Drenante

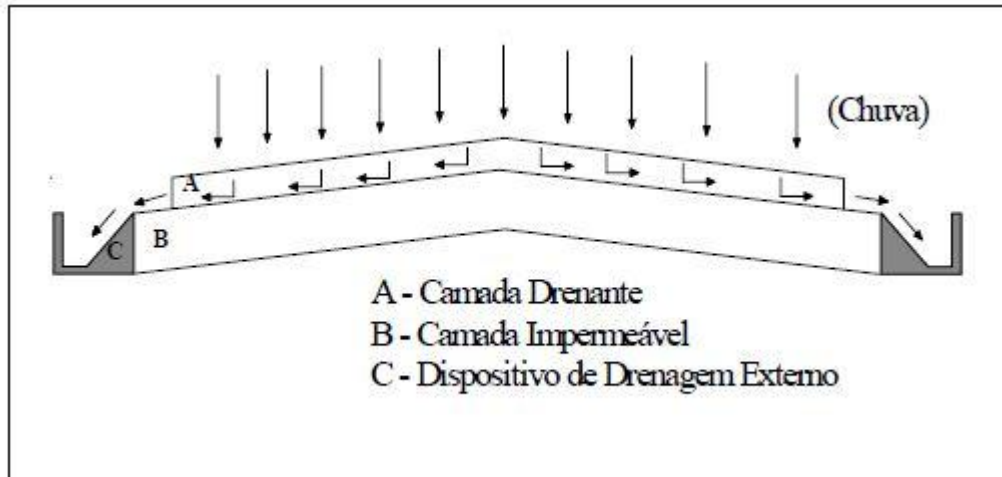
São misturas asfálticas de graduação aberta, cujo volume de vazios é superior em relação aos demais tipos de misturas, permitindo que haja um fluxo de água em direção as camadas subjacentes, resultando dessa forma, em um revestimento com a importante funcionalidade de drenar parte da lâmina de água acumulada no revestimento asfáltico. Segundo a especificação DNER-ES 386/99, essas misturas apresentam cerca de 18 a 25% de vazios com o ar. BERNUCCI (2007) comenta que na França, esse tipo de mistura pode apresentar vazios ao ar que podem chegar a 30%. O aspecto drenante dessas misturas faz com que haja um aumento na segurança na rodagem provocando uma redução do risco de fenômenos como a aquaplanagem, por exemplo.

Segundo a Petrobras (2001), as primeiras experiências com revestimento drenante no Brasil são do início da década de 80 na pista do aeroporto de Confins em Belo Horizonte, utilizando-se cimento asfáltico comum e em 1987 no aeroporto Santos Dumont no Rio de Janeiro, um revestimento asfáltico drenante utilizando-se de cimento asfáltico modificado por polímero.

Estes tipos de pavimento são geralmente constituídos de duas camadas: uma com função estrutural, composta por misturas asfálticas densas convencionais, e uma sem função estrutural, que é o concreto asfáltico drenante propriamente dito. A camada drenante é um assente sobre a camada impermeável e permite o escoamento das águas pluviais pelos vazios comunicantes. Ao encontrar a camada impermeável, a água escoar devido às inclinações do perfil da estrada, reduzindo, assim, a possibilidade da formação da lâmina d'água sobre a superfície de rolamento e aumentando a segurança do trânsito em dias de chuva. (OLIVEIRA, 2003)

A figura 5 mostra um esquema da seção transversal de um revestimento asfáltico drenante:

Figura 5: Esquema do asfalto drenante



(fonte: OLIVEIRA, 2003)

Stone Matrix Asphalt (SMA)

A SMA é uma mistura usinada a quente cuja graduação densa e descontínua e onde a proporção de agregado graúdo é grande em relação aos demais componentes. A mistura foi criada com o objetivo de maximizar o contato entre os agregados graúdos, causando um aumento na interação grão/grão e resultando em uma mistura mais resistente e durável.

De acordo com BERNUCCI (2007), os vazios formados entre os agregados graúdos são preenchidos por uma mistura de areia, fíler, ligante asfáltico e fibras. A mistura SMA apresenta bastante ligante asfáltico em sua composição, com teores que podem variar de 6 a 7%.

O SMA é utilizado como camada de rolamento numa espessura variando de 1,5 a 4,0 cm em função do diâmetro máximo do agregado mineral utilizado na composição da mistura. Não é recomendada a utilização do SMA em espessuras muito superiores a 4,0 cm, em decorrência de possibilidade de deformações permanentes, ou seja, maior probabilidade de formação de afundamentos de trilha de roda. No decorrer dos anos o SMA vem sendo utilizado como alternativa para rejuvenescimento de superfícies deterioradas. Para pavimentos que apresentam uma elevada capacidade estrutural, o SMA é empregado visando apenas uma melhoria do desempenho funcional (conforto e segurança aos usuários). Para este caso a camada delgada de SMA pode ser denominada de micro concreto asfáltico a quente, sendo aplicada numa espessura variando de 1,0 cm a 2,0 cm. (BELIGNI *et al.*, 2000)

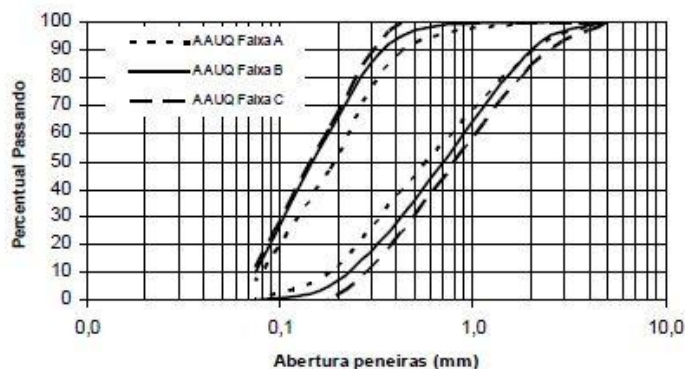
AAUQ ± Areia Asfalto Usinada a Quente

Os revestimentos de AAUQ's são compostos por uma mistura densa e empregados quando nas proximidades da região que se deseja implantar o projeto há uma escassez de agregados pétreos, impossibilitando o uso de outros tipos de misturas asfálticas. A areia asfalto usinada a quente também pode ser utilizada como revestimento em vias com baixo volume de tráfego. Em virtude da predominância de agregados miúdos, essa mistura asfáltica possui uma faixa de teores de ligantes maiores do que as demais misturas em que existem uma grande proporção de agregados graúdos, esse teor de asfalto varia de 6 a 12% (DNIT 032/2005 – ES).

Segundo ALDIGUERI (2001), o emprego desse tipo de mistura começou a ser aplicado no Brasil no início da década de 1960, primeiramente no Rio Grande do Sul e posteriormente em estados da região norte e nordeste, onde as AAUQ's são utilizadas não somente como revestimento, mas também como camada de regularização.

A figura 6 exhibe a faixa granulométrica para AAUQ:

Figura 6: Faixa granulométrica para AAUQ



(fonte: DNIT, 2006)

3.2.1.2 Misturas a frio

PMF ± Pré Misturado a Frio

Pré-misturado a frio é o produto resultante da mistura, em equipamento apropriado, de agregados minerais e emulsão asfáltica ou asfalto diluído, espalhado e comprimido a frio. Podem ser classificados segundo sua granulometria como abertos e densos. Os pré-misturados podem ser utilizados como camada de regularização, como base ou como revestimento. Suas camadas variam entre 3 a 20 cm de espessura compactada, dependendo do tipo de serviço e granulometria final da mistura, IBP (1986).

De acordo com SANTANA (1993), os pré-misturado a frio desenvolveram-se inicialmente na década de 1950 nos Estados Unidos, sua utilização no Brasil foi feita em

escala industrial a partir do ano de 1966. Já na década de 1980, o emprego generalizado de pré misturado a frio passou a ser em revestimentos com camada de até 5 cm.

Conforme a ABEDA (2001), dentre as principais vantagens da utilização de PMF, pode-se destacar a facilidade na trabalhabilidade a temperatura ambiente, bem como a necessidade de equipamentos mais simples quando comparado as misturas a quente. A boa adesividade com os mais diversos tipos de agregados britados, somado a facilidade de manuseio e estoque também merecem destaque.

AAF ± Areia Asfalto a Frio

A Areia Asfalto a Frio consiste em uma mistura que se caracteriza por apresentar ausência de agregados graúdos, sendo composto apenas por uma emulsão asfálticas, normalmente de ruptura lenta, fornecendo assim uma maior resistência mecânica a mistura. Além da emulsão e areia, a composição pode conter isolada ou concomitantemente pó de pedra, pedrisco e pó de escória.

Conforme a ABEDA (2001), AAF é o produto resultante da mistura, em equipamento apropriado, de emulsão asfáltica catiônica, agregado miúdo, podendo apresentar ou não material de enchimento (fíler), espalhado e compactado a frio. Este tipo de serviço se aplica na regularização – camada final de revestimento asfáltico e serviços do tipo tapa-buracos em vias de baixo volume de tráfego.

3.2.2 Mistura feitas no campo em usinas móveis

Lama Asfáltica

É uma argamassa obtida por meio da mistura dosada de agregado miúdo, filer mineral, asfalto emulsionado e água. Esta mistura, de consistência fluida, possibilita a execução de revestimentos asfálticos de pequena espessura (3 a 10 mm), aplicados à temperatura ambiente e com grande facilidade de espalhamento. As funções básicas da lama asfáltica são impermeabilização e rejuvenescimento de texturas.

A emulsão asfáltica pode conter aditivos como polímeros ou possa ser que haja adição de fibras na mistura, nesse caso origina-se o microrrevestimento asfáltico. Essa modificação faz com que a ruptura inicie-se lenta ao misturar com os agregados, porém torna-se rápida devido ao efeito provocado pelo polímero, desta forma a via pode ser liberada ao tráfego em menos de 2 horas após a aplicação. De acordo com BERNUCCI (2007) as principais utilizações do microrrevestimento são:

- Recuperação funcional de pavimentos deteriorados
- Capa selante
- Revestimento de pavimentos de baixo volume de tráfego.

3.2.3 Revestimentos obtidos por penetração

São revestimentos em que não há de fato uma mistura homogeneizada entre agregados e ligantes, ocorre apenas o lançamento de agregados e ligantes seguido de uma compactação da camada. Há uma diferenciação no tipo de penetração que pode ser direta quando o ligante é lançado após o agregado ou pode ser invertida quando o ligante é lançado primeiramente e o agregado em seguida, seguidos de compactação. Entre os tipos de revestimentos asfálticos obtidos através da penetração pode-se citar os tratamentos superficiais, que podem ser simples, duplos ou triplos a depender do número de camadas ligante/agregado e também o macadame asfáltico. Esse tipo de revestimento é utilizado em vias com tráfegos leves.

3.3 DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Segundo HUBER (2013), a primeira dosagem de material asfáltico para rodovias que se tem registro é conhecido como o método de *Hubbard-Field*, desenvolvido por Charles Hubbard e Frederick Field na metade da década de 1920 nos Estados Unidos. Esse método foi utilizado massivamente pelos departamentos rodoviários dos estados americanos até o fim da década de 1930, embora alguns estados tenham utilizado esse tipo de dosagem até a década de 1960. Posteriormente passou-se a adotar o método proposto por Francis Hveem, no qual o teor de asfalto era determinado baseado na área superficial dos agregados da mistura.

No início da década de 1940, o Engenheiro Bruce Marshall do Departamento Rodoviário do Missipi passou a desenvolver estudos que introduzissem melhoria aos métodos de dosagens utilizados àquela época. Baseado no método de *Hubbard-Field*, o qual utilizava-se de martelos para compactação, Marshall foi responsável por desenvolver um martelo que padronizou a energia de compactação das misturas asfálticas. Foi o primeiro método a levar em conta o volume de vazios (*air voids*), porém ainda não levava em conta os vazios do agregado mineral que mais tarde foram incluídos no procedimento de dosagem pelo *Asphalt Institute*. De acordo com ROBERTS *et al.* (1996), no período compreendido entre as décadas de 40 e metade da década de 90, cerca de 75% dos departamentos de transporte utilizavam a dosagem *Marshall* enquanto que 25% adotavam o método de *Hveem*.

Durante a década de 80, várias rodovias americanas de tráfego pesado passaram a evidenciar deformações permanentes prematuras, que foram atribuídas ao excesso de ligante nas misturas. Muitos engenheiros acreditavam que o impacto na compactação das misturas durante a dosagem *Marshall* produziam corpos de prova (CP) com densidades que não condiziam com as densidades do pavimento em campo. A partir de então, um forte estudo foi desenvolvido por pesquisadores e engenheiros dos mais diversos departamentos de transporte de estados dos EUA com investimentos da ordem de US\$ 150 milhões sobre materiais asfálticos, denominado *Strategic Highway Research Program* (SHRP), que resultou em um novo procedimento de dosagem denominado *Superpave* (VASCONCELOS, 2004).

O procedimento de dosagem *Superpave* é predominante nos Estados Unidos atualmente, e um de seus principais avanços em relação às demais dosagens é a utilização de um compactador giratório em substituição a compactação por impacto, fazendo com que o corpo de prova seja compactado por meio de amassamento, possibilitando assim, que a densidade da mistura asfáltica obtida através da metodologia *Superpave* seja mais próxima daquela encontrada em campo. O compactador giratório, exibido na figura 7, é um equipamento ainda restrito a algumas poucas universidades aqui no Brasil, isso explica porque o método de *Marshall* ainda é o mais utilizado no país.

Segundo VASCONCELOS (2004), até o ano de 2003 não havia nenhum compactador giratório nas regiões norte/nordeste do país, fazendo com que em grande parte desses lugares o método de dosagem de misturas asfálticas ainda seja o tradicional. Com a chegada do compactador giratório no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) na Universidade Federal do Ceará (UFC) algumas pesquisas utilizando a dosagem *Superpave* começaram a ser desenvolvidas na região. A figura 7 exhibe o compactador giratório utilizado no LEP da UFCG.

