

# COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO SMA, CONCRETO ASFÁLTICO E AREIA-ASFALTO

**Felipe Coutinho Onofre**  
**Manuela de Mesquita Lopes**  
**Pedro Custódio de Araújo Júnior**  
**Aline Colares do Vale**  
**Clonilo Moreira Sindeaux de Oliveira Filho**  
**Jorge Barbosa Soares**

Universidade Federal do Ceará  
Departamento de Engenharia de Transportes  
Laboratório de Mecânica dos Pavimentos

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise laboratorial do comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo SMA (Stone Matrix Asphalt), CA (Concreto Asfáltico) e AAUQ (Areia Asfalto Usinada a Quente), usando o Cimento Asfáltico de Petróleo classificado por penetração como CAP 50/70. A dosagem das misturas baseou-se nas especificações Superpave do SHRP (*Strategic Highway Research Program*). Foram realizados ensaios de módulo complexo numa ampla faixa de frequências e temperaturas para avaliar a viscoelasticidade das misturas. Os seguintes outros ensaios também foram realizados: módulo de resiliência, resistência à tração por compressão diametral e vida de fadiga. Os resultados indicaram as vantagens e as desvantagens de cada tipo de mistura investigada.

## ABSTRACT

This paper presents a laboratory study of the mechanical behavior of different types of hot asphalt mixtures, SMA (Stone Matrix Asphalt), Asphalt Concrete and hot mix sand asphalt. An Asphalt Cement (AC) classified by penetration as AC 50/70 was used for all mixtures. The mixtures were designed according to the Superpave procedure. In order to analyze the viscoelastic behavior of the mixtures, complex modulus tests were performed in a wide range of frequencies and temperatures. The following other tests were also performed: resilient modulus, tensile strength in diametral compression and fatigue life. The results indicate the advantages and disadvantages of each type of mixture investigated.

## 1. INTRODUÇÃO

A mecânica dos pavimentos tem-se caracterizado pela busca de propriedades fundamentais dos materiais de pavimentação (Medina e Motta, 2005). No caso de materiais asfálticos, sabe-se que estes possuem um comportamento viscoelástico e, portanto, apresentam uma resposta que é função não apenas da magnitude de carregamento, mas da frequência da carga aplicada (Evangalista Jr., 2006). Neste contexto, a adoção do módulo de resiliência como parâmetro caracterizador de uma mistura asfáltica – prática que vem sendo adotada crescentemente no país – possui limitações (Zhang *et al.*, 1997), uma vez que este parâmetro considera o material ensaiado como tendo comportamento elástico. Para o estudo da viscoelasticidade do material, o ensaio de módulo complexo é recomendado (Huang, 2004; Medeiros, 2006). No presente trabalho é apresentado o estudo das propriedades viscoelásticas, bem como das propriedades convencionalmente determinadas no país para a caracterização mecânica de misturas asfálticas.

Três tipos de misturas são investigadas: *Stone Matrix Asphalt* (SMA), Concreto Asfáltico (CA) e Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ). O SMA é uma mistura a quente concebida para maximizar o contato entre os agregados graúdos, aumentando a interação grão/grão. A mistura contém uma elevada porcentagem de agregados graúdos (70-80% retido na peneira nº 4). Devido a esta graduação particular, forma-se um elevado volume de vazios entre os

agregados graúdos que, no entanto, são preenchidos por uma argamassa constituída pela mistura da fração areia, fíler, ligante asfáltico e fibras, acarretando em um volume de vazios que varia entre 4 e 6% em pista (BERNUCCI *et al.*, 2007). O consumo de ligante asfáltico de uma mistura do tipo SMA varia em geral entre 6,0 e 7,5%. (NAPA, 1999).

O CA é uma mistura usinada a quente constituída por uma graduação densa. A curva granulométrica contínua e bem graduada proporciona um esqueleto mineral com poucos vazios visto que os agregados de dimensões menores preenchem os vazios dos maiores. A faixa de teor de asfalto de um CA está normalmente entre 4,5 e 6,0%.

