

# **COMPORTAMENTO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS NO ENSAIO DE FADIGA**

Yader Guerrero Pérez<sup>1</sup>; Leto Momm<sup>2</sup>; Breno Salgado Barra<sup>3</sup>; Marcelo Heidemann<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Joinville, Santa Catarina, Brasil  
guerrero.y@ufsc.br, breno.barra@ufsc.br, leto.momm@gmail.com,  
Marcelo.heidemann@ufsc.br

## **RESUMO**

Um dos principais objetivos das misturas asfálticas mornas é o de conservar as propriedades que caracterizam o comportamento das misturas asfálticas convencionais, no entanto, sendo produzidas a uma temperatura mais baixa. Sendo assim, o objetivo principal deste trabalho é avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas com a utilização dos aditivos REDISSET, CECABASE e ZEÓLITAS. Para isto, a metodologia laboratorial escolhida é a regida segundo os princípios franceses de avaliação do comportamento mecânico (ensaio de fadiga) pela sua estreita relação campo/laboratório, a qual estabelece um diferencial com as outras metodologias de formulação. Nesta pesquisa, são analisados os resultados obtidos nos ensaios de fadiga para cada uma das misturas asfálticas mornas (com o uso dos aditivos mencionados) comparativamente com uma mistura asfáltica convencional (CAP 50/70 puro). Os esqueletos minerais que compõem as misturas asfálticas analisadas são de natureza granítica e cuja curva granulométrica foi calculada de forma racional teórica, usando a equação de Talbot, sendo compostas pelos mesmos tamanhos de grãos. Os resultados obtidos nesta pesquisa mostram o grau de afetação no comportamento mecânico das misturas analisadas.

Palavras chave: misturas asfálticas mornas, comportamento mecânico, ensaio de fadiga

## **1 INTRODUÇÃO**

No dia a dia, os meios de comunicação estão apresentando as mudanças climáticas no mundo. O aquecimento global tornou-se uma preocupação dos governantes. O aumento dos gases poluentes nas indústrias, resultado da queima de combustíveis fósseis, admite estar diretamente relacionado ao fenômeno do aquecimento global. Estes gases são associados à formação do efeito estufa. Em diversas áreas da ciência e da tecnologia, muitos esforços estão sendo direcionados para diminuir as emissões de gás carbônico.

Na área de construção de pavimentos rodoviários, especificamente o concernente aos concretos asfálticos, a tecnologia comumente usada é a de produzir os Concretos Betuminosos Usinados a Quente (CBUQ) em temperaturas de usinagem e compactação elevadas. Com o intuito de preparar estas misturas em temperaturas mais baixas surgiram as misturas asfálticas mornas, semi-mornas e frias. No caso das misturas asfálticas mornas, existem os concretos asfálticos fabricados com alguma tecnologia diferencial de modo a alcançar a trabalhabilidade da mistura a menores temperaturas, o que acarreta uma redução do consumo de energia e,

consequentemente, numa redução das emissões de gases na atmosfera e em uma melhoria das condições laborais sem consequências técnicas adversas.

A redução das temperaturas de mistura e de compactação, além do benefício de reduzir as emissões de gases, favorece na redução de custos associados ao consumo energético de aquecimento na produção das misturas asfálticas. Nas misturas mornas, a quantidade de combustível necessário para a usinagem das misturas asfálticas é menor, porque a temperatura das misturas asfálticas mornas, também é menor, em comparação com as misturas asfálticas tradicionais. Consequentemente, existe um benefício ambiental e econômico.

As tecnologias dos asfaltos mornos podem ser utilizadas modificando tanto o ligante asfáltico como o processo de usinagem, mas todas as tecnologias buscam alcançar trabalhabilidade da mistura a temperaturas menores. Contudo, toda modificação introduzida na preparação das misturas asfálticas pode acarretar alteração no comportamento mecânico do material, e estes efeitos devem ser cuidadosamente estudados para avaliar a sua viabilidade técnica e econômica.

Ao longo dos anos, as rodovias têm sido a principal infraestrutura dos meios de transporte, tanto de cargas como de pessoas. O ritmo de crescimento da humanidade aumenta; as cargas e o número de veículos que transitam pelas estradas são cada vez maiores, exigindo que os pavimentos sejam cada vez mais resistentes, com padrões de conforto e segurança elevados. Com a demanda de transporte cada vez mais exigente, a boa qualidade nos materiais constitutivos da estrutura do pavimento se impõe. O estudo detalhado de cada modificação na tecnologia de preparação das misturas asfálticas é sumamente relevante, em razão do efeito econômico e técnico que podem acarretar. Qualquer modificação inserida quer no processo de fabricação ou nos materiais constitutivos do produto, pode acarretar alteração no comportamento mecânico e reológico da mistura asfáltica. É por isto que este estudo realiza uma análise detalhada dos efeitos das modificações para a variação do comportamento reológico das misturas asfálticas mornas nos parâmetros de preparação das misturas.

Neste estudo das misturas asfálticas mornas utiliza-se o primeiro protótipo brasileiro da máquina de fadiga e de módulo complexo (FADECOM) construído no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), capaz de realizar os ensaios em conformidade com as normas francesas (AFNOR), cujo desenvolvimento encontra-se em sua terceira versão.

## **2 OBJETIVOS**

Avaliar o comportamento na fadiga das misturas asfálticas estudadas (mornas e convencionais).

Utilizar a metodologia francesa de dimensionamento desenvolvida, conjuntamente, pelo Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), e pelo antigo Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) atual IFISTSTAR [10] para verificar os efeitos das modificações de fabricação das misturas asfálticas mornas no dimensionamento da estrutura de pavimento (simulação).