O passo a passo do método de dosagem *Superpave* envolve uma série de complexidades que fogem ao foco desta pesquisa, porém todo o procedimento para a realização da dosagem é descrito por BERNUCCI (2007).

Figura 7: Compactador giratório utilizado na dosagem *Superpave*



(fonte: próprio autor, 2017).

3.4 ADERÊNCIA DE CAMADAS DO PAVIMENTO

Segundo CARVALHO E FIGUEIREDO (2013), o fenômeno da aderência é aquele que provoca uma mesma deformação em matérias cuja resistência é distinta e que faz com que estes elementos aderidos trabalhem juntos.

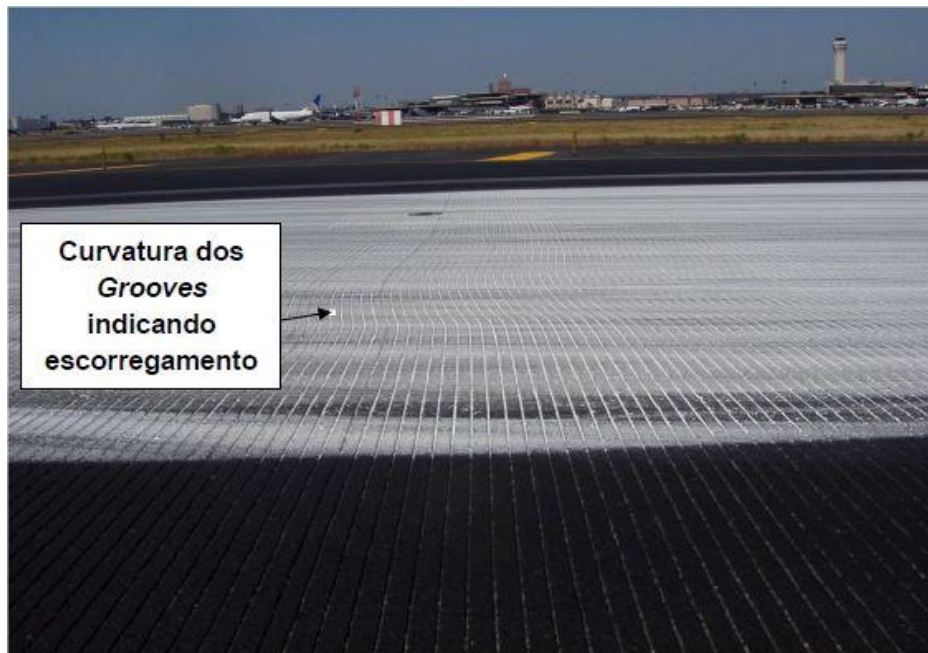
Na pavimentação é essencial que ocorra uma boa aderência entre as diversas camadas do pavimento, não somente entre as camadas de revestimento asfáltico, como também, entre as camadas granulares. A boa aderência entre essas camadas propicia uma uniformização das deformações a que a estrutura está submetida, pois havendo completa união entre os estratos, a estrutura passará a se comportar monoliticamente, isto é, como um único conjunto.

É importante observar que para o caso de existência de aderência entre as camadas, os esforços horizontais na interface são menores que no caso de não haver aderência, visto que, no primeiro caso, a interface coincide ou está mais próxima da linha neutra, que possui tensões e deformações nulas, já na ausência, a interface coincide com a borda do elemento, local onde as tensões devidas à flexão são máximas. (SCHERER, 2015).

Na prática, não é simples fazer com que as camadas apresentem características de total aderência. Segundo GUIMARÃES (2013), ensaios de cisalhamento realizados por MOHAMMAD et al (2002) em corpos de prova compostos por uma única camada de revestimento e corpos de provas com duas camadas de revestimento, demonstraram que os corpos de prova que apresentavam interface de ligação entre camadas só atingiram no máximo cerca de 83% da resistência dos corpos de prova monolíticos. Embora a execução de revestimentos asfálticos em diversas camadas propiciem melhores resultados em relação ao grau de compactação, por outro lado é criada a fragilidade proporcionada pela falta de eficiência da ligação entre camadas.

A má aderência entre camadas provoca um aumento de tensões e conseqüentemente diminuição da vida útil da estrutura dimensionada. Diversas falhas surgem devido a esses fatores dentre a qual se destaca o aparecimento de trincas, causado pelo escorregamento das camadas, onde estas se deslocam em sentido contrário. Esse tipo de problema aparece de uma forma mais frequente em locais específicos do pavimento que ocorrem movimentos de aceleração e frenagem, como por exemplo, na cabeceira de pistas de aeroportos. O fenômeno é representado na figura 8:

Figura 8: Escorregamento no pavimento do aeroporto de Newark – NJ



(fonte: Guimarães, 2007)

O principal meio de ligação entre as camadas é o que se denomina pintura de ligação, que consiste em uma aplicação de película de ligante betuminoso à camada subjacente, seja de revestimento asfáltico ou mesmo a camada de base. É uma pintura asfáltica executada com a função básica de promover a aderência ou ligação da superfície da camada pintada com a camada asfáltica a ser sobreposta. É aplicável em camadas de base, de ligação ou intermediárias de duas ou mais camadas asfálticas na construção de pavimentos flexíveis, e ainda, sobre antigos revestimentos asfálticos, previamente à execução de um reforço, recapeamento, rejuvenescimento superficial com lama asfáltica, micro revestimento e reperfilagens com misturas asfálticas a frio ou a quente. DER-PR (ES-P 17/05).

Segundo SALOMON (2006), a emulsão asfáltica, que é uma combinação resultante da mistura de água (de 25 a 60%), ligante asfáltico (40 a 75%) e agente emulsificante (0,2 a 0,5%) é o principal material utilizado para pintura de ligação. Essa proporção é dependente de características do CAP, tipo de agente emulsificante utilizado e viscosidade desejada para emulsão. As emulsões podem ser classificadas quanto à velocidade de ruptura que pode ser lenta, média ou rápida.

O tipo mais comum de emulsão empregado em pinturas de ligação são as de rupturas rápidas, além disso, existem diversas recomendações de pesquisadores, dos DER's e do DNIT quanto à taxa de aplicação da emulsão utilizada para pintura de ligação e valores bastantes citados são da ordem de 0,3 a 0,8 L/m².

De acordo com MOHAMMAD et. al. (2002), existe um teor ótimo de emulsão representado através de um gráfico cujo eixo das abscissas é representado pela tensão de

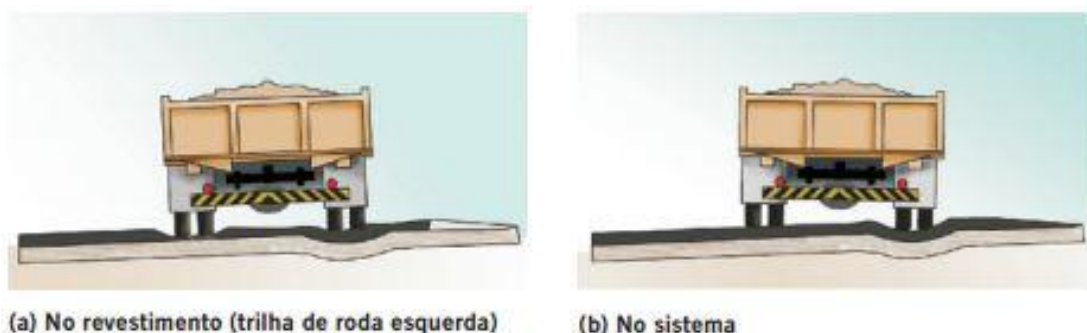
cisalhamento direto enquanto que no eixo das ordenadas encontra-se o teor de emulsão. O teor ótimo é caracterizado como sendo aquele em que a tensão de cisalhamento direto é máxima, este teor é fundamental para que haja uma aderência satisfatória entre camadas do pavimento. CHEN e HUANG (2010) afirmam que a falha na aderência entre camadas está associada diretamente a falta de pintura de ligação, porém o seu excesso pode criar um filme espesso e deformável responsável por diminuir o atrito e o intertravamento entre as camadas, causando consequências indesejáveis como escorregamento, por exemplo.

3.5 DEFORMAÇÃO PERMANENTE

A deformação permanente é um defeito na estrutura do pavimento caracterizado por depressões longitudinais, sendo uma das falhas mais comuns apresentada pelos pavimentos juntamente com a aparição de trincas, sejam decorrentes de ações mecânicas ou térmicas. A deformação permanente é continuamente agravada conforme o número de solicitações provenientes do tráfego local e pode ser proveniente tanto da camada de revestimento, como também das demais subcamadas. Esse tipo de deformação é não recuperável, o que explica sua denominação como “permanente”.

De acordo com YODER e WITZACK (1975), a deformação permanente pode ser compreendida como um dos principais meios de deterioração dos pavimentos asfálticos, provocando um comprometimento, por vezes precoce, do seu desempenho em serviço. Ainda revelam que a deformação permanente em revestimentos asfálticos pode ser identificada por meio do afundamento em trilhas de roda, podendo ou não apresentar elevações laterais. A figura 9 demonstra o fenômeno do afundamento em trilho de roda.

Figura 9: Representação da deformação permanente no revestimento e no sistema



(fonte: Bernucci, 2007)

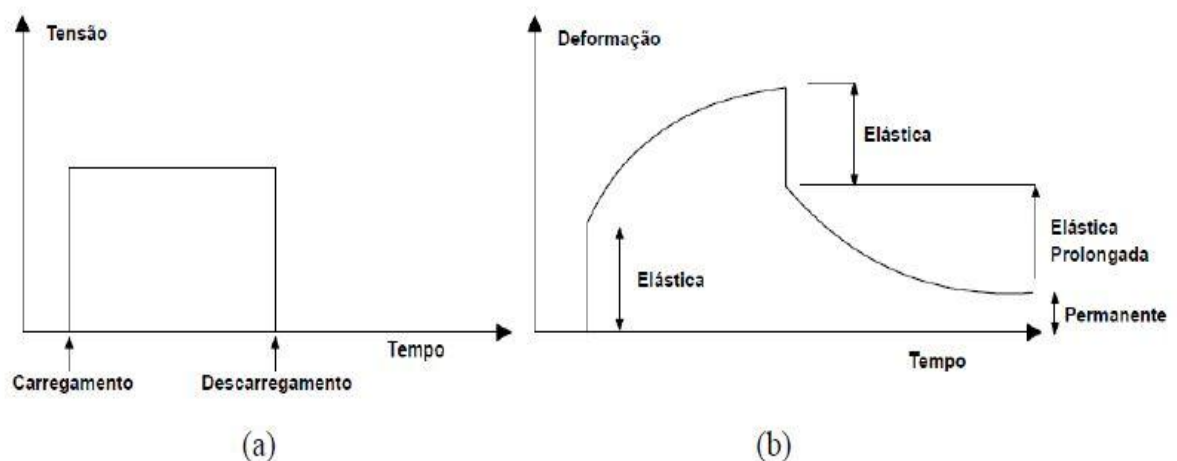
Dentre as principais causas de deformação permanente, pode-se citar além da densificação dos materiais decorrentes da ação do tráfego, a ruptura por cisalhamento. NASCIMENTO (2008) afirma que quando a mistura asfáltica possui densidade adequada, a causa responsável pelo afundamento em trilha de roda é a deformação cisalhante; porém, nos casos em que a compactação é mal executada, o motivo da deformação é a consolidação dos materiais que compõem o pavimento.

Segundo MOURA (2010), as irregularidades decorrentes da deformação permanente em trilha de roda são decorrentes de três mecanismos:

- a) Deformação permanente da estrutura: Diz respeito ao subdimensionamento, no qual as cargas aplicadas pelo tráfego são subestimadas. Também podem estar associadas a falhas no processo de execução do pavimento, bem como problemas ligados a drenagem ou falta de suporte do subleito.
- b) Deformação permanente causada por fluência: Está diretamente ligado a problemas em relação à dosagem da mistura asfáltica, assim como associada à seleção não criteriosa de materiais componentes da mistura.
- c) Deformação permanente ocasionada pelo uso: São falhas incomuns nos pavimentos de nosso país. É comum em regiões onde há neve acumulada na pista e os usuários da via são obrigados a utilizar correntes ou pinos atrelados aos pneus para que haja aderência satisfatória.

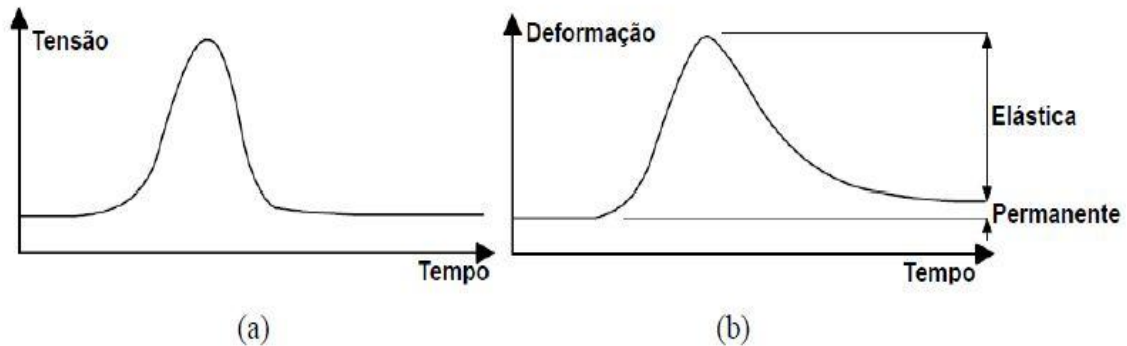
Quando se aplica uma carga sobre um revestimento asfáltico, grande parte da deformação causada no pavimento é sob forma de deformação elástica, ou seja, há a deformação devido à aplicação da carga, porém após o descarregamento, quase totalidade da deformação é recuperável. A parte recuperável é denominada elástica, enquanto a parte que não se recupera é a permanente. As figuras 10 e 11 a seguir, são representações da deformação sofrida devido a carregamentos estáticos e dinâmicos respectivamente:

Figura 10: Deformação devido à aplicação de carregamento estático



(fonte: Borges, 2014)

Figura 11: Deformação devido à aplicação de carregamento dinâmico



(fonte: Borges, 2014)

Nota-se que a situação que mais se assemelha a solicitação que os pavimentos sofrem com maior frequência é aquela cujo revestimento está submetido aos carregamentos dinâmicos, retratando a passagem de veículos pelo pavimento. Embora as figuras 10 e 11 mostrem que a deformação elástica tem intensidade muito superior à deformação permanente para um ciclo de carga, a repetição com elevada frequência leva a um acúmulo de pequenas deformações permanentes que somadas durante toda a vida de serviço do pavimento passam a ser significantes, passando a ser fonte de preocupação, desconforto e insegurança para os usuários.