As AAUQ's são usualmente empregadas em regiões onde a presença de agregados pétreos é escassa ou inexistente, sendo também utilizadas em rodovias com baixo volume de tráfego (Bernucci *et al.*, 2007). No Brasil, o emprego de misturas areia asfalto vem acontecendo desde a década de 1960, no estado do Rio Grande do Sul (planície costeira) e em diversas áreas das regiões Norte e Nordeste do país, onde esse material é utilizado não só como revestimento, mas também como camada de regularização (Aldigueri, 2001). Essas misturas possuem elevada quantidade de ligante asfáltico, entre 6,0 e 12% (DNIT 032/2005 – ES), devido à predominância de agregados de pequenas dimensões.

O procedimento de dosagem das misturas investigadas no presente trabalho é baseado na metodologia Superpave, utilizando o Compactador Giratório Superpave (CGS). Esta metodologia fixa o parâmetro volume de vazios para a determinação do teor de ligante de projeto (SHRP, 1994a, 1994b; Motta *et al.*, 1996).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É vasta a literatura nacional sobre os ensaios mecânicos convencionais utilizados na presente investigação para caracterização das misturas asfálticas: módulo de resiliência, resistência à tração e vida de fadiga. Recomenda-se os trabalhos de Pinto (1991), Medina e Motta (2005) e Bernucci *et al.* (2007) para informações sobre estes ensaios. A revisão aqui apresentada restringir-se-á ao ensaio de módulo complexo bem como à apresentação dos dados deste ensaio por meio de curvas mestras, uma vez que, por um lado, os ensaios acima citados possuem vasta bibliografia, e por outro, o ensaio de módulo complexo é relativamente recente no país e, portanto, pouco abordado.

### 2.1. Módulo Complexo

Segundo Pritz (1998), módulo complexo é definido como a relação tensão-deformação obtida em materiais viscoelásticos. O módulo complexo ( $E^*$ ) é composto por duas partes: uma real ( $E'$ ), correspondente à resposta elástica do material, e uma imaginária ( $E''$ ), que corresponde à resposta viscosa do material. As seguintes equações representam o parâmetro em questão:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

$$E^* = E' + iE'' \quad (2)$$

$$E' = \frac{\sigma_0 \cos \delta}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

$$E'' = \frac{\sigma_0 \sin \delta}{\varepsilon_0} \quad (4)$$

em que  $\delta$ : ângulo de fase;  
 $\sigma_0$ : amplitude da tensão aplicada;  
 $\varepsilon_0$ : amplitude da deformação.

O ângulo de fase está associado à defasagem do pulso de deformação em relação ao pulso de tensão. Quando  $\delta = 0^\circ$ , pode-se dizer que o material é perfeitamente elástico; já quando  $\delta = 90^\circ$ , diz-se que o material apresenta um comportamento viscoso. Portanto, quanto maior o ângulo de fase, mais viscoso será o material.

## 2.2. Curva Mestra

É comum a apresentação do módulo complexo e do ângulo de fase por meio de curvas mestras, que permitem uma visualização destes parâmetros para tempos ou frequências de carregamentos diversos. A reprodução do efeito da temperatura em termos de frequência e tempo é chamada de princípio da superposição tempo-temperatura. Este princípio permite a construção das curvas mestras, por meio das quais se podem prever o comportamento das misturas em tempos e frequências diferentes dos quais os experimentos foram conduzidos (Medeiros, 2006). A partir de uma temperatura de referência, é possível deslocar as curvas obtidas em diferentes temperaturas, obtendo-se, então, a curva mestra característica do material estudado.

O procedimento de construção das curvas mestras parte do conceito de tempo reduzido, introduzido por William *et al.* (1955) representado pela Equação 5.

$$\xi = \frac{t}{a_T} \quad (5)$$

em que  $\xi$ : tempo reduzido;  
 $a_T$ : fator de deslocamento;  
 $t$ : tempo inicial de ensaio.