## **3 JUSTIFICATIVA**

A preservação do meio ambiente tornou-se preocupação de toda a sociedade mundial. A consciência ecológica e de preservação é ampla. A preocupação principal da sociedade são os efeitos causados pelo aquecimento global devido à acumulação de gases na atmosfera. Os 4 gases gerados pelas diferentes indústrias durante a produção de diversos produtos formam uma parte do problema. Estes gases, além de contribuir com o aquecimento global, são a causa da diminuição da qualidade do ar. Como medidas preventivas, em diferentes áreas estão sendo desenvolvidas

regulamentações orientadas à preservação do meio ambiente. A produção dos pavimentos em concreto asfáltico não deixa de ter sua contribuição na poluição do ar. A tecnologia de misturas asfálticas mornas se apresenta como uma das soluções para o setor da indústria da pavimentação. Ela pode apresentar diversas vantagens tanto ecológicas, quanto econômicas, e até técnicas. Além da redução nas emissões de gases, por trabalhar com menores temperaturas, se obtém uma vantagem econômica da redução da energia consumida e melhoria da trabalhabilidade na mistura a temperaturas mais baixas. A chegada de uma nova tecnologia a partir de modificações de processos produtivos exige a avaliação de suas consequências técnicas deste tipo de procedimentos. É necessário conhecer os efeitos causados pelos aditivos sobre o comportamento nos parâmetros definidores a estrutura dos pavimentos e de sua durabilidade (os efeitos sobre a vida útil da mistura). No mercado das misturas asfálticas, frequentemente, surgem novas tecnologias relacionadas a misturas asfálticas produzidas a menores temperaturas. Muitas empresas lançam novos produtos para esta finalidade, mas, muitos destes produtos não são submetidos a testes rigorosos que assegurem a boa qualidade do produto oferecido. Daí razão do estudo dos concretos asfálticos mornos, em comparação aos produtos convencionais.

## 4 METODOLOGIA E PROCEDIMENTO LABORATORIAL

A pesquisa de misturas asfálticas mornas e análise do seu comportamento mecânico e reológico, nas diferentes solicitações e condicionamentos são realizados segundo os seguintes procedimentos: O concreto asfáltico é uma mistura, basicamente, de dois tipos de materiais; o ligante asfáltico e a matriz granular. Os granulares utilizados na pesquisa, fornecidos pela mineradora Santa Bárbara, são caracterizados pelos ensaios de durabilidade, adesividade, Los Angeles, Índice de Forma, granulometria, esmagamento e equivalente de areia.

O ligante asfáltico, Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 fornecido pela refinaria REPLAN, é caracterizado pelos ensaios de Penetração, Ponto de Amolecimento Anel e Bola, Viscosidade SayboltFurol e Broockfield, e Densidade. Após a caracterização do ligante puro, utilizado na mistura asfáltica convencional, procede-se a modificação com os produtos por adições (CECABASE RT, e REDISET) e, posteriormente, são submetidos ao processo de caracterização. Os valores resultantes de cada um dos ensaios são comparados com os valores iniciais obtidos no CAP 50/70 puro.

Com o teor de trabalho são compactadas placas para os ensaios de Fadiga, com a compactação de duas placas por mistura analisada. Após a compactação e repouso por período mínimo de 15 dias, as placas são serradas para a obtenção dos corpos de prova trapezoidais que são utilizados para os ensaios de fadiga. Realizados os ensaios estabelecidos na metodologia francesa, realiza-se dimensionamento de estrutura de pavimento simulada para cada uma das misturas asfálticas com o intuito de observar, analisar e quantificar as diferenças encontradas.

### 4.1 MATERIAIS

Neste item são descritos os materiais utilizados durante a execução da pesquisa. Esta descrição inclui tipo de material, origem e localização.

#### 4.1.1 Brita

A brita utilizada foi fornecida pela empresa de mineração Santa Bárbara, localizada no município de Palhoça. Este material é proveniente da suíte intrusiva de granito, localizada no município de Palhoça. A seleção dos materiais para a formulação da mistura asfáltica, foi feita a partir dos

tamanhos: brita  $\frac{3}{4}$ ", pedrisco, pó de pedra e o resíduo proveniente da retenção de material pelo filtro de mangas.

#### 4.1.2 Ligante Betuminoso (CAP)

O ligante betuminoso foi fornecido pela PETROBRAS, produzido na Refinaria localizada na cidade de Paulínia/SP (REPLAN - Refinaria do Planalto).

#### 4.1.3 Zeólicas

As zeólicas utilizadas neste trabalho foram fornecidas pela empresa CELTA Brasil, a qual fornece este tipo de materiais para diversas finalidades em áreas industriais. O material desta pesquisa possui fórmula e célula de clinoptilolita [5].

### 5. PROCEDIMENTO LABORATORIAL

Neste item, se explica detalhadamente o processo realizado durante o andamento da pesquisa em cada um dos ensaios.

#### 5.1 Nível 0 da metodologia francesa

No nível 0 realizam-se os ensaios preliminares, são realizados os ensaios de caracterização dos granulares, e dos ligantes asfálticos utilizados, e a escolha da curva granulométrica utilizada para o processo de fabricação das misturas asfálticas do trabalho.

##### 5.1.1 Ensaios nos agregados

Os granulares foram caracterizados nos ensaios de abrasão Los Angeles, durabilidade, adesividade, índice de forma, esmagamento, densidade real e granulometria. A coleta de materiais foi feita de maneira a garantir que a amostra coletada fosse representativa do material em análise. Para o estudo foram coletados três tamanhos, brita, pedrisco e pó.