NG (2013) relata que diversos fatores contribuem para o desenvolvimento do afundamento em trilha de rodas, dentre os quais destacam-se:

- a) Ligante asfáltico: misturas asfálticas que empregam ligantes de maior viscosidade têm menor rigidez, dessa forma, são mais suscetíveis ao desenvolvimento de deformações permanentes. Outra característica importante é o teor de ligantes asfálticos, pois um elevado teor reduz o intertravamento produzido pela interação entre os agregados, diminuindo conseqüentemente a resistência ao cisalhamento; portanto, isso explica melhor eficiência da dosagem *Superpave* em relação à dosagem *Marshall*, pois acredita-se que o método de compactação por impacto não produz àquela densidade encontrada em campo, fazendo com que a dosagem *Marshall* produza misturas asfálticas com excesso de ligante.
- b) Agregados: A forma dos agregados é extremamente relevante no que diz respeito ao atrito interno, experimentos mostram que agregados britados de forma cúbica são os mais resistentes e com melhor atrito interno, conseqüentemente menos suscetíveis a deformações permanentes excessivas. A granulometria dos agregados é outro fator preponderante para evitar deformações excessivas precoces, deve-se, portanto, buscar uma granulometria com maior densidade possível.

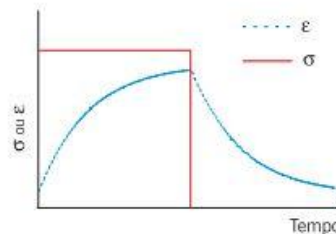
- c) Misturas asfálticas: Composições que resultem em números de vazios elevados apresentam maiores chances de apresentarem deformações permanentes prematuras, por outro lado, estudos apontam que volumes de vazios muito baixos (menores que 4%) resultam em deformações permanentes plásticas, devido ao preenchimento dos vazios com um alto teor de ligante asfáltico, o que aumenta a lubrificação entre os agregados e consequentemente redução da resistência.

3.6 ENSAIOS QUE AVALIAM DEFORMAÇÃO PERMANENTE

3.6.1 *Creep* Estático

O ensaio de *creep* estático é um ensaio cujo arranjo bastante simples permite que se relacionem os dados obtidos no resultado do ensaio com a susceptibilidade da mistura asfáltica de sofrer ou não deformações permanentes excessivas. De acordo com BERNUCCI (2007), o ensaio de *creep* pode ser realizado através da aplicação de carregamentos de compressão, tração, torção e flexão, como no Brasil as cargas de aplicação para o ensaio são massivamente compressivas, este ficou conhecido no país, como ensaio de compressão uniaxial estático. O ensaio fornece leituras de deformação conforme é aplicado o carregamento constante e posterior descarregamento com o tempo. O gráfico formado pelas informações obtidas no ensaio é mostrado na figura 12.

Figura 12: Informações obtidas no ensaio de *creep* estático



(fonte: Bernucci, 2007)

Borges (2014) relata que o ensaio de *creep* estático pode ser realizado de três maneiras diferentes quanto ao modo de aplicação da carga de compressão no corpo de prova:

- Carga aplicada axialmente com corpo de prova não confinado;
- Carga aplicada axialmente com corpo de prova confinado;
- Carga aplicada diametralmente por compressão diametral.

Segundo COELHO (1996), o ensaio de compressão uniaxial estático se dá por meio da aplicação de uma carga no sentido axial (vertical) a um corpo de prova cilíndrico, usualmente com as dimensões dos corpos de prova utilizados na dosagem *Marshall*. A duração de aplicação dessa carga é durante o período de uma hora, seguido de um período de descarga de 15 minutos. A movimentação de uma prensa pneumática é responsável pela aplicação da

carga, enquanto que a leitura das deformações axiais é realizada através da média aritmética da leitura de dois LVDT's instalados de forma alinhada. A figura 13 mostra um exemplo com o arranjo do equipamento utilizado no ensaio de creep estático:

Figura 13: Exemplo de arranjo experimental para o ensaio de *creep* estático



(fonte: Bernucci, 2007)

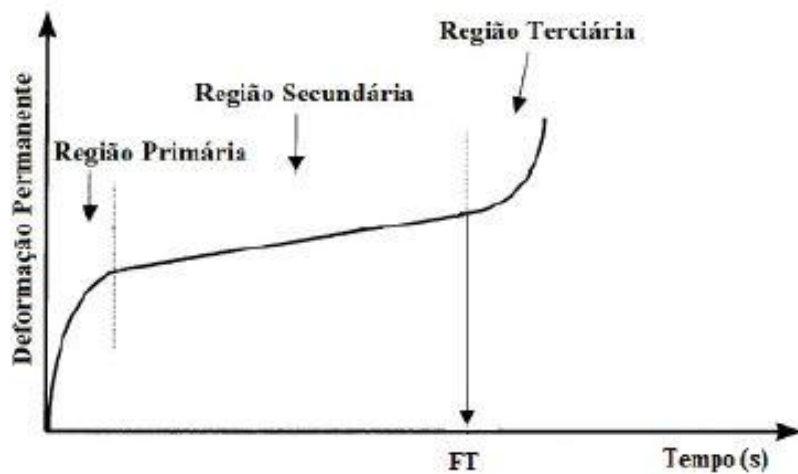
Devido à aplicação da carga estática, o corpo de prova se deforma até se estabilizar ou romper (na verdade trata-se de um estado avançado de dano). Essa “ruptura” nem sempre é visível, havendo vários critérios para defini-la como, por exemplo, quando se ultrapassa uma deformação relativa de 0,008 mm/mm, ao final de uma hora, então a mistura asfáltica não é adequada para resistir às deformações permanentes (BERNUCCI, 2007).

Nos casos em que o corpo de prova é levado até a ruptura, ao elaborar-se a curva da deformação em função do tempo, é visível a divisão da curva em três zonas apresentadas a seguir, conforme SOARES (2014):

- I. Zona Primária: É a porção inicial da curva, apresentando uma taxa de deformação inicial muito alta devido ao carregamento inicial. Essa taxa de deformação vai diminuindo ao longo do tempo.
- II. Zona secundária: É a parte da curva onde a inclinação diminui e a taxa de aumento da deformação passa a ser constante.
- III. Zona terciária: Fase onde a inclinação volta a crescer, com brusco crescimento da taxa de deformação, culminando na ruptura do corpo de prova. O tempo correspondente ao início desse estágio é denominado tempo de fluência ou *Flow Time* (FT).

A divisão da curva em zonas primária, secundária e terciária é apresentada a seguir na figura 14:

Figura 14: Ensaio de *creep* estático com as três regiões de deformação por fluência



(fonte: Soares, 2014)

De acordo com BORGES (2014), o *Flow Time* tem sido um importante parâmetro para definição do comportamento de misturas asfálticas frente a deformações permanentes. Estudos realizados por WITZACK et al. (2002) em pistas experimentais, mostraram relações diretas entre afundamentos em trilha de roda e o número de fluência.

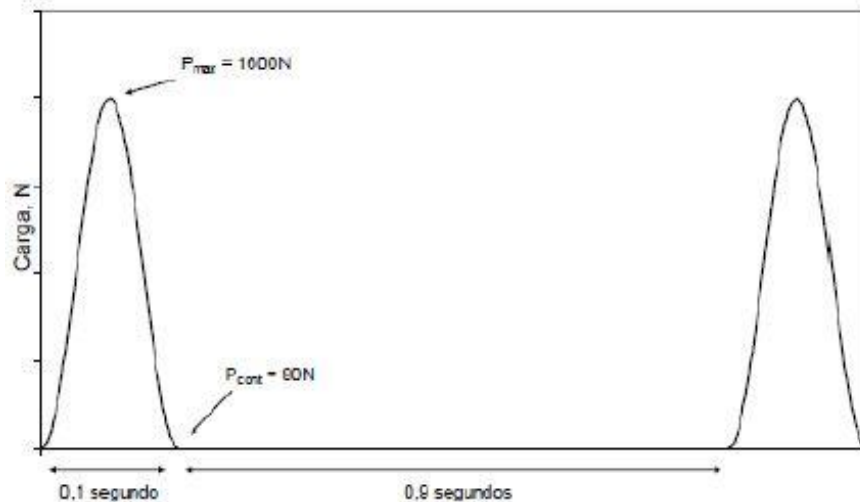
SOARES (2014) e MUGAYAR (2004) apontam em estudo a limitação do ensaio creep estático para situações em que a mistura asfáltica contém ligantes com agentes modificadores, pois o ensaio não foi capaz de detectar variações no comportamento de misturas asfálticas convencionais e modificadas no que se refere à deformação permanente, fazendo com que o aumento da capacidade de recuperação elástica promovido pelos modificadores não fosse identificado. Portanto, é recomendado que se utilize do ensaio de creep dinâmico para melhor avaliação de tais misturas.

3.6.2 *Creep* Dinâmico

O ensaio de *creep* dinâmico, também conhecido com ensaio uniaxial de cargas repetidas é muito similar ao arranjo do creep estático, assim como no ensaio uniaxial de carga estática, o corpo de prova geralmente utilizado segue as dimensões do corpo de prova da dosagem *Marshall* e também pode ou não estar confinado, nos casos em que há confinamento, esta tensão deve permanecer constante. A principal diferença, portanto, consiste no fato de aplicação da carga ser dinâmica e de seus resultados entregarem boa representatividade do que acontece em campo com misturas asfálticas modificadas por polímeros, pois de acordo com GRECO (2004), a deformação permanente acumulada quando submetida a cargas dinâmicas representa de forma mais adequada o potencial para deformação permanente de misturas com asfalto modificado.

Em geral, a seguinte combinação tem sido mais empregada: cada carregamento tem geralmente uma duração de 0,10 segundo e os intervalos entre as aplicações são de 0,90 segundo, aplicados a uma frequência de 1 Hz. O ensaio é realizado à temperatura de 60°C, e os corpos de prova utilizados no ensaio devem ter 15 cm \pm 0,25 cm de altura e 10 cm de diâmetro. A tensão aplicada em cada ciclo é de 204 Kpa, (BORGES, 2014). A figura 15 demonstra a representação do ciclo de aplicação da carga:

Figura 15: Ciclo de carregamento/descarregamento no *creep* dinâmico

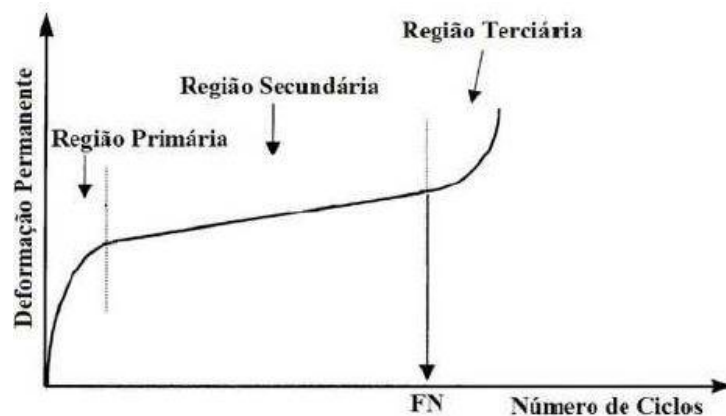


(fonte: Nascimento, 2008)

Embora BORGES (2014), destaque os arranjos e condições de ensaio mais adotados, de acordo com BERNUCCI (2007), o ensaio é realizado a certo intervalo de aplicação de cargas, tempo de aplicação das cargas, a uma frequência e temperatura especificadas. Ou seja, não se exige a obrigatoriedade das condições apontadas por BORGES (2014), sendo apenas recomendações de parâmetros utilizados em ensaios anteriores.