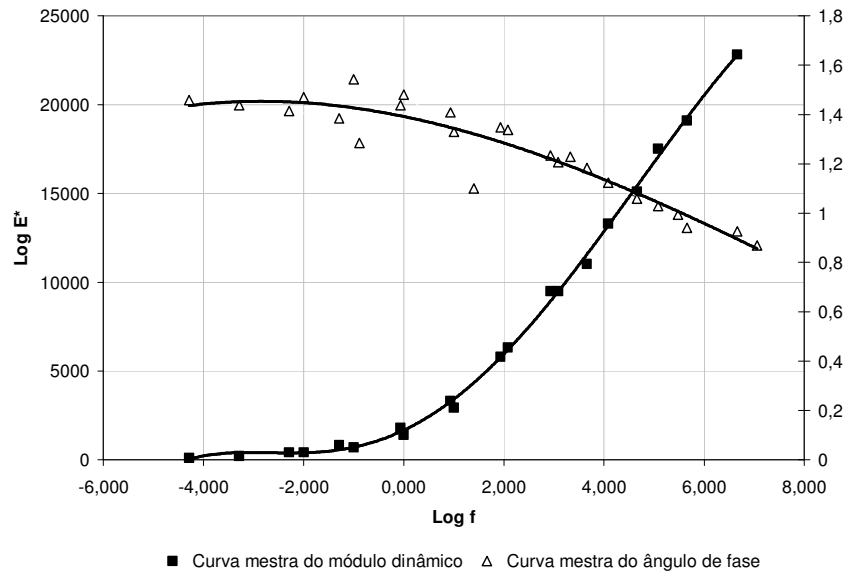
O termo  $a_T$ , fator de deslocamento, é descrito pela Equação 6 (Arrhenius).

$$\log(a_T) = \log\left(\frac{\Delta H}{R}\right) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) \quad (6)$$

em que T: temperatura experimental;  
 $T_0$ : temperatura de referência;  
 $\Delta H$ : energia de ativação (J/mol);  
R: constante dos gases ideais.  
 $\log\left(\frac{\Delta H}{R}\right) = 10500$  (Lytton *et al.*, 1993)

A partir das curvas mestras do módulo dinâmico e do ângulo de fase (Figura 1) obtidas por Medeiros (2006), observa-se que à medida que se eleva a frequência, o módulo dinâmico aumenta. Além disso, tem-se que a baixas frequências, o ângulo de fase se mantém aproximadamente estável, enquanto que a altas frequências, mostra-se que este parâmetro tende a diminuir. Em trabalho sobre o uso do módulo complexo na caracterização mecânica de misturas asfálticas, Medeiros (2006) submeteu vários corpos-de-prova (CPs) para ensaios em diferentes laboratórios nacionais e internacionais, adotando a prática de se extrair o núcleo de corpos de prova de diâmetro de 175 mm, obtendo ao final CP's de 100 mm de diâmetro. Este procedimento mostra-se adequado a fim de se garantir pouca variabilidade do volume de

vazios ao longo das seções transversais dos CP's.



**Figura 1:** Curvas mestras do módulo dinâmico e do ângulo de fase (Medeiros, 2006)

### 3. MATERIAIS

#### 3.1. Agregados

Os agregados naturais foram provenientes da Pedreira de Itaitinga, localizada a aproximadamente 30 km da cidade de Fortaleza, Ceará. O material foi caracterizado seguindo a metodologia recomendada pelo Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT). Conforme especificações nacionais, foram realizados ensaios de granulometria (DNER-ME 083/98), abrasão Los Angeles (DNER-ME 35/98), densidade do agregado miúdo e graúdo (DNER-ME 81/98 e DNER-ME 84/95), adesividade (DNER-ME 078/94) e índice de forma (DNER-ME 86/94).

O filler usado na mistura do tipo AAUQ foi 100% artificial, sendo constituído de Carbonato de Cálcio, com massa específica real de 2,78g/cm<sup>3</sup> e umidade de 2,0%. O material foi cedido pela empresa Carbomil S.A. O filler artificial não foi utilizado nos outros dois tipos de mistura (CA e SMA), nas quais foram usados fileres naturais.

#### 3.2. Fibras

As fibras são utilizadas para evitar o escorrimento de parte da argamassa, rica em ligante asfáltico, do agregado graúdo durante a usinagem, estocagem, transporte e aplicação da mistura do tipo SMA. Se não empregadas ou se dosadas de maneira inadequada, podem surgir pontos de exsudação e de segregação na mistura. As fibras usadas neste trabalho são de celulose e foram cedidas pela empresa Ecofibras, localizada no Estado de São Paulo. O produto cedido é comercialmente designado como VIATOP 66, que é um granulado composto por 66,6% em peso de fibra ARBOCEL ZZ 8-1 e por 33,3% de asfalto.