##### 5.1.2 Ensaios no ligante

Os ensaios de caracterização do ligante asfáltico foram realizados para o ligante puro e para o ligante modificado com CECABASE e REDISSET. No processo de modificação do ligante asfáltico aplicou-se uma redução de temperatura de 20°C. Ainda que na revisão bibliográfica para os produtos utilizados se encontram reduções superiores a esta temperatura, se procurou escolher uma temperatura específica e aplicá-la a cada uma das modificações realizadas para a produção de asfaltos mornos. Quer dizer que o processo de modificação do ligante asfáltico é feito a 135°C para cada um dos casos analisados (REDISSET e CECABASE).

Neste item não vai ser feita a modificação com a utilização das ZEÓLITAS naturais, devido a que no processo que vai ser estudado durante a pesquisa, as ZEÓLITAS são adicionadas durante a fase de misturado, e não no ligante asfáltico.

Analisando a bibliografia encontrada para o tema, e devido a que não se encontra exclusivamente uma dosagem determinada para cada aditivo. Para dar cumprimento ao objetivo desta investigação e tendo em conta as especificações do fabricante, a dosagem adotada para a modificação do ligante está expressa a seguir: CECABASE 0,4% em peso REDISSET 2% em peso.

Tendo selecionada a temperatura de modificação do ligante e o teor de cada um dos aditivos a ser utilizados, o passo a seguir é a modificação e caracterização do mesmo.

Na tabela 1 se encontram caracterizados os ligantes asfálticos utilizados.

Tabela 1 – Caracterização dos ligantes asfálticos

| ITEM             | CAP 50/70 | REDISET | CECABASE |
|------------------|-----------|---------|----------|
| Penetração       | 67        | 60,3    | 63       |
| Ponto de amol.   | 52        | 50      | 53       |
| Visc. S. F.      | 41        | 37      | 38       |
| 177°             |           |         |          |
|                  | 86        | 71      | 74       |
| 150°             |           |         |          |
|                  | 173       | 140     | 146      |
| 135°             |           |         |          |
| Visc. Brookfield | 63,5      | 55      | 56       |
| 177°             |           |         |          |
|                  | 180       | 149,5   | 155      |
| 150°             |           |         |          |
|                  | 365       | 292,5   | 310      |
| 135°             |           |         |          |

### 5.1.3 Seleção da curva granulométrica

O arranjo dos granulares utilizados foi determinado a traves da fórmula estabelecida por Talbot [7], que permite calcular curvas granulométricas bem definidas, a partir da determinação do tamanho Maximo das partículas e da percentagem passante na peneira de menor tamanho. Desta maneira pode se obter um melhor preenchimento dos vazios formados pelas frações de maior diâmetro, o que gera um melhor entrosamento entre os grãos.

Outra maneira para a seleção da curva granulométrica a ser utilizada é com o uso dos parâmetros brasileiros para garantir misturas asfálticas densas de bom comportamento mecânico. Isto é, a traves do processo de enquadramento dos materiais granulares na faixa estabelecida por norma para esta finalidade

#### 5.1.3.1 Critérios utilizados para a seleção da curva granulométrica para a Pesquisa

Existem varias maneiras de poder definir uma curva granulométrica, e entre os critérios que influenciam a escolha, intervêm as necessidades do projeto, função dentro da estrutura e critérios do projetista. Para o desenvolvimento desta pesquisa foram tidos em conta vários parâmetros; físicos, que influenciam o comportamento final da mistura asfáltica e subjetivos, os quais influenciam o critério do projetista e, os que estão relacionados diretamente com o entorno da pesquisa e do laboratório:

- Para esta finalidade a normatividade brasileira oferece uma serie de parâmetros estabelecidos em faixas granulométricas nas quais são estabelecidos limites mínimos e máximos para os materiais. Geralmente, a maioria das pedreiras brasileiras ainda trabalha com 3 ou 4 tamanhos de materiais, com os quais garante as especificações. A partir do enquadramento destes tamanhos na faixa granulométrica, é estabelecida a curva prática para o seu uso no projeto. Este processo apresenta a desvantagem de que a curva obtida

pode não ser adequada, e apresentar falhas de continuidade nos tamanhos dos granulares, isto é divido a que dentro da faixa granulométrica podem ser encontradas diversas curvas, e ainda que possuam o mesmo padrão de enquadramento, o seu comportamento pode ser totalmente diferente e indesejado.

- Com a utilização da equação de Talbot os tamanhos dos granulares podem ser controlados, e pode-se também balizar a continuidade dos mesmos, garantindo o preenchimento dos espaços deixados pelos granulares mais grossos, com os mais finos. Desta maneira pode se obter uma curva com um melhor intertravamento, o que se traduz numa maior estabilidade.

- Atualmente, o laboratório de pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina do campus de Joinville, se encontra em processo de desenvolvimento do protótipo brasileiro da máquina de fadiga e de módulo complexo. Durante este processo, têm sido desenvolvidas varias pesquisas encaminhadas a estudar o comportamento de misturas asfálticas, entre elas a desenvolvida por [3] que estuda a influencia da água, e a de [8,9] que estudaram misturas asfálticas mornas.

- As especificações francesas para as curvas granulométricas não estabelecem faixas e sim diretrizes a serem tidas em conta pelo projetista.

Tendo em conta os parâmetros antes mencionados, a curva granulométrica escolhida, está fundamentada nos princípios utilizados para as pesquisas de [3] e [8,9].

Desta maneira, a curva selecionada para o desenvolvimento da pesquisa obedece aos resultados obtidos com a ajuda da fórmula de Talbot [7]. Para isto, devem ser adotados os valores dos tamanhos máximos dos materiais (D) e a percentagem passante pela peneira de menor tamanho (d), com o que é calculado o valor do expoente da mistura (n), que determina se a mistura é densa ou aberta, e finalmente, selecionar a serie de peneiras que vão ser utilizadas.