Os resultados do ensaio são apresentados em termos da deformação permanente acumulada *versus* o número de ciclos de carga. A curva de fluência também pode ser dividida em três zonas: primária, secundária e terciária. Porém, o número de ciclo em que se inicia o estágio terciário é denominado *Flow Number (FN)* (SOARES, 2014). A curva de fluência dividida em seus três estágios de deformação é exibida na figura 16:

Figura 16: Zonas de deformação da curva do ensaio de *creep* dinâmico

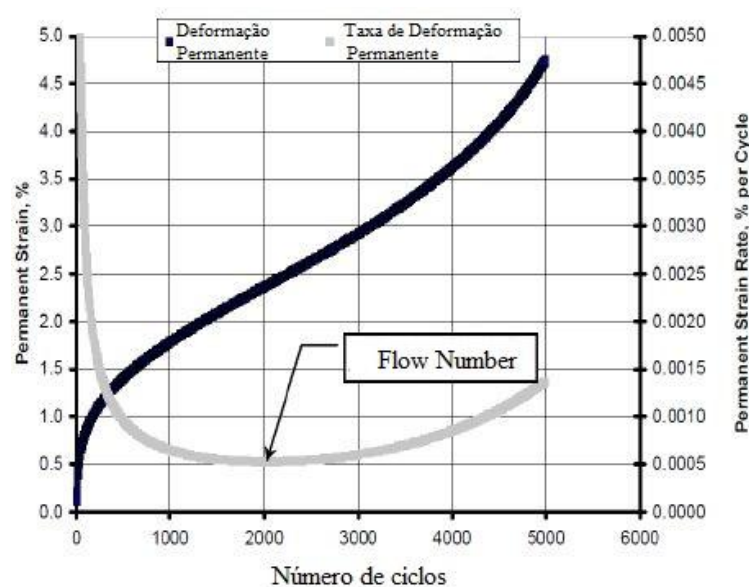


(fonte: Onofre, 2012)

De acordo com estudos realizados por WITZACK et al. (2002), muitos parâmetros desse ensaio podem apresentar correlação com a profundidade dos afundamentos em trilha de roda, dentre os quais podem ser citados: a inclinação da curva de deformação, parcela de deformação permanente, relação entre deformação total e deformação elástica. Porém o parâmetro cuja relação com a deformação permanente é mais íntimo é o *Flow Number* (FN).

Segundo BONAQUIST (2012), o FN pode ser definido como o número de ciclo onde a taxa de deformação permanente é mínima durante o ensaio realizado com repetição de cargas, como pode ser visto na figura 17. O autor completa que a identificação visual precisa do FN é muito difícil de ser realizada, no entanto, pode ser determinado através da derivada segunda da equação da curva que melhor se encaixe aos pontos obtidos para deformação permanente e número de ciclos do ensaio de *creep* dinâmico.

Figura 17: Identificação do FN através da taxa mínima de deformação permanente



(fonte: Bonaquist, 2012)

DONGRE (2009) relata que existem três critérios para que o ensaio seja finalizado, os mesmos são apresentados a seguir:

- I. Quando se alcança o *Flow Number*;
- II. Quando se atinge 10.000 ciclos;
- III. Quando a deformação de 5% é atingida para a mistura.

3.6.3 Ensaio de *Leutner* (Cisalhamento direto sem força normal)

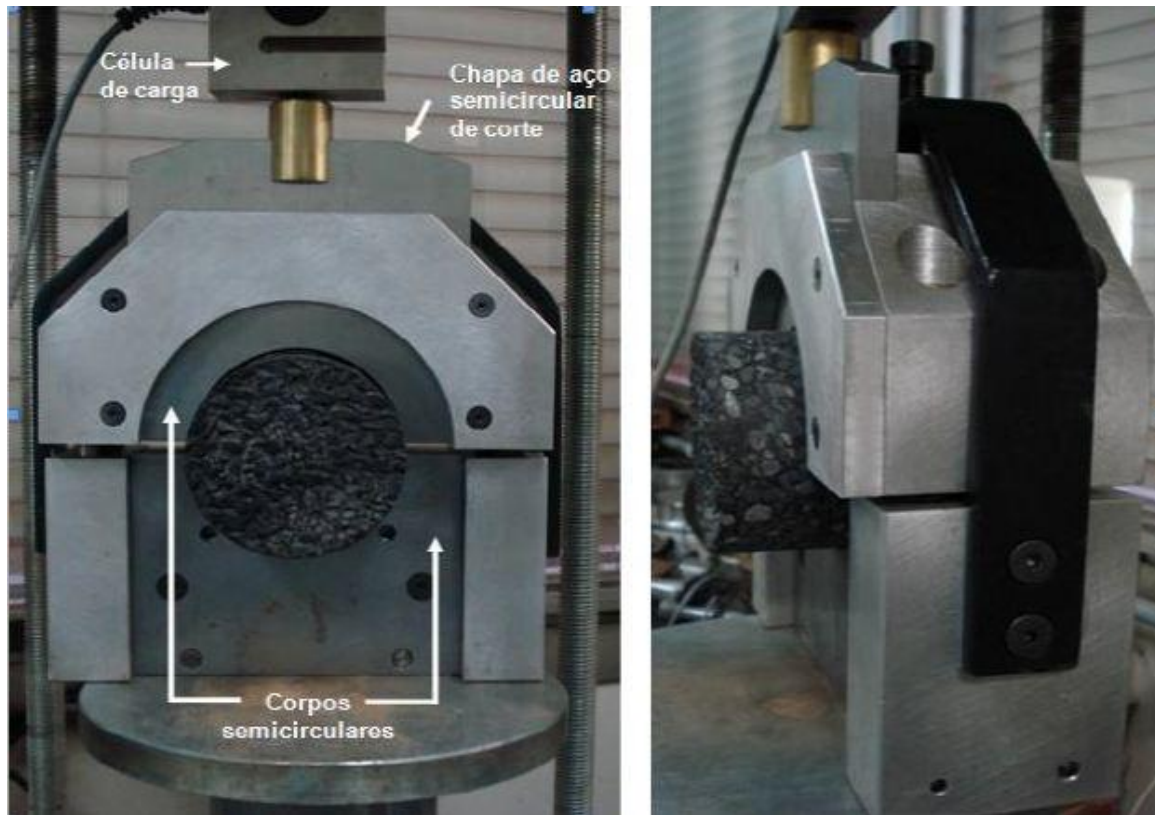
O ensaio de cisalhamento direto sem força normal foi inicialmente desenvolvido na década de 1970 na Alemanha com o objetivo de se avaliar a intensidade da resistência existente entre a ligação de duas camadas interligadas de asfalto. O ensaio consiste na aplicação de uma carga paralela ao plano de corte com a utilização de um corpo de prova cilíndrico de 150 ± 2 mm de diâmetro, com a existência de pelo menos duas camadas interligadas, encaixado sob um equipamento metálico bipartido. O equipamento utilizado no ensaio é mostrado nas figuras 18 e 19:

Figura 18: Equipamento utilizado no *Leutner Shear Test*



(fonte: Guimarães, 2013)

Figura 19: Equipamento utilizado no *Leutner Shear Test*

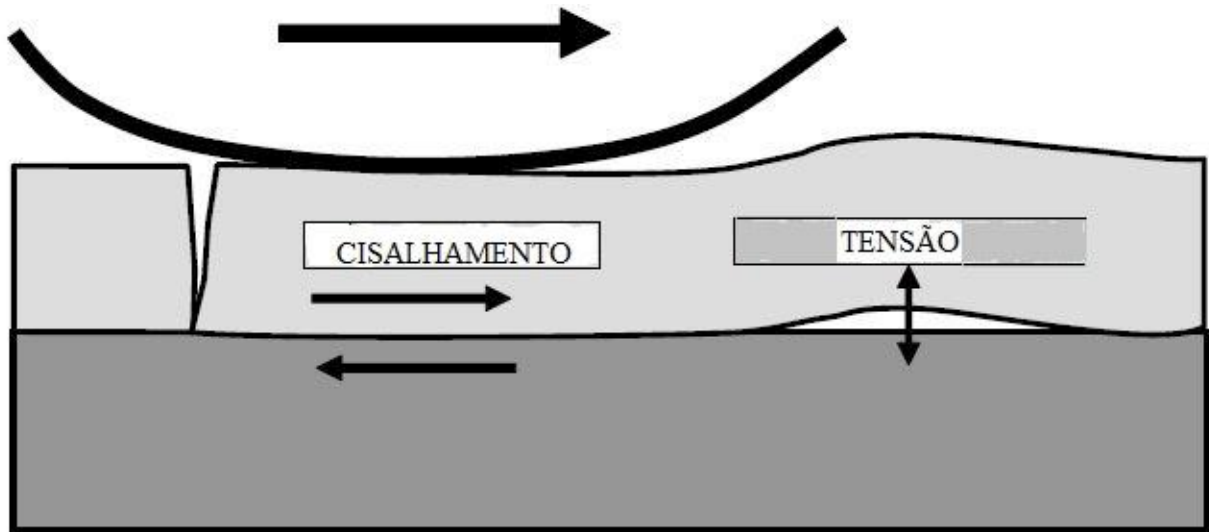


(fonte: Tuchumantel, 2013)

SUTANTO (2009) relata que a fim de que o corpo de prova esteja firme ao equipamento e que haja um bom contato entre o aparelho que aplica o carregamento e a amostra, as camadas inferiores e superiores tem suas dimensões mínimas especificadas em 70 mm e 25 mm respectivamente. Não há a obrigatoriedade, mas normalmente é utilizada uma taxa de carregamento de 50 ± 3 mm/min e uma temperatura do ensaio de 20 ± 1 °C. A taxa de carregamento está dentro dessa faixa, principalmente devido à simplicidade de alcançá-la em vários laboratórios de pavimentação ao redor do mundo, pois essa taxa pode ser obtida utilizando os mesmos aparelhos de carregamento dos ensaios de CBR e *Marshall*.

De acordo com SUTANTO (2009), a não utilização de uma força normal no ensaio de *Leutner* deve-se a questões de praticidade na execução do ensaio, pois o fato de só haver a aplicação da força de corte na interface do corpo de prova, faz com que a situação simulada no laboratório não seja exatamente igual às condições das solicitações impostas pelo tráfego na qual as cargas são aplicadas através do contato dos pneus na direção de um plano quase que perpendicular ao plano de ligação das camadas betuminosas. Uma representação de como estão distribuídas as tensões na situação de aplicação da carga pelo pneumático é exibido na figura 20:

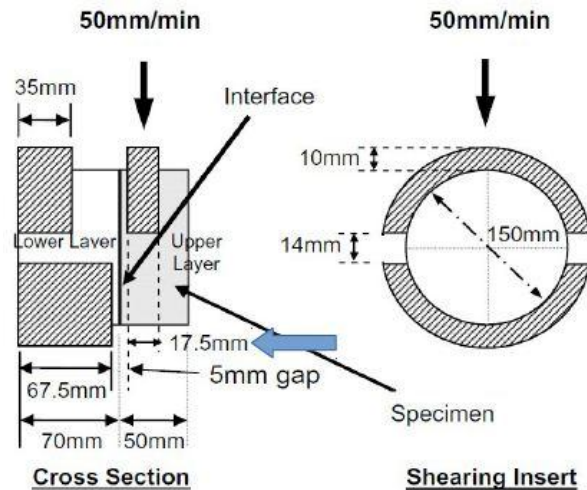
Figura 20: Situação de carregamento provocado pelo contato dos pneus com revestimento



(fonte: Adaptada de Partl, 2004).

Segundo MARCELINO (2013), o ensaio de *Leutner* não sofreu modificações significativas que descaracterizassem seu princípio, porém algumas sugestões foram apontadas para que fossem feitas alterações pontuais referentes ao procedimento e equipamentos utilizados inicialmente. Nesse contexto, em 2005 ganha destaque o ensaio que ficou conhecido como ensaio de *Leutner* modificado, cujo propósito era sanar alguns problemas relativos ao esmagamento das partículas de agregados na zona de interface das camadas devido à dificuldade em se alinhar o anel de movimentação vertical com a interface do corpo de prova. Além disso, há certa dificuldade de realizar ensaios com pavimentos cujas camadas interligadas apresentam uma espessura delgada. Diante dessa situação, implementou-se no ensaio de *Leutner* modificado um espaçamento de 5 mm na zona de interface, prevendo a utilização de um equipamento metálico acessório especial nos casos em que a espessura das camadas do corpo de prova são diminutas. Estudos conduzidos por RAAB (2009), concluem que o espaçamento introduzido no arranjo do ensaio de *Leutner* modificado não trazem mudanças significativas nos resultados do teste. Esse novo arranjo é exibido na figura 21, a seguir:

Figura 21: Arranjo do ensaio de *Leutner* modificado



(fonte: Sutanto, 2009)

Seguindo recomendações propostas pelo *Manual of Contract for Highway Roads* (2008), os resultados são registrados através de um gráfico em que o deslocamento é expresso na abscissa e a força aplicada é representada na ordenada. As unidades de deslocamento e força devem estar ajustadas na precisão de 0,1 mm e 0,1 kN respectivamente. O critério de parada para o ensaio é o alcance de um deslocamento da ordem de 7 mm.

Posto que o gráfico obtido através dos resultados do ensaio permite a leitura da força de corte máxima na interface das camadas e que as dimensões do corpo de prova são conhecidas, a equação a seguir permite que se calcule a tensão máxima de corte:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{F_{\text{máx}}}{1000 \times \frac{\pi D^2}{4}} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$\sigma_{\text{máx}}$ – Tensão máxima de corte [MPa];

F máx – Força máxima de corte [kN];

D – Diâmetro do corpo de prova [m].

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

4.1.1 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado na preparação da mistura foi o CAP 50/70, proveniente da Empresa de Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste – LUBNOR, uma refinaria de petróleo da Petrobrás, localizada no estado do Ceará.

4.1.2 Agregados graúdos

Os agregados graúdos utilizados na composição das misturas asfálticas estudadas nessa pesquisa foram elementos britados de origem granítica de uso muito comum na região, sendo estes: brita 19 mm e brita 12,5 mm.

4.1.3 Agregados miúdos

Nesse estudo utilizou-se como agregado miúdo pó de pedra, também de origem granítica, além de areia retirada de leito de rio.

4.1.4 Fíler

O fíler utilizado na mistura asfáltica como material de enchimento dos vazios entre agregados graúdos foi a cal.