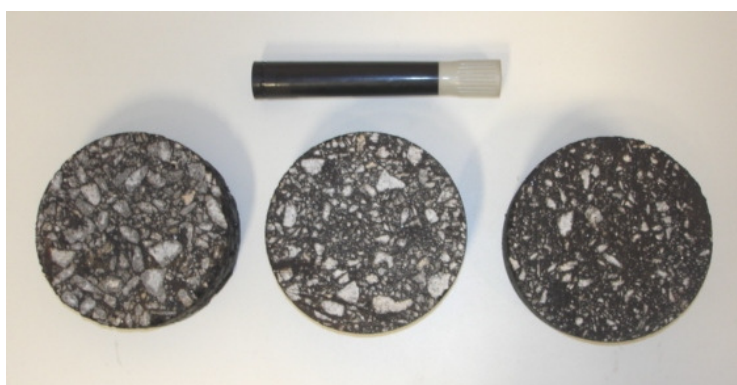
#### 3.3. Ligante

O ligante utilizado nos três tipos de misturas investigadas é caracterizado por penetração como CAP 50/70 de acordo com especificações brasileiras regulamentadas pela Agência

Nacional de Petróleo (ANP, 2005), sendo proveniente do campo Fazenda Alegre no Espírito Santo. O CAP foi fornecido pela Lubnor – Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste, refinaria da Petrobras situada na cidade de Fortaleza.

#### 4. DOSAGEM

Conforme referido anteriormente, foram estudadas misturas asfálticas do tipo SMA, CA e AAUQ, utilizando o CAP 50/70. Para cada tipo de mistura, moldaram-se corpos de prova (Figura 2) de 100mm de diâmetro no compactador giratório Superpave (CGS). Vale observar que não é prevista a utilização do CGS com misturas do tipo areia-asfalto, sendo a prática adotada pelos autores neste trabalho – além do caráter investigativo – com o intuito de manter a mesma variável (tipo de compactação) para as 3 misturas. Observou-se, contudo, que os parâmetros volumétricos obtidos para esta mistura em particular não diferiu de valores tipicamente encontrados por meio da dosagem Marshall convencionalmente adotada.



**Figura 2:** SMA, CA e AAUQ, respectivamente

#### 4.1. Granulometria

A distribuição granulométrica para os três tipos de misturas é apresentada na Tabela 1. A granulometria da mistura do tipo SMA enquadra-se na faixa 12,5mm especificada pela norma AASHTO MP8-02, mesma curva utilizada no trabalho de Oliveira Filho (2007); a mistura do tipo CA na faixa C do DNIT 031/2004-ES; e a mistura do tipo AAUQ na faixa A do DNIT 032/2005-ES.

**Tabela 1:** Distribuição granulométrica dos agregados

Peneiras	% Passando		
	SMA*	CA	AAUQ
¾"	100	100	100
½"	95	88	100
3/8"	75	78	100
n° 4	35	54	85
n° 10	18	34	65
n° 40	13	17	21
n° 80	12	10	7
n° 200	10	6	4

\*Oliveira Filho (2007)

#### 4.2. Determinação do Teor de Ligante

O procedimento de dosagem seguiu a metodologia Superpave para a determinação do teor de ligante (teor de projeto). No preparo das misturas, o CAP 50/70 foi aquecido a 160°C e os

agregados a 175°C, sendo em seguida misturados. Na compactação, adotou-se 100 giros no compactador giratório à temperatura de 150 °C. A Tabela 2 mostra o resumo dos parâmetros de dosagem obtidos.

**Tabela 2:** Parâmetros da dosagem Superpave

Parâmetros	Misturas		
	SMA	CA	AAUQ
Teor de ligante, %	7,2	5,7	8,3
Volume de vazios, %	3,2	3,8	4,6
Densidade aparente	2,323	2,322	2,242
VAM, %	19,5	15,8	22,6
RBV, %	83,6	75,7	82,3