#### 5.1.4 Temperaturas de usinagem e compactação

A bibliografia encontrada para cada material que vai ser usado na fabricação das misturas asfálticas mornas apresenta diferentes faixas de redução de temperatura para os concretos asfálticos produzidos, que vão desde 20°C até 60°C dependendo do produto em questão.

O procedimento ideal para a escolha das temperaturas de usinagem e compactação é a partir do ensaio da Prensa de Compactação por Cisalhamento Giratório (PCG), que mede a habilidade á compactação da mistura asfáltica, através da variação na percentagem de vazios na medida em que aumenta o número de ciclos do ensaio. No entanto, esta variação não foi objeto da presente pesquisa.

Tendo em conta as reduções encontradas nos processos de cada um dos produtos utilizados para a pesquisa, e adicionalmente, analisando pesquisas anteriores realizadas no laboratório de pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), optou-se pela escolha de uma redução de 20°C

## 5.2 PROCEDIMENTO DE ELABORAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

Nesta pesquisa são analisadas 4 misturas asfálticas diferentes, mistura asfáltica convencional, mistura asfáltica modificada por REDISET, mistura asfáltica modificada por CECABASE, e finalmente uma mistura asfáltica produzida com ZEÓLITAS naturais. Neste trabalho, distingue-

se dois processos de elaboração das misturas asfálticas mornas; no primeiro processo, se podem enquadrar as misturas asfálticas modificadas por CECABASE, REDISSET, e a mistura convencional. No segundo processo enquadra-se a forma como foi elaborada a mistura asfáltica morna produzida com ZEÓLITAS naturais.

#### 5.2.1 Processo de fabricação No. 1

Este processo modifica o ligante asfáltico antes da fase de usinagem (se necessário), e após desta modificação é realizada a mistura com os materiais granulares. O processo para a fabricação destas misturas é o seguinte:

Os granulares são divididos em dois grupos (retidos e passantes na peneira No. 30) e depois aquecido à temperatura adequada (10 a 15°C acima da temperatura do ligante). O ligante é aquecido à temperatura de preparo junto com o aditivo a ser utilizado. Isto é para facilitar a modificação do ligante e garantir a homogeneidade. O ligante é modificado com a proporção especificada para cada produto, e depois homogeneizada com um agitador adaptado para tal finalidade. Logo, o ligante modificado é colocado novamente na estufa a 135°C.

Com os granulares e o ligante aquecidos às temperaturas indicadas. Inicialmente, o ligante é misturado com os granulares grossos (retidos na peneira No. 30), logo, são adicionados os granulares finos (a partir da peneira No. 30) e é misturado até garantir um bom recobrimento dos granulares. A adição dos finos após a mistura com os granulares grossos é feita para facilitar o misturado, garantindo o bom recobrimento dos agregados, devido a que a maior superfície específica se encontra nos finos e por conseguinte o maior consumo de ligante.

Após do processo de usinagem, se deixa em repouso a mistura à temperatura indicada, e é deixada por um período de duas horas na estufa a 135°C.

#### 5.2.2 Processo de fabricação No. 2

Este processo especifica a maneira como são fabricados as misturas asfálticas, adicionando as ZEÓLITAS durante o processo de usinagem. O processo para a fabricação destas misturas é o seguinte: Os granulares são divididos em dois grupos (retidos e passantes na peneira No. 30) e depois aquecidos a uma temperatura de 145°C. O ligante é aquecido a uma temperatura de 135°C. Prepara-se as ZEÓLITAS na quantidade de 0,3% em peso da mistura asfáltica e se adiciona 21% de água (Figura 6.9).

Com os granulares e o ligante aquecidos às temperaturas indicadas inicialmente, o ligante é misturado com os granulares grossos (retidos na peneira No. 30), logo, são adicionados os granulares finos (a partir da peneira No. 30) e é misturado novamente. Durante o processo de misturado são adicionadas as ZEÓLITAS previamente umedecidas e é misturado até garantir o total recobrimento dos granulares (figura 6.10).

Após do processo de misturado e quando os granulares se encontram recobertos pelo ligante, se deixa em repouso a mistura por um período de duas horas na temperatura de compactação.

### 5.3 NÍVEL 4 - ENSAIO DE FADIGA [2]

O ensaio de fadiga avalia o comportamento mecânico da mistura asfáltica, estabelecendo critérios estatísticos para descrever o desempenho da mistura asfáltica estudada ante diferentes deformações e avaliar a sua vida em fadiga.

Geralmente, a mistura asfáltica é submetida a três níveis de deformação diferentes, um nível procura obter uma vida em fadiga inferior a um milhão de ciclos, um nível procura obter uma vida em fadiga muito próxima a um milhão de ciclos, e o último nível procura uma vida em fadiga superior a um milhão de ciclos. Para cada nível de deformação são ensaiados 8 ou como mínimo 6 corpos de prova, para um total de como mínimo 18 corpos de prova para o ensaio. Para este ensaio são calculadas as hipérboles com um 95% de confiança.

O processo para a execução dos ensaios de fadiga, é descrito a seguir: A partir dos corpos de prova selecionados na triagem, são selecionados normalmente 8 ou como mínimo 6 corpos de prova para cada um dos três níveis de deformação.

Etapa de colagem; os corpos de prova selecionados para os ensaios de fadiga são colados nas chapas e deixados em repouso por um período de 24 horas.

Aferição do deslocamento; É feita a aferição do deslocamento a partir da utilização de corpos de prova elásticos (selecionados e confeccionados para tal finalidade) no topo do corpo de prova que produz a deformação desejada.