4.2 DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA UTILIZADA

A dosagem da mistura asfáltica utilizada seguiu o procedimento da metodologia *Superpave*, vale salientar que não foi feito o estudo da dosagem nesta pesquisa, portanto utilizou-se uma mistura asfáltica cuja dosagem foi preparada previamente em estudos anteriores desenvolvidos no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Os parâmetros relativos à proporção dos materiais utilizados na dosagem previamente estudada são exibidos na tabela 1, a seguir:

Tabela 1 – Proporção de materiais na preparação da mistura asfáltica

Materiais	Teor (%)	Peso (g)
Brita 19 mm	28,50	798,00
Brita 12,5 mm	21,85	611,80
Areia	14,25	399,00
Pó de pedra	28,50	798,00
Fíler	1,90	53,20
Ligante	5,00	140,00

(fonte: LEP, 2017)

A figura 22 mostra os agregados utilizados na preparação da mistura asfáltica separados em recipientes:

Figura 22: Agregados utilizados na preparação da mistura asfáltica



(fonte: Próprio autor, 2017).

4.3 PREPARAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA

Seguindo os parâmetros de proporção de materiais pré-estabelecidos pela dosagem Superpave, iniciou-se a preparação da mistura moldada em 6 corpos de prova com dimensões especificadas em 15 cm de altura e diâmetro de 10 cm. A preparação da quantidade de 6 corpos de prova foi planejada com o objetivo de se realizar dois ensaios de *Leutner* e dois ensaios *Flow Shear Number* totalizando assim a utilização de quatro corpos de prova, os outros dois restantes foram preparados com a finalidade de ficarem de reservas, caso houvesse algum eventual problema durante os ensaios com algum corpo de prova. A preparação da mistura seguiu os procedimentos conforme as figuras 23 a 28:

Figura 23: Sequência dos procedimentos na preparação dos corpos de prova

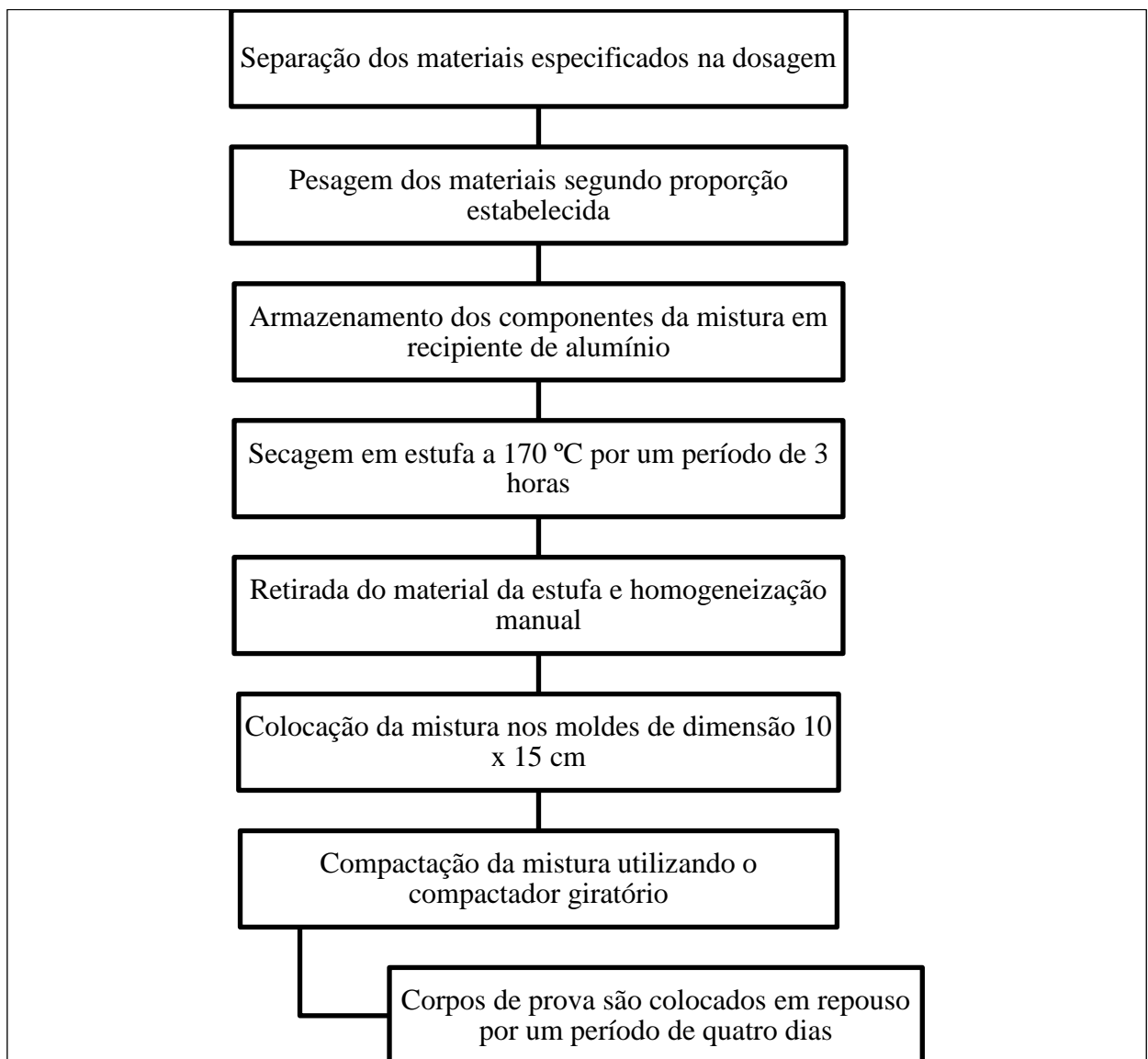


Figura 24: Secagem dos materiais em estufa



(fonte: Próprio autor, 2017).

Figura 25: Mistura após homogeneização



(fonte: Próprio autor, 2017).

Figura 26: Compactação do corpo de prova



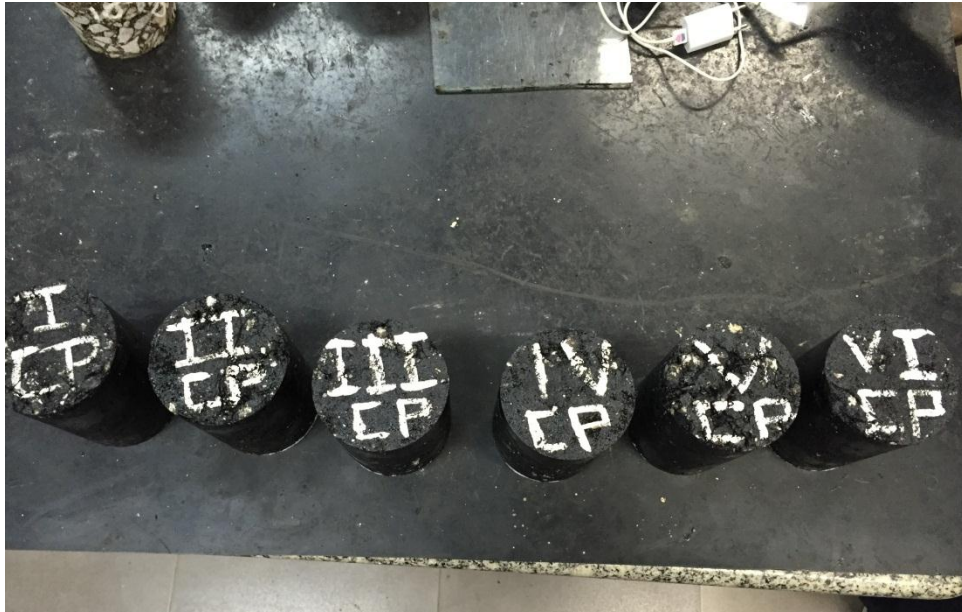
(fonte: Próprio autor, 2017).

Figura 27: Corpo de prova após compactação



(fonte: Próprio autor, 2017).

Figura 28: Identificação dos corpos de prova para período de repouso



(fonte: Próprio autor, 2017).

4.4 PROCEDIMENTO PARA O ENSAIO DE *LEUTNER*:

A nova metodologia utilizada através do ensaio de *Leutner*, desenvolvido no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), permite a avaliação da resistência ao cisalhamento de uma mistura asfáltica submetida a um carregamento estático e tem seus parâmetros baseados no ensaio desenvolvido por R. Leutner no final da década de 1970, assim como os parâmetros utilizados no teste, o equipamento utilizado também é bastante similar aos utilizados nos ensaios de *Leutner* e *Leutner* modificado.

O corpo do novo aparelho desenvolvido é dotado de um pórtico modular metálico de simples arranjo e fácil processo de montagem/desmontagem, o corpo de prova é preso ao dispositivo de modo que um carregamento estático de cisalhamento é aplicado diretamente na amostra formando um gráfico cujas informações relativas à deformação total (fornecida através do deslocamento vertical do pistão da prensa hidráulica UTM-25) encontram-se posicionadas no eixo horizontal, enquanto que os dados da força de carregamento aplicada sobre o corpo de prova durante o período do ensaio estão representados sobre o eixo vertical do gráfico.

Os parâmetros definidos para o ensaio são dados de entrada para um *software* que controla o equipamento produzido pela IPC *global*, a prensa hidráulica UTM-25, responsável pela intensidade de aplicação da carga, tensão atuante, velocidade de aplicação da carga, forma de carregamento, temperatura do ensaio e leituras de deformação total. No caso de carregamento dinâmico, são parâmetros a serem inseridos no *software*: frequência do

carregamento, intensidade da carga, temperatura de ensaio, tempo de carregamento e número de ciclos de aplicação da carga.

O passo a passo da execução do procedimento realizado é descrito a seguir:

- I. Medir as dimensões do corpo de prova três vezes e digitar as médias no *software*;
- II. Montagem do corpo de prova sob o dispositivo metálico;
- III. Posicionamento do equipamento no interior da prensa hidráulica UTM-25, e posicionamento do atuador alinhado com o local de aplicação da carga no equipamento;
- IV. Deixar a porta da prensa hidráulica aberta, condicionando-a a temperatura ambiente por volta dos 25°C;
- V. Selecionar o tipo de carregamento como estático e com velocidade de aplicação de 0,833 mm/s, resultando em 50 mm/min. Mesma velocidade de aplicação definida no ensaio de *Leutner*;
- VI. Definir no *software* o critério de parada para o ensaio, assim como no ensaio de *Leutner*, como sendo o alcance de uma deformação total de 7 mm;
- VII. Iniciar o ensaio, que deve durar poucos segundos;
- VIII. Com o ensaio finalizado, deve-se retirar o dispositivo metálico do interior da prensa e desmontá-lo para retirar o corpo de prova deformado. Em seguida efetua-se a limpeza do dispositivo metálico utilizando um pano umedecido;
- IX. Salvar os resultados obtidos para posterior análise.

Os resultados do ensaio são salvos no software em arquivo que pode ser lido em programas como Excel, LibreOffice ou similar. Os dados de saída fornecidos pelo *software* são: tempo (s), tensão desvio (Pa), Carga aplicada (kN), Deformação total (mm).

Como o interesse desse ensaio é determinar a máxima tensão de corte suportada pelo corpo de prova, o dado relevante, dentre todos aqueles que o *software* disponibiliza, é o da força máxima de corte alcançada pelo ensaio. Portanto elabora-se um gráfico no Excel contendo as leituras de deformação (mm) e carregamento (kN) ao longo do ensaio, para que se extraia dali a informação relativa à força máxima de corte. Para obter a tensão máxima de corte, visto que se conhece as dimensões do corpo de prova, basta aplicar a equação 1.

4.5 PROCEDIMENTO PARA O ENSAIO DE *FLOW SHEAR NUMBER*

No ensaio de *Flow Shear Number* é utilizado o Pórtico Modular desenvolvido no LEP e que submete a amostra e/ou corpos de prova ao cisalhamento simples e, a partir dos resultados, são determinados os parâmetros envolvidos e assimilados pelo *software*, destaca-se principalmente, o tipo de carregamento que é dinâmico.

Os parâmetros utilizados neste ensaio baseiam-se fortemente nos parâmetros do ensaio de *creep* dinâmico, a saber: frequência de carregamento de 1 Hz, tempo de carregamento de 0,1 segundo com 0,9 segundo de descanso, dimensões dos corpos de prova de 10 x 15 cm e o critério de parada do ensaio ao atingir 10 mil ciclos. Além disso, procura-se utilizar a mesma tensão aplicada no ensaio de *creep* dinâmico de 204 kPa, porém como o principal objetivo desta pesquisa é desenvolver equações que possibilitem encontrar o FN *Shear*, faz-se necessário, portanto, que a mistura atinja a deformação por fluência. Logo, nos casos em que a tensão aplicada de 204 kPa não é suficiente para atingir a fluência, deve-se dobrar a tensão aplicada para 408 kPa, se ainda assim a fluência não for atingida antes dos 10 mil ciclos, triplica-se a tensão inicial para 612 kPa.

Dentre os parâmetros que diferem do ensaio de *creep* dinâmico do *Flow Shear Number* destacam-se: É adotada neste ensaio a temperatura ambiente de aproximadamente 25°C, o tipo do carregamento é composto por cargas cíclicas de cisalhamento aplicadas diretamente no corpo de prova, o critério de parada é o alcance da deformação de 4 mm e as características da mistura, como por exemplo, o volume de vazios que foi de 4% neste ensaio. O procedimento para o ensaio é detalhado a seguir:

- I. Medir as dimensões do corpo de prova três vezes e digitar as médias no *software*;
- II. Montagem do corpo de prova sob o dispositivo metálico;
- III. Posicionamento do equipamento no interior da prensa hidráulica UTM-25, e posicionamento do atuador alinhado com o local de aplicação da carga no equipamento;
- IV. Deixar a porta da prensa hidráulica aberta, condicionando-a a temperatura ambiente por volta dos 25°C;
- V. Selecionar o tipo de carregamento como dinâmico e com intensidade de 1,6 kN; 3,2 kN ou 4,8 kN a depender das características da mistura;
- VI. Definir no *software* o critério de parada para o ensaio o alcance de 10 mil ciclos ou ao atingir uma deformação de 4mm;
- VII. Definir frequência do carregamento de 1 Hz com tempo de carregamento de 0,1 segundo com períodos de 0,9 segundo de descanso
- VIII. Iniciar o ensaio, que pode durar até aproximadamente 2 horas e 45 minutos.
- IX. Com o ensaio finalizado, deve-se retirar o dispositivo metálico do interior da prensa e desmontá-lo para retirar o corpo de prova deformado. Em seguida efetua-se a limpeza do dispositivo metálico utilizando um pano;
- X. Salvar os resultados obtidos para posterior análise.