## 5. ENSAIOS MECÂNICOS

### 5.1. Módulo de Resiliência e Resistência à Tração por Compressão Diametral

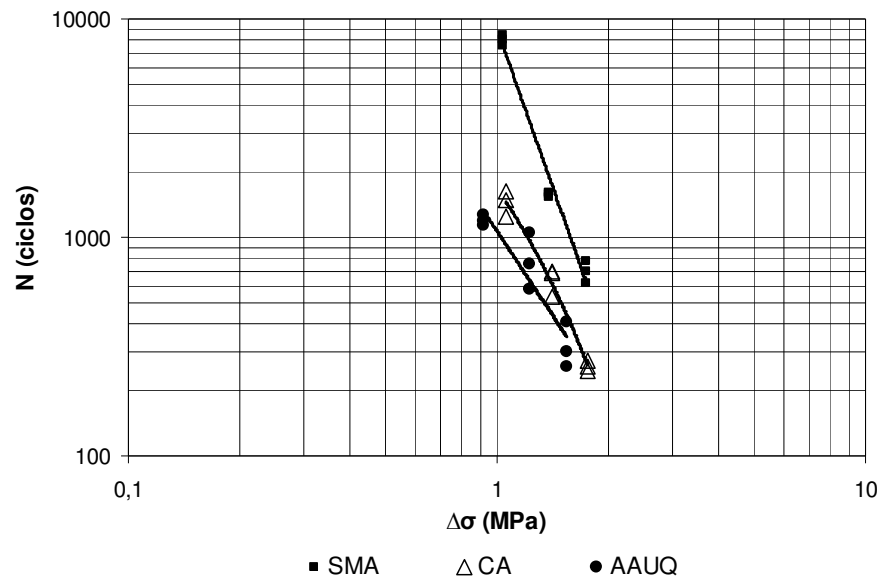
Para os ensaios de módulo de resiliência (MR) e resistência à tração (RT) foram moldados corpos de prova de 100 mm de diâmetro por 65 mm de altura seguindo as normas DNER-ME 133/94 e DNER-ME 138/94, respectivamente. Os ensaios foram realizados a 25°C. A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios e a relação MR/RT. Nota-se que os valores dos parâmetros em questão para o SMA é superior ao valor das duas outras misturas. As misturas SMA e CA possuem valores semelhantes de MR/RT, que por sua vez são maiores que o da mistura do tipo AAUQ.

**Tabela 3:** Resultados da caracterização mecânica

Tipo de Mistura	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Resiliência (MPa)	MR/RT
SMA	1,11	3.790	3.414
CA	0,86	2.924	3.389
AAUQ	0,77	1.833	2.387

### 5.2. Vida de Fadiga

A vida de fadiga é definida como o número de repetições de carga associado a um certo nível de tensão necessário para que uma amostra sofra fratura total. O ensaio laboratorial de vida de fadiga tradicionalmente realizado no Brasil é feito por compressão diametral à tensão controlada, sendo a carga aplicada numa frequência de 1Hz por meio de equipamento pneumático (Bernucci *et al.*, 2007). O ensaio realizado no presente trabalho foi feito com três níveis de tensão: 30, 40 e 50% da resistência à tração. Para cada nível de tensão foram realizados 3 ensaios, totalizando 9 ensaios para cada tipo de mistura. Os resultados estão apresentados na Figura 3, que representa o número de golpes até a ruptura para o nível de tensão aplicado no corpo de prova.



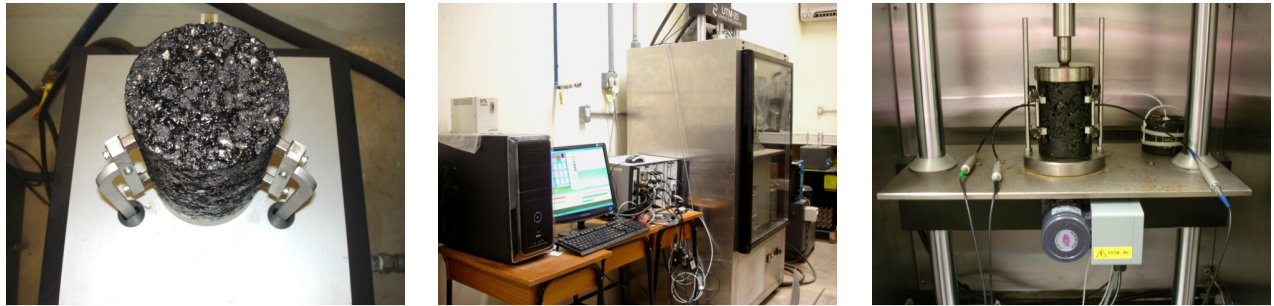
**Figura 3:** Curvas do ensaio de vida de fadiga

Quando se considera o mesmo nível de tensão, a mistura do tipo SMA possui maior vida de fadiga comparativamente às outras duas. Há uma variação entre as inclinações das curvas, mostrando que os três tipos de granulometria possuem comportamentos diferentes ao se variar o nível de tensão.