Processo do ensaio; logo a aferição do deslocamento, os CP são submetidos a um condicionamento térmico de 10°C por um período de 6 horas, prévio ao inicio do ensaio. Após este período, é submetido a uma frequência de solicitação de 25Hz com a mesma temperatura.

Durante o ensaio, são captados os dados de força e deslocamento. A través da análise dos dados é possível determinar o valor do ângulo de fase no decorrer do ensaio.

O ensaio se considera terminado quando a força necessária para produzir o deslocamento desejado atinge a metade do seu valor inicial, e o resultado expressa o valor em número de ciclos que a deformação imposta resistiu antes da falha.

Exploração de resultados; neste processo são analisados cada um dos resultados obtidos para cada corpo de prova e colocados dentro de um gráfico que resume os dados obtidos. A forma dos corpos de prova dos ensaios de fadiga é projetada para que a falha aconteça no terço meio dos corpos de prova. No entanto, em algumas ocasiões, certos corpos de prova apresentam o rompimento fora desta faixa, os resultados obtidos destes corpos de prova não são tidos em conta para a curva de fadiga porque o seu resultado pode apresentar inferências externas não referentes ao comportamento em fadiga da mistura asfáltica.

No ensaio de fadiga são utilizados 24 ou como mínimo 18 corpos de prova para os níveis de deformação de cada uma das 4 misturas.

## **5.4 RESULTADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS**

Os resultados dos ensaios são apresentados na sequência indicada na diretriz de preparação das misturas asfálticas, tendo em foco as variáveis estabelecidas.

A partir da triagem realizada na seleção de corpos de prova para o ensaio de módulo complexo [1] são selecionados também os corpos de prova utilizados para o ensaio de fadiga, seguindo os princípios de seleção estabelecidos na norma. Cada uma das quatro curvas de fadiga realizadas, possui três níveis de deformação, nas quais procurou-se homogeneizar as deformações impostas nos corpos de prova, estabelecendo os mesmos níveis de deformação para cada uma delas. Sendo assim, foram estabelecidas as deformações a  $120\mu\text{def}$ ,  $150\mu\text{def}$  e  $180\mu\text{def}$ . Dessa forma, tendo em conta a geometria dos corpos de prova utilizados, é calculado o deslocamento que deve ser imposto no topo do corpo de prova para exercer a deformação requerida no terço médio deste mesmo.

### **5.4.1 Ensaio de fadiga na mistura asfáltica convencional**

Para a realização do ensaio de fadiga foi utilizado um total de 24 corpos de prova, no entanto, um corpo de prova apresentou superfície de falha nas proximidades do engastamento (descartado das análises). Com o intuito de complementar as análises foram anotados os valores dos ângulos de fase inicial e final obtidos nos ensaios, salvo algumas exceções onde foram encontrados problemas com os sensores de efeito hall. Os resultados obtidos podem ser apreciados mais facilmente com o gráfico apresentado na figura 1.

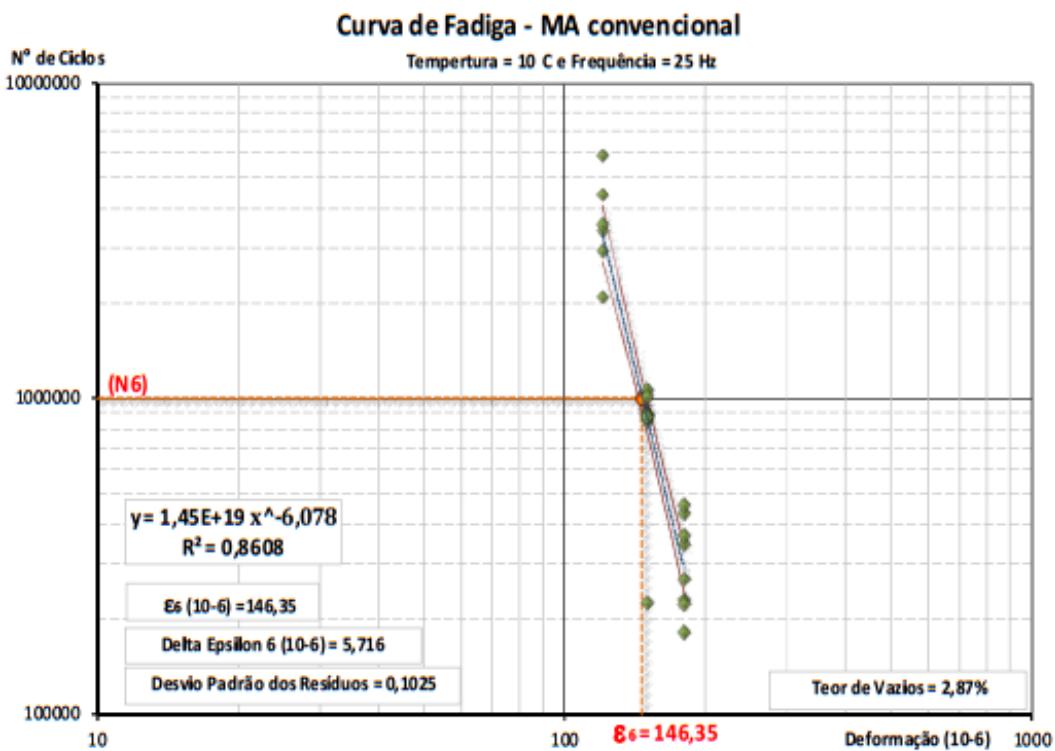


Figura 1 – Curva de fadiga para a mistura asfáltica convencional

#### 5.4.2. Ensaio de fadiga na mistura asfáltica morna com CECABASE RT

Durante a análise dos resultados, dois corpos de prova foram rejeitados, um que quebrou nas proximidades do engastamento e outro por deficiência de ajustamento na chapa de engastamento. Com os resultados elaborou-se o gráfico da curva de fadiga (Figura 2).