Os dados obtidos no ensaio de *Flow Shear Number*, assim como no ensaio de *Leutner*, são salvos pelo *software* em formato compatível com o Excel, LibreOffice e similares. Deste modo, pode-se extrair do ensaio os seguintes resultados: Número de ciclos de aplicação da carga, Tensão desvio (Pa), Tensão de contato (Pa), Carga máxima (kN), Carga desvio (kN), Carga de contato (kN), Deformação relativa (%) e Deformação total (mm).

4.5.1 Determinação do *Flow Shear Number*

No ensaio de *creep* dinâmico o *software* revela explicitamente *Flow Number*, ou seja, o número do ciclo correspondente à mudança da região secundária para região terciária da curva Deformação versus Número de ciclos, ou ainda, o ponto correspondente ao número de ciclo onde a taxa de deformação é mínima. Ao contrário do que ocorre no ensaio de *creep* dinâmico, o *software* utilizado no ensaio de *Flow Shear Number* não revela de forma explícita o ponto da taxa de deformação mínima, onde há mudança na inclinação da curva Deformação versus Número de ciclos, deste modo, elaborou-se um método de obter esse ponto da curva a partir da revisão bibliográfica e discussão com especialistas.

Conforme relatos de BONAQUIST (2012), o FN pode ser determinado através da derivada segunda da equação da curva que melhor se encaixe aos pontos obtidos para deformação permanente e número de ciclos do ensaio de *creep* dinâmico. Logo, aplicando o mesmo princípio pode-se chegar ao *FN_{shear}*.

Para a elaboração da equação que melhor represente a curva do gráfico da Deformação versus Número de ciclos, o método escolhido foi o de ajuste de curvas. O ajuste de curva consiste em encontrar através de uma linha de tendência, a curva que melhor se encaixe a uma série de pontos conhecidos. Para tal procedimento, utilizou-se o programa Excel, desenvolvido pela *Microsoft*. Considerou-se como melhor ajuste aquele cujo coeficiente de determinação (R^2), percentual da variância da variável dependente que é explicada pelas variáveis independentes, fosse mais próximo de um.

Com a finalidade de comprovar a eficácia do método utilizado para a obtenção do *FN_{shear}*, recolheu-se dados de ensaios de *creep* dinâmico realizados pelo mestrando do Laboratório de Engenharia de Pavimentos, Mauro Henrique Alves Nascimento. Conforme já discutido, o ensaio de *creep* dinâmico revela de forma explícita o valor do FN, deste modo, utilizando o método do ajuste de curvas proposto, calculou-se o valor do FN e comparou-se com aquele FN exibido pelo *software*.

O procedimento para obtenção do cálculo do *FN_{shear}* é resumido a seguir:

- I. A partir das informações obtidas no resultado do ensaio de *Flow Shear Number*, deve-se selecionar e separar em uma planilha Excel os dados referentes ao número de ciclos e deformação (mm) correspondente;
- II. Elaborar um gráfico da Deformação versus Número de ciclos e selecionar a linha de tendência (exponencial, logarítmica, polinomial...) que melhor se adapte aos pontos resultantes do ensaio (aquela com maior coeficiente de determinação);
- III. Exibir a equação do gráfico obtido a partir da linha de tendência selecionada;
- IV. Calcula-se a derivada segunda da equação que melhor descreve a curva ajustada e então se obtém as raízes dessa expressão;
- V. A maior raiz real obtida será o *FN_{shear}*, deve-se observar visualmente a raiz que representa o número de ciclo em que ocorre mudança da zona secundária para zona terciária da curva.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 MEDIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

As tabelas de 2 a 7 apresentadas a seguir apresentam as três medições realizadas com paquímetro para as dimensões de cada corpo de prova e suas respectivas médias.

Tabela 2: Medição das dimensões do CP 01

CP 01	Diâmetro (cm)	Altura (cm)
Medição 01	9,99	14,94
Medição 02	9,98	14,92
Medição 03	9,99	14,92
Média	9,99	14,93

(fonte: Próprio autor, 2017).

Tabela 3: Medição das dimensões do CP 02

CP 01	Diâmetro (cm)	Altura (cm)
Medição 01	9,92	14,80
Medição 02	9,94	14,82
Medição 03	9,93	14,85
Média	9,93	14,82

(fonte: Próprio autor, 2017).

Tabela 4: Medição das dimensões do CP 03

CP 01	Diâmetro (cm)	Altura (cm)
Medição 01	9,99	14,87
Medição 02	9,94	14,89
Medição 03	9,98	14,88
Média	9,97	14,88

(fonte: Próprio autor, 2017).

Tabela 5: Medição das dimensões do CP 04:

CP 01	Diâmetro (cm)	Altura (cm)
Medição 01	9,99	14,90
Medição 02	9,97	14,91
Medição 03	9,99	14,91
Média	9,98	14,91

(fonte: Próprio autor, 2017).

Tabela 6: Medição das dimensões do CP 05:

CP 01	Diâmetro (cm)	Altura (cm)
Medição 01	9,99	14,98
Medição 02	9,99	14,99
Medição 03	9,98	14,99
Média	9,99	14,99

(fonte: Próprio autor, 2017).

Tabela 7: Medição das dimensões do CP 06:

CP 01	Diâmetro (cm)	Altura (cm)
Medição 01	9,99	14,91
Medição 02	9,98	14,92
Medição 03	9,99	14,90
Média	9,99	14,91

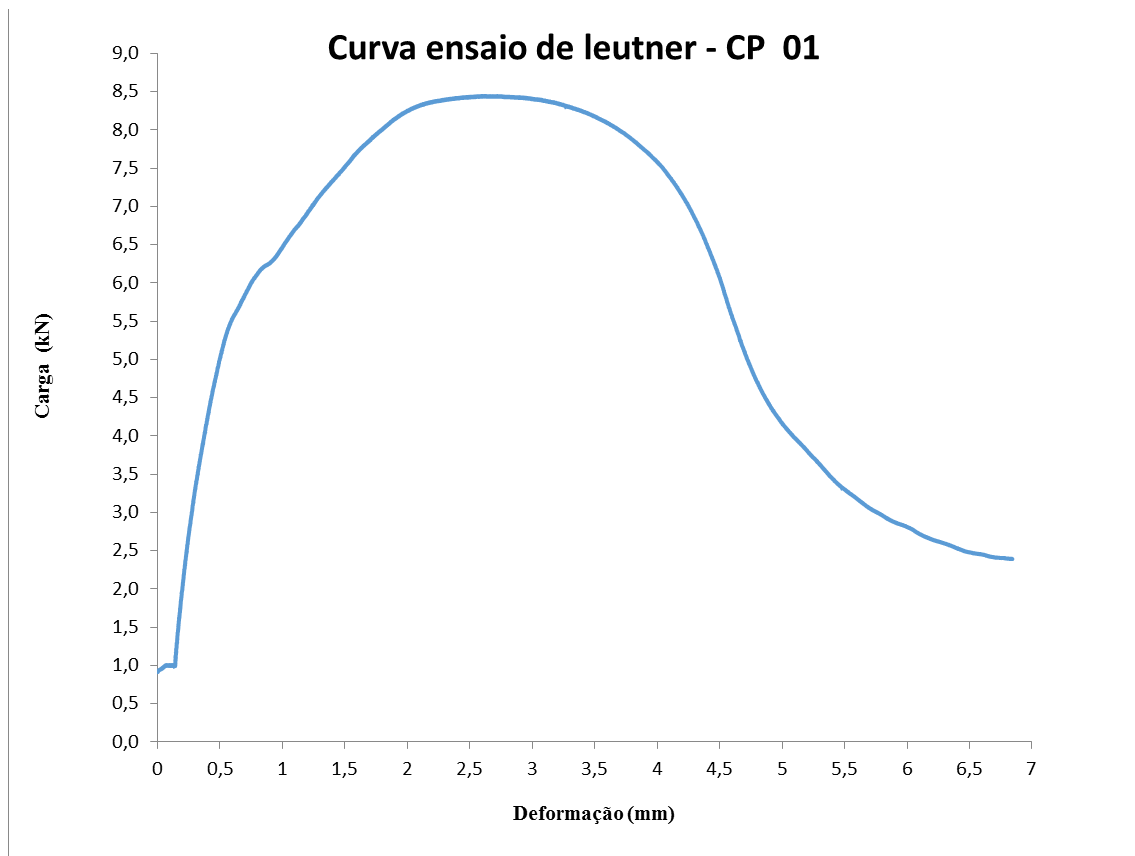
(fonte: Próprio autor, 2017).

5.2 ENSAIO DE LEUTNER

Os corpos de prova 01 e 04 foram submetidos ao ensaio de *Leutner* com aplicação de carregamento estático conforme procedimento descrito no tópico 4.4 deste trabalho. Os resultados obtidos são mostrados nas figuras 29 e 30 a seguir:

5.2.1 Ensaio de *Leutner* para o corpo de prova 01

Figura 29: Curva Carga (kN) x Deformação (mm) para o ensaio de *Leutner* – CP 01



(fonte: Próprio autor, 2017).

A carga aplicada durante o ensaio é um dado de saída do *software* utilizado no ensaio. Deste modo, utilizando o programa Excel, busca-se dentro do conjunto de pontos obtidos, aquele que possui a maior força de corte, assim:

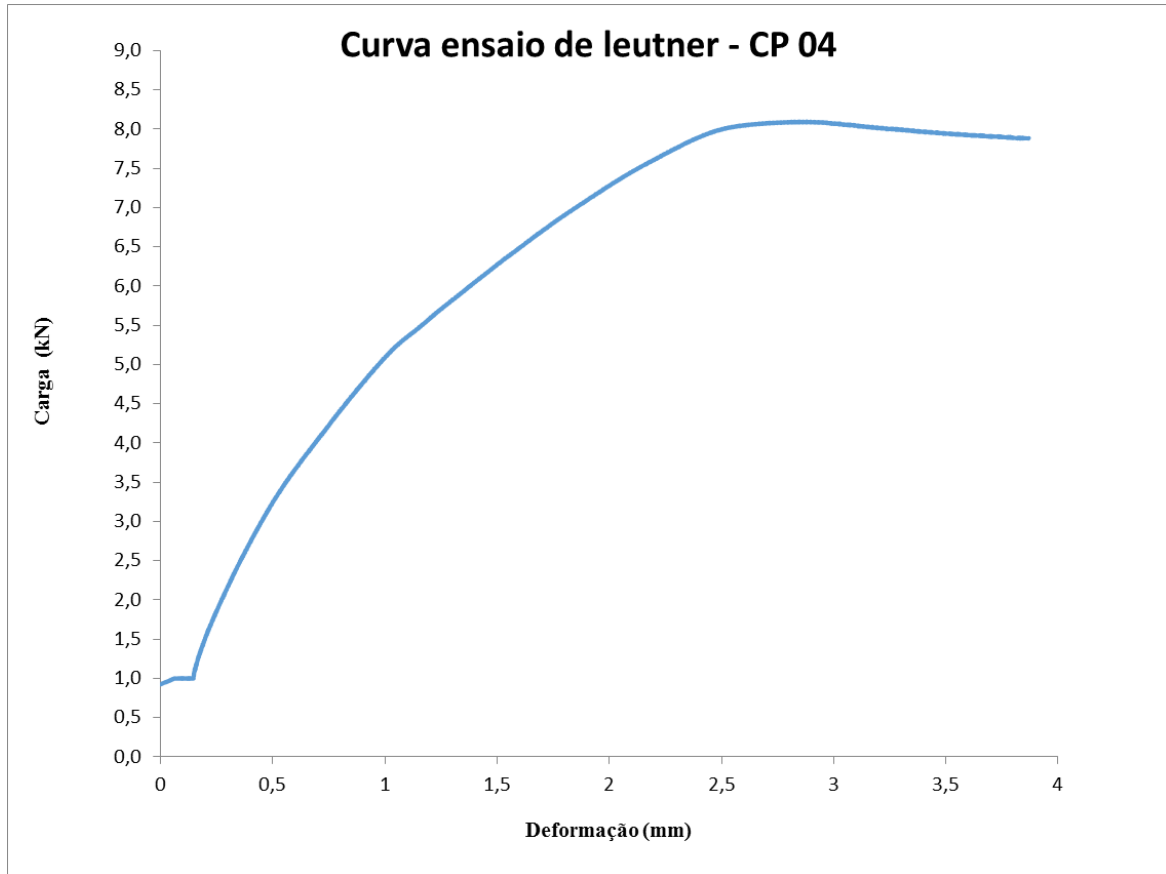
$$F_{\text{máx}} = 8,45 \text{ kN}$$

Utilizando a equação 1 e conhecendo-se as dimensões do corpo de prova, obtém-se a tensão máxima de corte para a mistura asfáltica do CP 01:

$$\sigma_{\text{máx}} = 1,08 \text{ MPa}$$

5.2.2 Ensaio de *Leutner* para o corpo de prova 04

Figura 30: Curva Carga (kN) x Deformação (mm) para o ensaio de *Leutner* – CP 04



(fonte: Próprio autor, 2017).