### 5.3. Módulo Complexo

O ensaio de módulo complexo (Figura 4) consiste em aplicar uma tensão de compressão axial nos corpos de prova em determinadas temperaturas e frequências. As deformações são então medidas e usadas para calcular o módulo dinâmico, valor absoluto do módulo complexo (ASTM D 3497). As medições de deformações axiais são feitas por LVDT's, que podem estar acoplados aos corpos de prova, sendo feitas medidas de alta precisão. Para a presente pesquisa, foram moldados dois corpos de prova de cada mistura estudada (dimensões: 100mm de diâmetro por 150mm de altura), utilizando o compactador giratório Superpave.

O equipamento utilizado para o ensaio em questão foi a máquina universal de ensaios (UTM 25 – *Universal Testing Machine*) do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC, por meio da qual pode-se gerar diferentes funções de carregamento. Dentre estas funções, a onda sinusoidal (Haversine) tem-se mostrado a mais adequada para ensaios de módulo dinâmico. A UTM 25 tem a capacidade de aplicar cargas em diferentes níveis de frequência e tensão, contando ainda com um sistema de controle de temperatura capaz de cobrir um intervalo entre -20 e 70°C. Este tipo de equipamento ainda tem uso restrito nos grupos de pavimentação do país, o que limita a maior produção de dados experimentais de propriedades viscoelásticas de misturas asfálticas.



**Figura 4:** Ensaio de módulo complexo

Foram aplicadas tensões de 200kPa através de funções do tipo Haversine nas temperaturas de -5; 5; 15; 25 e 40°C e nas frequências de 0,01; 0,1; 1 e 10Hz. Vale ressaltar que estes não são os valores de temperatura e frequência preconizados na norma ASTM D 3497. Como a norma não visa à obtenção de curvas mestras, ela trabalha com um menor número de frequências e temperaturas (Medeiros, 2006). Na Tabela 4, são apresentados os resultados do ensaio de módulo complexo (módulo dinâmico e ângulo de fase) para as três misturas estudadas.

**Tabela 4:** Resultados do ensaio de módulo complexo

Temp., °C	Frequência, Hz	SMA		CA		AAUQ	
		Módulo Dinâmico, MPa	Ângulo de Fase, Graus	Módulo Dinâmico, MPa	Ângulo de Fase, Graus	Módulo Dinâmico, MPa	Ângulo de Fase, Graus
-5	10	31.923	7,27	22.256	7,88	19.517	9,09
	1	26.721	12,77	18.331	11,25	15.185	11,33
	0,1	20.855	17,98	14.336	13,86	11.296	14,17
	0,01	14.689	21,85	10.365	17,10	7.683	17,64
5	10	22.284	15,85	16.625	17,34	13.115	18,29
	1	14.836	18,79	11.970	18,75	8.795	20,87
	0,1	9.368	23,22	7.673	23,58	5.257	25,74
	0,01	5.090	28,97	4.329	29,45	2.721	32,51
15	10	11.767	23,45	10.295	28,82	7.514	28,27
	1	6.781	27,41	6.155	31,23	4.284	30,19
	0,1	3.271	33,26	3.066	36,51	2.031	35,00
	0,01	1.510	35,21	1.389	37,96	890	37,98
25	10	5.821	34,18	5.304	32,93	3.242	31,90
	1	2.536	34,90	2.586	34,10	1.507	33,40
	0,1	1.086	34,02	1.194	32,97	685	31,34
	0,01	518	29,80	626	28,28	364	26,16
40	10	2.350	12,67	1.602	30,53	2.770	10,48
	1	1.074	17,90	876	27,50	1.315	4,75
	0,1	593	15,49	522	22,38	765	6,77
	0,01	391	12,67	378	15,68	559	5,10

Observa-se que o módulo dinâmico diminui à medida que se aumenta a temperatura, ou seja, para temperaturas altas as misturas asfálticas tornam-se menos rígidas, o que é obviamente esperado. No que diz respeito ao comportamento das misturas em função da mudança de frequência, nota-se que o aumento desta acarreta em um aumento do módulo dinâmico, ou seja, quanto mais rápida for a aplicação da carga (o que equivale a uma velocidade crescente do fluxo de tráfego), mais elástica será a resposta do material às solicitações que ele venha a