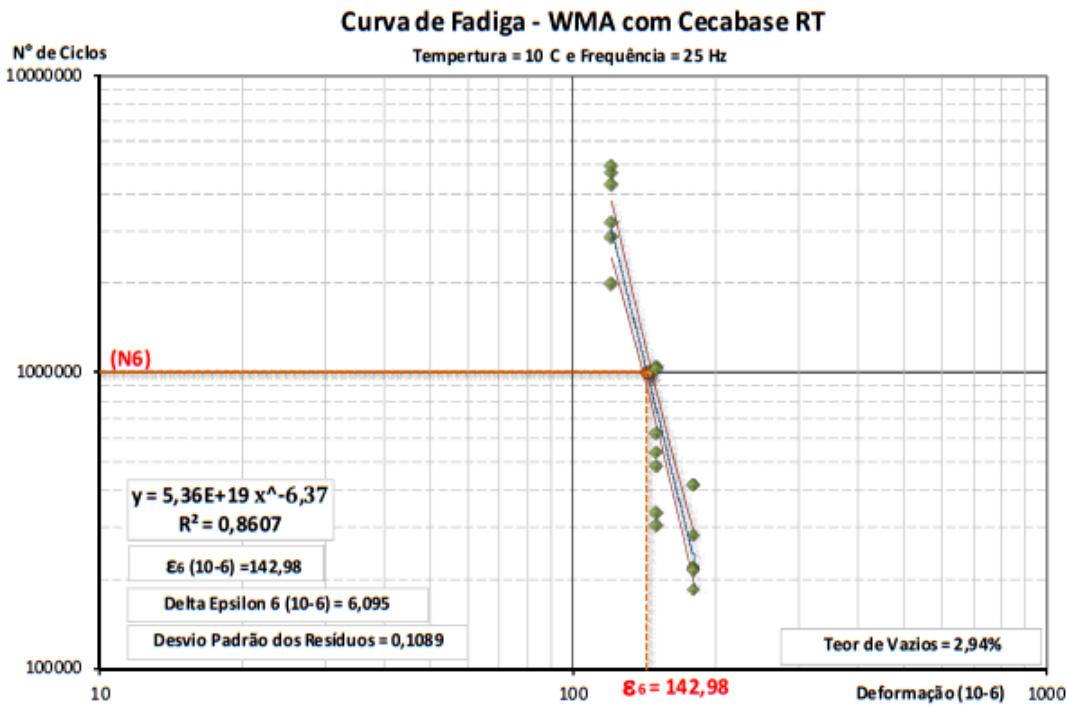


Figura 2 – Curva de fadiga para a mistura asfáltica morna com CECABASE

#### 5.4.3. Ensaio de fadiga na mistura asfáltica morna com REDISET

Durante a análise dos resultados do ensaio um corpo de prova foi rejeitado. Os resultados obtidos podem ser observados no gráfico apresentado na figura 3.

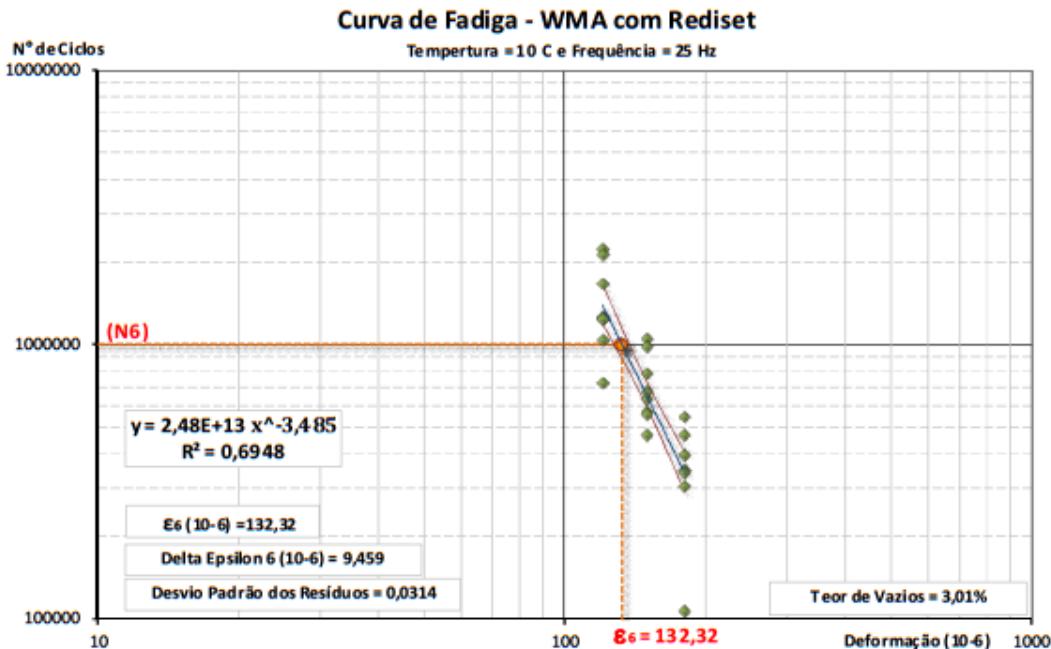


Figura 3 – Curva de fadiga para a mistura asfáltica morna com REDISSET

#### 5.4.4. Ensaio de fadiga na mistura asfáltica morna com ZEÓLITAS

Durante a análise dos resultados um corpo de prova foi rejeitado. Os resultados obtidos podem ser observados no gráfico apresentado na figura 4.