Conforme apontado no item VI do tópico 4.4, que descreve o procedimento para o ensaio de *Leutner*, o critério de parada do ensaio é quando a deformação atingir 7 mm. Para o CP 04, possivelmente devido a algum problema relativo aos dados de entrada apontados no *software*, o ensaio foi interrompido quando o corpo de prova atingiu 4 mm de deformação. No entanto, ao analisar o gráfico da figura 30, nota-se que a carga começa a diminuir gradativamente ao atingir um pico de 8,10 kN quando a deformação é por volta dos 2,8 mm. Desse modo, como a informação relevante do ensaio de *Leutner* é a força máxima de corte, para que se possa calcular a tensão máxima de corte, considerou-se que a finalização do ensaio aos 4 mm de deformação não causou nenhum prejuízo nos resultados que se desejava obter, já que a força máxima de corte de 8,10 kN já havia sido alcançada. Sendo assim:

$$F_{\text{máx}} = 8,10 \text{ kN}$$

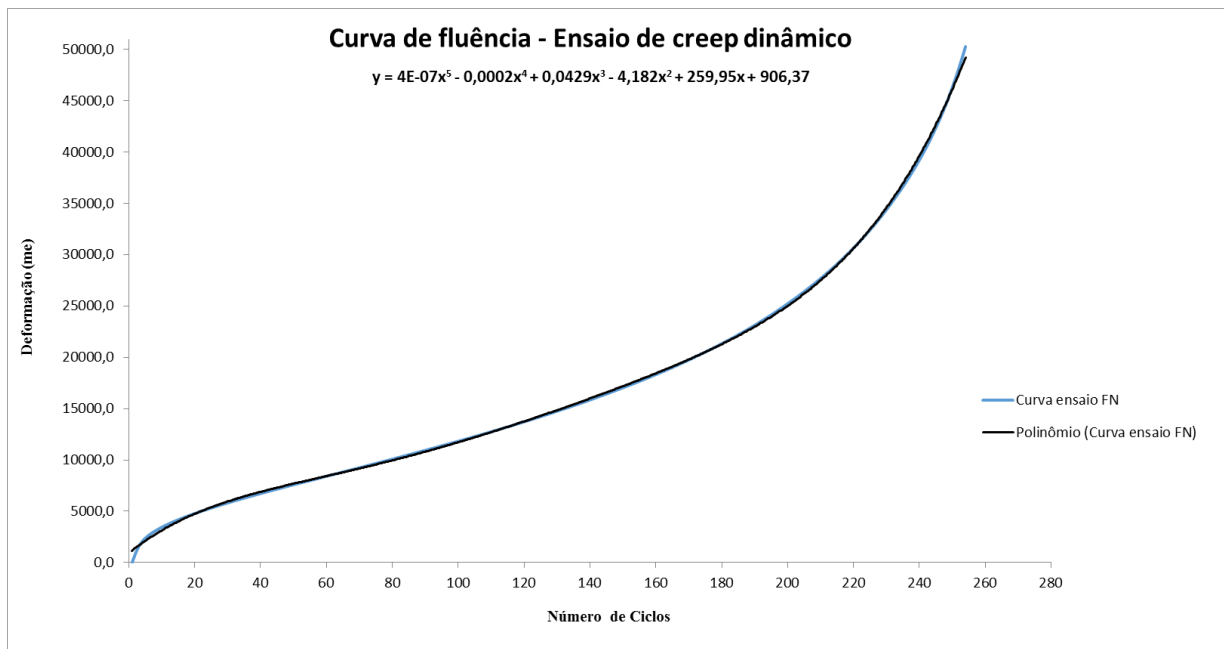
Utilizando a equação 1 e conhecendo-se as dimensões do corpo de prova, obtém-se a tensão máxima de corte para a mistura asfáltica do CP 04:

$$\sigma \text{ máx} = 1,03 \text{ MPa}$$

5.3 FLOW NUMBER CALCULADO DO ENSAIO DE CREEP DINÂMICO

O resultado do ajuste de curva obtido através dos pontos calculados de deformação em *micro strain versus* número de ciclos é exibido no gráfico da figura 31.

Figura 31: Curva de fluência para o ensaio de creep dinâmico



(fonte: próprio autor, 2017).

O valor retornado para R^2 foi de 0,9997. Esse resultado demonstra uma excelente representatividade da curva obtida em relação aos pontos do ensaio.

A equação polinomial de quinto grau que representa a curva de fluência para o ensaio de *creep* dinâmico realizado pelo mestrando Mauro Henrique Alves Nascimento em sua pesquisa foi:

$$y = 3,52 \times 10^{-7} X^5 - 0,0002X^4 + 0,043X^3 - 4,18X^2 + 259,95X + 906,37 \quad (\text{Equação 2})$$

Dessa forma, calculando-se a derivada segunda da equação 2, obtém se:

$$y'' = 7 \times 10^{-6} X^3 - 0,002X^2 + 0,2574X^1 - 8,36 \quad (\text{Equação 3})$$

Calculando as raízes da equação 3 para a obtenção do *Flow Number*, encontram-se os seguintes resultados:

$$x_1 = 58,90$$

$$x_2 = 138,93 - 28,82i$$

$$x_3 = 138,93 + 28,82i$$

Considerando que o *Flow Number* é a maior raiz real da derivada segunda da curva que melhor se encaixa aos pontos obtidos no ensaio de *creep* dinâmico, então:

$$FN = 58,90$$

O valor de FN obtido pelo mestrando Mauro Henrique Alves Nascimento por meio do *software* do ensaio de *creep* dinâmico foi de 56.

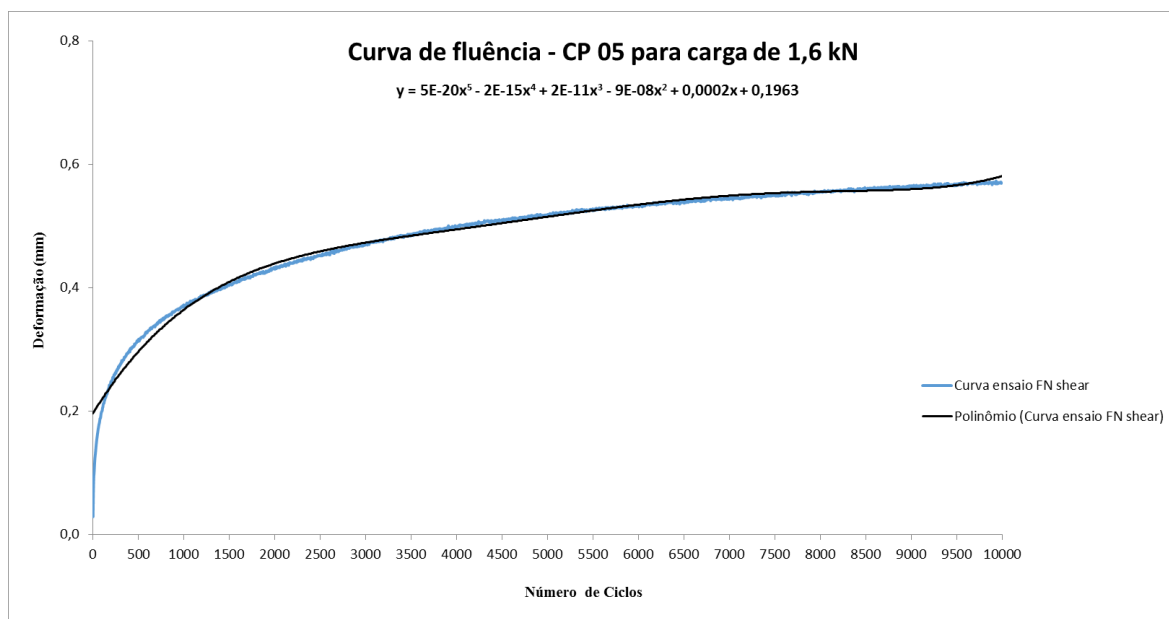
Comparando-se o FN calculado com o obtido explicitamente através do programa de computador utilizado nesse ensaio, tem-se uma diferença de aproximadamente 5%.

5.4 ENSAIO DE *FLOW SHEAR NUMBER*

Os corpos de prova 05 e 06 foram submetidos ao ensaio de *Flow Shear Number* com aplicação de carregamento dinâmico conforme procedimento descrito no tópico 4.5 deste trabalho, com os dados de saída do *software* e obtenção da curva Deformação versus Número de ciclos de aplicação de carga, foi possível calcular o valor do FN_{shear} segundo procedimento descrito no tópico 4.5.1. Os resultados obtidos são mostrados nas figuras 32 a 34 a seguir:

5.4.1 Ensaio de *Flow Shear Number* para CP 05 com carregamento cíclico de 1,6 kN

Figura 32: Curva de fluência do CP 05 para carregamento repetido de 1,6 kN



(fonte: Próprio autor, 2017).

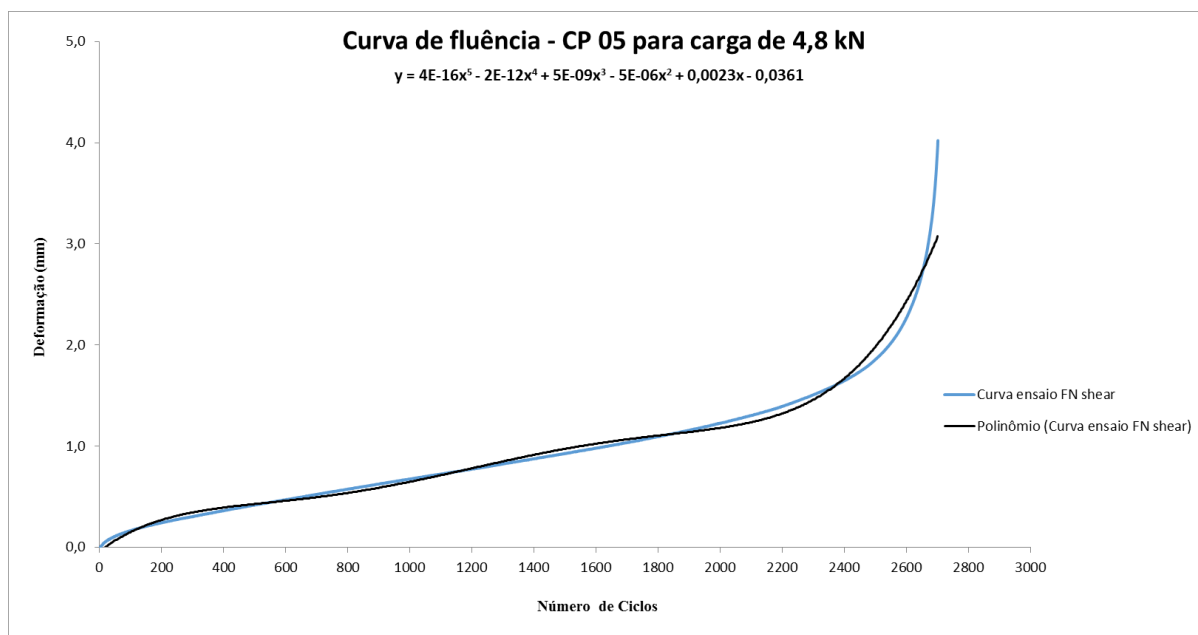
Ao final dos 10 mil ciclos, um dos critérios de parada do ensaio conforme item VI do procedimento apresentado no tópico 4.5, a deformação atingida foi muito inferior a 4 mm (outro critério de interrupção do ensaio). A deformação alcançada ao final do ensaio foi muito pequena (0,6 mm), provavelmente em decorrência da mistura dosada ser mais densa e a temperatura de ensaio ser menor do que o padrão de ensaio de *creep* dinâmico.

Assim, o carregamento aplicado inicialmente foi insuficiente para que se alcançassem os três estágios da curva de Deformação *versus* Número de ciclos. Ao discutir o resultado obtido com alguns estudantes de mestrado do LEP, decidiu-se utilizar novamente o CP 05 com a aplicação de um carregamento três vezes maior, visto que a deformação sofrida por este durante a aplicação da carga de 1,6 kN foi considerada muito pequena.

5.4.2 Ensaio de *Flow Shear Number* para CP 05 com carregamento cíclico de 4,8 kN

Reposicionou-se então o CP 05 no dispositivo metálico, de modo que o novo carregamento repetido de 4,8 kN fosse aplicado em uma região distinta do primeiro carregamento, acreditando-se assim, eliminar qualquer influência da pequena deformação sofrida durante a aplicação da carga de 1,6 kN no corpo de prova. A curva de fluência para o CP 05 submetido às novas condições de carregamento é exposta na figura 33:

Figura 33: Curva de fluência do CP 05 para carregamento repetido de 4,8 kN



(fonte: Próprio autor, 2017).