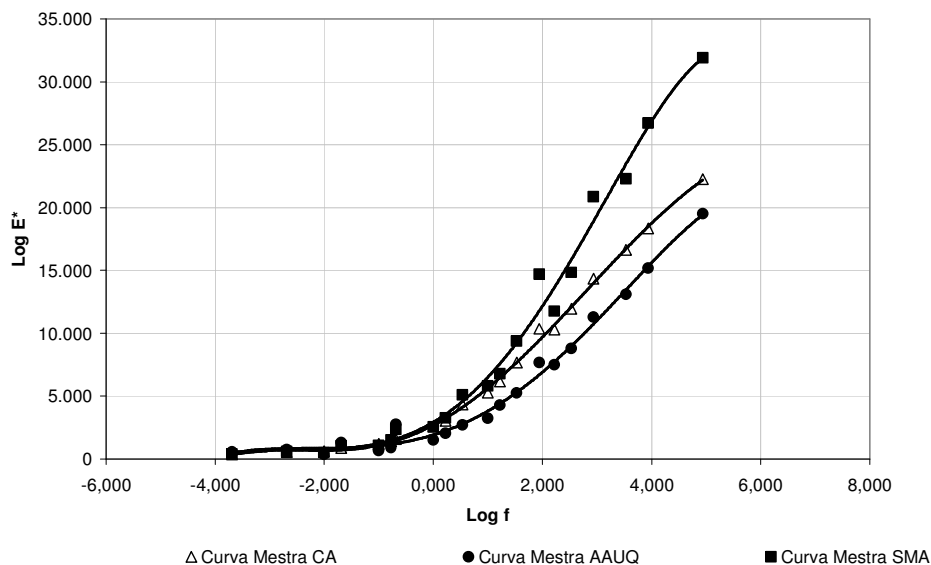
ser submetido.

Nas temperaturas de -5, 5 e 15°C, os valores do ângulo de fase se elevam à medida em que se diminui a frequência, ou seja, para estas temperaturas o material comporta-se de forma mais viscosa para menores frequências. Assim, para frequências maiores, oferecerão resposta mais elástica ao carregamento sofrido – o que é de fato esperado.

Na analogia do comportamento viscoelástico do material com molas e amortecedores (Souza e Soares, 2003), em frequências elevadas (rápida velocidade de carregamento) a resposta do material seria representada apenas pelas molas, dado que a resposta delas é instantânea, enquanto a resposta dos amortecedores é retardada. Entretanto, para as temperaturas de 25 e 40°C, observou-se uma inversão deste comportamento, isto é, o ângulo de fase teve uma tendência a aumentar (resposta mais viscosa, ou seja, menos elástica) com o crescimento da frequência, o que não era esperado e não foi observado, por exemplo, em Medeiros (2006).

Na análise comparativa dos resultados dos diferentes tipos de mistura, observa-se que as misturas do tipo AAUQ apresentam um comportamento mais viscoso que os outros dois tipos de mistura em temperaturas mais baixas (-5 e 5°C). Já em temperaturas mais altas (25 e 40°C) estas misturas apresentam uma elasticidade maior. Quando comparadas às do tipo CA, as misturas do tipo SMA apresentaram valores de ângulo de fase menores e, portanto, uma elasticidade maior nas temperaturas de 5, 15 e 40°C.

O procedimento de construção da curva mestra foi realizado adotando-se como temperatura de referência 25°C. A Figura 5 ilustra as curvas mestras do módulo dinâmico obtidas para cada tipo de mistura.