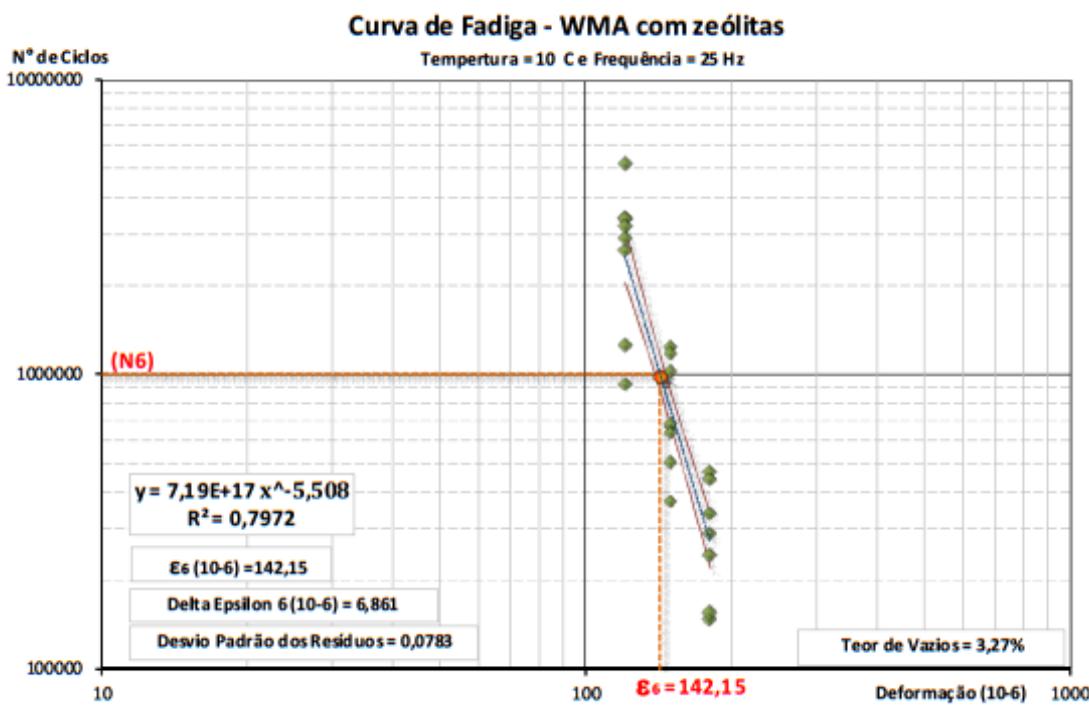


Figura 4 – Curva de fadiga para a mistura asfáltica morna com ZEÓLITAS

#### 5.4.5 Comparação entre os resultados das curvas de fadiga estudadas

A tabela 2 agrupa os resultados das curvas de fadiga das misturas analisadas durante a pesquisa e a figura 5 apresenta graficamente estes resultados.

Tabela 2 – Resumo dos resultados das curvas de fadiga das misturas analisadas

| Variável           | $Y = a * def^b$ |              |          |         |
|--------------------|-----------------|--------------|----------|---------|
|                    | Zeólitas        | Convencional | Cecabase | Rediset |
| A                  | 7,19E17         | 1,45E19      | 5,36E19  | 2,48E13 |
| B                  | -5,508          | -6,078       | -6,37    | -3,485  |
| E6                 | 142,15          | 146,35       | 142,98   | 132,32  |
| Desv. Pad.<br>Res. | 0,0783          | 0,1025       | 0,1089   | 0,0314  |
| $\Delta E6$        | 6,861           | 5,716        | 6,095    | 9,459   |
| r <sup>2</sup>     | 0,7972          | 0,8608       | 0,8607   | 0,4968  |