O valor resultante para R^2 foi de 0,9848. Este resultado demonstra uma boa aproximação dos pontos do ensaio por meio de uma linha de tendência formada por uma curva polinomial de quinto grau. A equação 4 demonstra a expressão alcançada para a curva da figura 33, enquanto que a equação 5 revela a derivada segunda da equação 4:

$$y = 4x10^{-16}X^5 - 2,4x10^{-12}X^4 + 5x10^{-9}X^3 - 5x10^{-6}X^2 + 0,0023X + 0,0361 \quad (\text{Equação 4})$$

$$y'' = 8x10^{-15}X^3 - 2,88x10^{-11}X^2 + 3x10^{-8}X - 9,54x10^{-6} \quad (\text{Equação 5})$$

Calculando-se as raízes da equação 5 para a obtenção do *Flow Shear Number*, encontram-se os seguintes resultados:

$$x_1 = 537,37$$

$$x_2 = 1196,99$$

$$x_3 = 1834,77$$

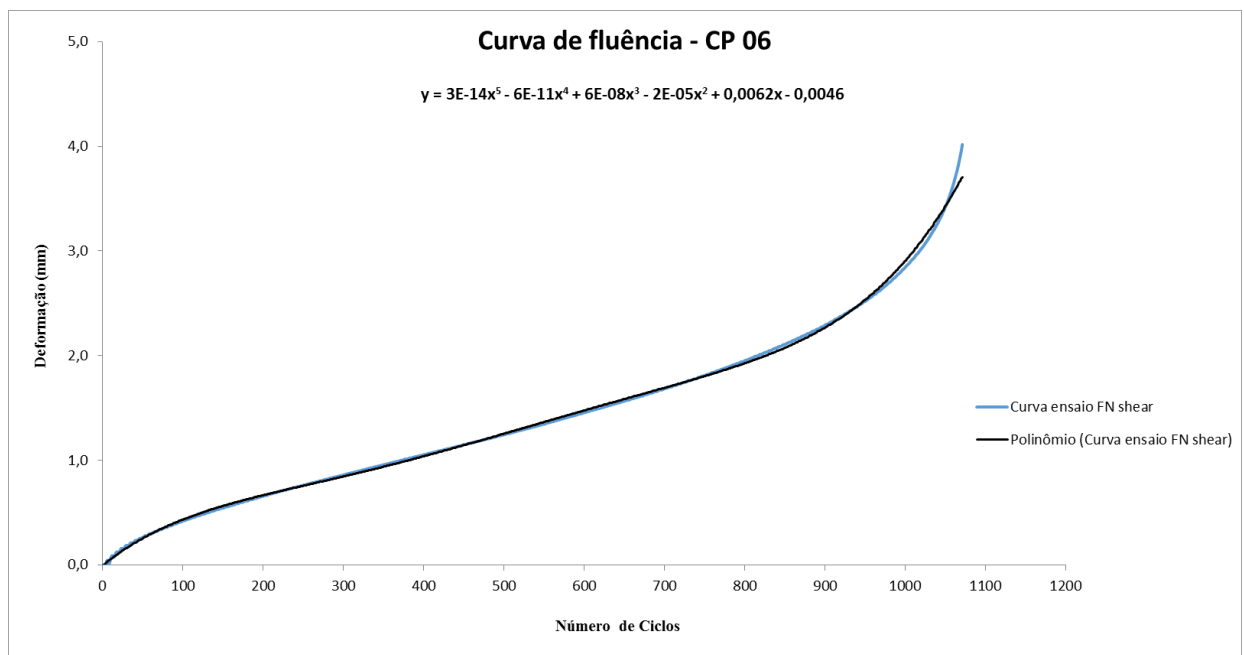
Considerando que o *FN_{shear}* é o ponto no eixo das abscissas onde ocorre a última mudança de inclinação da curva Deformação versus Número de ciclos, encontra-se o seguinte valor:

$$FN_{shear} = 1834,77$$

5.4.3 Ensaio de *Flow Shear Number* para CP 06 com carregamento cíclico de 4,8 kN

Como o carregamento aplicado de 1,6 kN para o CP 05 não foi adequado para gerar deformação suficiente que evidenciasse as três zonas de deformação da curva, enquanto que o carregamento de 4,8 kN foi capaz de fornecer deformação necessária para que os três estágios da curva fossem explícitos; então, para o CP 06 adotou-se de imediato cargas repetidas de 4,8 kN. A curva de fluência para o CP 06 é apresentada na figura 34:

Figura 34: Curva de fluência do CP 06 para carregamento repetido de 4,8 kN



(fonte: Próprio autor, 2017).

O coeficiente de determinação (R^2) da curva ajustada em uma linha de tendência polinomial de quinto grau foi de 0,9986. Quanto mais próximo de 1 estiver o coeficiente de determinação, melhor será o grau de explicação da variação da deformação em termos do número de ciclos de aplicação de carga. A equação 6 representa a curva expressa pela linha de tendência polinomial de quinto grau obtida para os pontos do ensaio:

$$y = 2,6x10^{-14}X^5 - 6,3x10^{-11}X^4 + 6x10^{-8}X^3 - 2,3x10^{-5}X^2 + 0,0062X + 0,0046 \quad (\text{Equação 6})$$

O resultado da derivada segunda equação 6, resulta na equação 7 representada abaixo:

$$y'' = 5,17x10^{-13}X^3 - 7,5x10^{-10}X^2 + 3,4x10^{-7}X - 4,7x10^{-5} \quad (\text{Equação 7})$$

Como as raízes da derivada segunda representam os pontos de inflexão de uma curva, obtém-se como FN_{shear} a maior raiz real da equação 7. As raízes calculadas para equação 7 são expostas a seguir:

$$x_1 = 257,10$$

$$x_2 = 527,44$$

$$x_3 = 669,84$$

Dessa forma, obtém-se o valor do FN_{shear} :

$$FN_{shear} = 669,84$$

6 CONCLUSÃO

As deformações permanentes são uma das principais falhas em pavimentos que levam a deterioração por muitas vezes precoce do revestimento asfáltico. Assim, é essencial o desenvolvimento de estudos que busquem eliminar a ocorrência desse tipo de defeito que afeta implacavelmente a funcionalidade das vias, principal meio de escoamento da produção de cargas e transporte de passageiros no Brasil. Os ensaios que permitem a avaliação de deformação permanente são diversos, sendo aqueles que aplicam carregamentos dinâmicos mais eficientes em relação à simulação das condições reais, a que o pavimento está submetido, durante ação do tráfego.

Posto que o ensaio de *creep* dinâmico aplique cargas cíclicas de forma axial, não levando em consideração os esforços de cisalhamento atuantes no pavimento durante a passagem do pneumático sobre o revestimento, em especial envolvendo situações de frenagem e aceleração, situação que potencializa a atuação dos esforços de corte. E sabendo que o ensaio de *Leutner*, parâmetro de avaliação de resistência ao cisalhamento entre camadas de revestimento asfáltico, utiliza o carregamento estático em seu procedimento; é extremamente oportuna a elaboração de um ensaio que permita avaliar o comportamento de misturas asfálticas quando submetidas a cargas de cisalhamento cíclicas, combinando assim aspectos dos ensaios de *Leutner* e *creep* dinâmico. Por consequência, o ensaio de *Flow Shear Number*, apresentado neste trabalho, se mostra como uma excelente e promissora alternativa de preenchimento para essa lacuna existente nos ensaios de avaliação de deformação permanente.

É possível inferir ainda:

- Os resultados encontrados para tensão máxima de corte, avaliados pelo ensaio de *Leutner* com a utilização do Pórtico Modular desenvolvido pelo LEP, demonstram coerência e compatibilidade com o ensaio de *Leutner* tradicional;
- O novo aparelho desenvolvido pelo Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG demonstra grande utilidade para comunidade científica ao reunir características como economia de materiais em sua fabricação, simples operação com facilidade de montagem e desmontagem, além de servir a diferentes ensaios;
- O método do ajuste de curvas, como forma de calcular o ponto de fluência, demonstrou ser eficaz nessa pesquisa, pois quando comparado no ensaio de *creep* dinâmico realizado pelo mestrando Mauro Nascimento, o FN calculado pelo *software* (56) e o FN calculado pelo método do ajuste de curvas (58,9) foi aproximadamente o mesmo, com uma diferença de aproximadamente 5% apenas;
- Nesta pesquisa, a linha de tendência cuja curva ajustada demonstrou maior alinhamento com os pontos obtidos nos ensaios de *creep* e *Flow Number Shear* foi a polinomial de quinto grau, com coeficientes de determinação variando de 0,9848 a 0,9997. Este intervalo demonstra uma excelente representação dos pontos obtidos pela equação da linha de tendência em relação aos pontos reais obtidos nos ensaios;

- Para efeitos de comparação da resistência ao cisalhamento de misturas asfálticas, é necessário aprofundamento no estudo do ensaio de Flow Shear Number através da realização de mais ensaios variando os mais diversos parâmetros envolvidos, como por exemplo: temperatura de ensaio, características da mistura asfáltica, intensidade e frequência do carregamento. Assim, depois de construir um banco de dados envolvendo o ensaio sob as mais diversas condições, será possível estabelecer critérios com maior precisão para os parâmetros citados.

Conclui-se por fim, que os objetivos inicialmente propostos para esta pesquisa foram devidamente alcançados.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALDIGUERI, D.R. (2001) Estudo de Misturas de Areia Asfalto Usinadas a Quente com Asfaltos de Diferentes Consistências para Revestimento de Pavimentos no Estado do Ceará, São Paulo.
- ARAÚJO, M. A.; et. al. Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto). Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento, ANO 1. VOL. 10, Pp. 187-196. Novembro de 2016 – ISSN.2448-0959
- BELIGNI, M.; VILLIBOR, D. F.; CINCERRE, J. R. 2000, “Mistura Asfáltica do Tipo SMA (Stone Mastic Asphalt): Solução para Revestimentos de Pavimentos de Rodovias e Vias Urbanas de Tráfego Intenso”. In: Anais da Reunião Anual de Pavimentação – 32º RAPv, v. 01, pp. 590-605, Brasília, Distrito Federal, Brasil, 16-20 Outubro.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; J. A.; CERATTI, SOARES, J. B. Pavimentação Asfáltica – Formação Básica Para Engenheiros. Rio de Janeiro, RJ. 2007.
- BONAQUIST, R. 2012. *Evaluation of Flow Number (Fn) as a discriminating HMA mixture property*. Wisdot: Wisconsin Highway Research Program. Madison, WI, EUA.
- BONET, I. I. Dissertação de mestrado: Valorização dos Resíduos de Areia de Fundação (RAF). Incorporação nas massas asfálticas do tipo C.B.U.Q. Florianópolis, SC. 2002.
- BORGES, R. L. Dissertação de mestrado: Deformação Permanente em Misturas Asfálticas a Partir do Shift Model Viscoplastico e Ensaios Triaxiais de Carga Repetida. Fortaleza, CE. 2014.
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO, J. R. F. 2013. Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado. São Carlos: EdUFSCar, 367 p.
- CHEN, J.; HUANG, C. 2010. Effects of Surface Characteristics on Bonding Properties of Bituminous Track Coat. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2180, pp 142-149, 2010. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- DONGRE, R.; D’ANGELO. J.; COPELAND, A., 2010. *Refinement of Flow Number as Determined by the Asphalt Mixture Performance Tester for Use in Routine QC/QA Practice*. In: Transportation Research Board, Annual Meeting, Washington, DC. DOI: 10.3141/2127-15.
- GRECO, J. A. S., 2004. *Avaliação da influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfáltica densas, à luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo – EESC, São Paulo, SP, BRASIL.

GUIMARÃES, P. A. Estudo da Aderência Entre Camadas Asfálticas de Pavimentos. 2013. 189 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

HUBER, G. *History of asphalt mix design in North America*. Asphalt Institute.2003. disponível na internet em 06/05/2017: <http://asphaltmagazine.com/history-of-asphalt-mix-design-in-north-america-part-1>

MANUAL OF CONTRACT DOCUMENTS FOR HIGHWAY WORKS, MCHW, 2008. Method for laboratory determination of interface properties using the modified Leutner shear test. Volume 1, series 900 – Road Pavements-Bituminous bond materials.

MARCELINO, P., FREIRE, A. C., COSTA, P. (2013). Avaliação da interface entre camadas ligadas com aplicação de grelhas de reforço de pavimentos pelo método de Leutner modificado. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

MOHAMMAD, L. N.; RAQIB, M.A.; HUANG, B. 2010. *Influence of Asphalt Track Coat Materials on Interface Shear Strength*. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No 1789 pp 55-65. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D. C.

MUGAYAR, A.N. 2004. Avaliação dos efeitos dos tipos de asfalto e da distribuição granulométrica dos agregados nas fluências estática e dinâmica de misturas asfálticas densas. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

NASCIMENTO, L. A. H. (2008). Nova abordagem na dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), 204p. Rio de Janeiro, RJ.

NG, A. K. Y. 2013. Dissertação de mestrado: Contribuição ao estudo da deformação permanente de misturas asfálticas densas à luz de ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica. São Carlos, SP.

OLIVEIRA, C. G. M. 2013. Dissertação de mestrado: Estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto asfáltico drenante. Brasília, DF.

ONOFRE, F. C., 2012. Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados por ácido polifosfórico e aditivos poliméricos, enfatizando a resistência à deformação permanente. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, CE, BRASIL.

PEREIRA, P.; MIRANDA, V. (1999a). "Gestão da Conservação de Pavimentos - Os métodos e programas de apoio à gestão dos pavimentos da rede rodoviária nacional". Centro Rodoviário Português (C.R.P). Lisboa

PARTL, M., RAAB, C. (2004). *Shear adhesion between top layers of fresh asphalt pavements in Switzerland*. Proceedings of 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa.

RAAB, C., 2009. *Influence of the gap width between the shearing rings on interlayer shear bond testing*. In: II International Conference Environmentally Friendly Road – ENVIROAD. Warsaw, POLAND.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, R.E.; LEE, D.; KENNEDY, T.W.(1996) *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. NAPA. Maryland, USA.
Scherer, R. G. “Estudo do efeito da aderência entre camadas de pavimentos asfálticos”. Santa Maria, RS. 2015.

SALOMON, D. R. *Asphalt Emulsion Technology*. Transportation Research Circular E-C102. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D. C., 2006. 49p.

SOARES, J. S., 2014. Investigação da relação entre parâmetros da compactação giratória e de deformação permanente em misturas asfálticas densas. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo – EESC, São Carlos, SP, BRASIL.

SUTANTO, M. H. (2009). *Assessment of bond between asphalt layers*. Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy, Nottingham.

VASCONCELOS, K. L. Dissertação de mestrado: Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias. Fortaleza, CE. 2004.

YODER, E.J.; WITCZAK, M.W. (1975). *Principles of pavement design*. 2.ed., John Wiley & Sons. Inc. New York.

WITZACK, M. W., KANDHAL, K., PELLINEM, T., EI – BASYOUNY, M., VON QUINTUS, H., 2002, *Simple performance test for superpave mix design* – NCHRP Report 465, Washington, D.C., EUA.