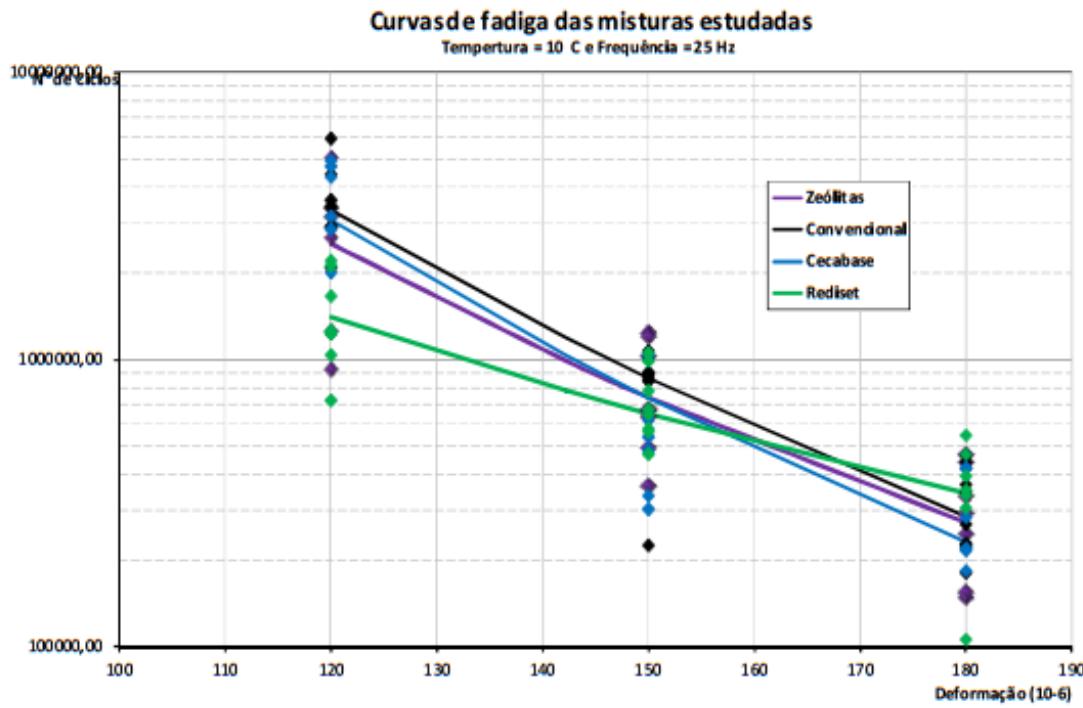


Figura 5 – Curvas de fadiga da pesquisa

Os valores da deformação para um milhão de ciclos das misturas asfálticas mornas elaboradas com ZEÓLITAS e com CECABASE são próximos à deformação da mistura asfáltica convencional (146,35). No referente à suscetibilidade à deformação, a mistura asfáltica morna com CECABASE apresenta maior suscetibilidade, no entanto, a diferença com a inclinação da mistura convencional e a mistura morna com ZEÓLITAS não é significativa. No entanto, a mistura asfáltica morna modificada com REDISSET apresentou a deformação inferior às demais misturas analisadas, porém, apresentou uma menor suscetibilidade à deformação na fadiga quando comparada com as demais misturas

## 6. Conclusões

Estas conclusões restam limitadas ao universo de misturas asfálticas mornas pesquisadas.

As misturas preparadas com ZEÓLITAS requerem a implementação de um sistema adequado de homogeneização da umidade quando utilizadas a grande escala.

Na preparação das misturas não foi possível distinguir diferenças significativas de trabalhabilidade no momento da usinagem (manual) entre as misturas asfálticas mornas e a mistura convencional. O tempo de mistura até o total envolvimento dos granulares foi praticamente o mesmo.

Considerando que uma redução na parcela viscosa apresentada no plano Cole-Cole nas condições de condicionamento do ensaio de fadiga (10°C e 25Hz) geralmente acarreta um aumento na vida em fadiga, quando comparadas com a mistura asfáltica convencional, as misturas mornas modificadas com CECABASE e com REDISSET não apresentaram esse padrão de comportamento.

Os valores da deformação para um milhão de ciclos das misturas asfálticas mornas elaboradas com ZEÓLITAS e com CECABASE são próximos à deformação da mistura asfáltica convencional (146,35).

A mistura asfáltica morna com CECABASE apresenta maior suscetibilidade, no entanto, a diferença com a inclinação da mistura convencional e a mistura morna com ZEÓLITAS não é significativa.

A mistura asfáltica morna com REDISET apresentou a deformação inferior às demais misturas analisadas, porém, apresentou menor suscetibilidade à deformação na fadiga quando comparada com as demais misturas.

Os valores do ângulo de fase encontrados no final do ensaio do ensaio de fadiga, quando a força aplicada alcança a metade do valor medido inicialmente aproximam-se ao dobro do valor inicial na maioria dos casos. No entanto, esta proximidade ainda não oferece uma segurança estatística para ter em conta este parâmetro como referência de fim do ensaio do material nas condições aplicadas neste estudo.

## 7 Referências

- [1] AFNOR NF P 98-260-2 (1992), Essais Relatifs aux Chaussées, Mesure des Caractéristiques Rhéologiques des Mélanges Hydrocarbonés – Partie 2 : Détermination du Module Complex par Flexion Sinusoïdale, Association Française de Normalisation, AFNOR.
- [2] AFNOR NF P 98-261-1 (1993). Détermination de la résistance en fatigue des Mélanges Hydrocarbonés: Partie 1: Essai par flexion à amplitude de flèche constante. Paris, França. Norme Européenne, Association Française de Normalisation, AFNOR
- [3] BARRA, B.S (2009). Avaliação da Ação da Água no Módulo Complexo e na Fadiga de Misturas Asfálticas Densas. Tese Doutorado apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis (2009).
- [4] BARRA, B. S.; MOMM, L.; BROSSEAUD, Y.; HORNYCH, P. (2010), *Diretrizes para a Formulação e Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas*. Revista Pavimentação, Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv).
- [5] CELTA BRASIL. Disponível em: <http://www.celtabrasil.com.br/index.php?c=45&s=0&lang=16>. Acesso em: Fevereiro de 2013.
- [6] FERRET, L.S. Zeólitas de cinzas de carvão: síntese e uso. Porto Alegre, 2004. xii, 105f. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS.
- [7] FÜLLER, W. B.; THOMPSON, S. E. The law of proportioning concrete. Transport American Society of Civil Engineers. Vol. 23, nº 9, march, 1907.
- [8] GUERRERO, Y.; Avaliação do desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas mornas Tese Doutorado apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis (2013).
- [9] GUERRERO, Y. ; BARRA, B. ; OTTO, G. G. ; SHINOHARA, K. J. ; BERNUCCI, L. L. B. . Avaliação do comportamento mecânico e reológico de uma mistura asfáltica morna produzida com zeólitas naturais. In: XVII Congresso panamericano de ingeniería de tránsito, transporte y logística, 2012, Santiago de Chile. Anais do XVII Congresso panamericano de ingeniería de tránsito, transporte y logística, 2012.
- [10] GUIDE TECHNIQUE (1997), French Design Manual for Pavement Structures - Guide Technique (English Version). Published by Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes
- [11] MANUEL LPC (2007), Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Groupe de Travail RST "Formulation des enrobés". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, France.

- [12] Momm, L. (1998), Estudo dos Efeitos da Granulometria Sobre a Macrotextura Superficial do Concreto Asfáltico e Seu Comportamento Mecânico. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo (SP).