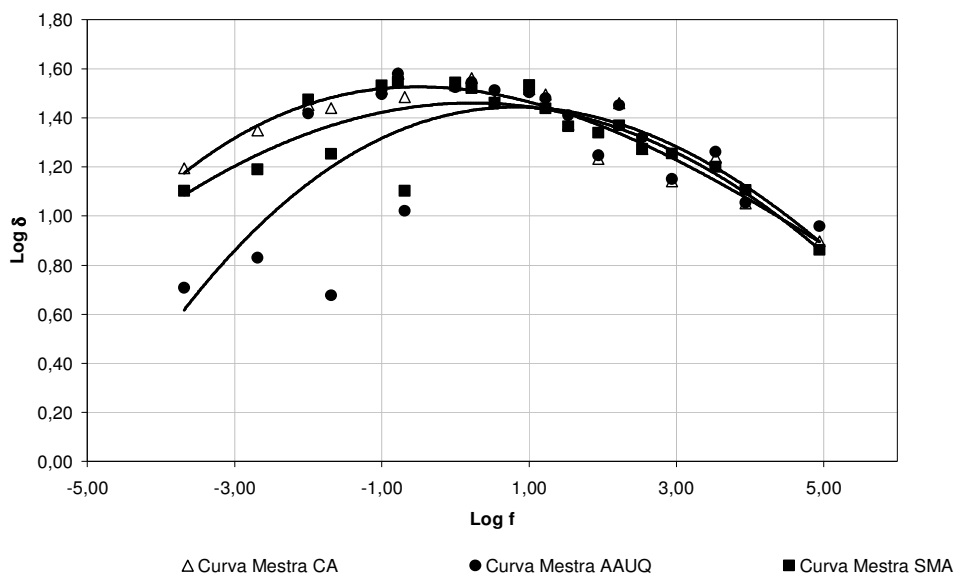


**Figura 5:** Curvas mestras do módulo dinâmico para misturas do tipo SMA, CA e AAUQ

Da Figura 5 observa-se que, para baixas frequências, as três misturas se comportam de maneira semelhante, enquanto que, para altas frequências, misturas do tipo SMA apresentam uma maior rigidez quando comparadas com misturas do tipo CA e AAUQ. As misturas do tipo AAUQ obtiveram os menores valores de módulo dinâmico a frequências elevadas.

A Figura 6 ilustra as curvas mestras do ângulo de fase para cada mistura estudada na temperatura de referência de 25°C. Observa-se uma pequena diferença do comportamento destas curvas quando comparadas aos resultados reportados na literatura apresentados anteriormente (Medeiros, 2006). Esta diferença de comportamento deve-se aos valores muito reduzidos dos ângulos de fase obtidos na temperatura de 40°C. Deve-se ressaltar que alguns problemas operacionais foram encontrados na condução do ensaio nesta temperatura. A alta temperatura provocou um descolamento dos LVDT's do corpo de prova.

Considerando os resultados obtidos, constata-se que, em baixas frequências, misturas do tipo AAUQ se comportam de maneira mais elástica entre os 3 tipos de mistura, enquanto que o caráter predominantemente viscoso foi encontrado nas misturas do tipo CA. Já em frequências mais elevadas, as três misturas demonstraram comportamentos bem semelhantes.



**Figura 6:** Curvas mestras do ângulo de fase para misturas do tipo SMA, CA e AAUQ

Os resultados apresentados de módulo dinâmico e ângulo de fase de misturas podem ser empregados como dados de entrada para o dimensionamento mecânico de pavimentos, cuja resposta estrutural pode ser avaliada em função do tempo ou da frequência de carregamento. Tal possibilidade de ter o tempo ou frequência como variável numa análise é mais avançada do que a análise elástica linear ou não linear comumente realizada no país. Vale ressaltar que os dados em questão ( $E^*$ ,  $\delta$ ) não constituem dados diretos de entrada para análise de tensões e deformações pelo método dos elementos finitos. Estes precisam ser interconvertidos a fim de se obter o módulo de relaxação ( $E(t)$ ), parâmetro associado ao ensaio de deformação controlada, podendo ser utilizado como dado de entrada para alguns softwares de análise existentes (Medeiros, 2006).

Silva *et al.* (2008), a partir de resultados de ensaio de módulo complexo, mostrou todo o processo de interconversão, iniciando com a interconversão dos dados do domínio da frequência para o domínio do tempo, obtendo em seguida, através de uma nova interconversão, o módulo de relaxação. Com este parâmetro, Silva *et al.* (2008) apresentou uma análise dinâmica viscoelástica, evidenciando a diferença nos resultados das tensões e

deformações quando comparados com uma análise elástica clássica. Percebeu-se em seu trabalho uma clara distinção de valores nos parâmetros de dimensionamento mecânico – como deslocamento vertical e tensão horizontal no fundo do revestimento – quando a análise foi feita através das propriedades viscoelásticas em detrimento das propriedades elásticas. Entretanto, essa diferença mostrou-se bem menos acentuada para os valores de tensão vertical no topo do subleito.

## **6. CONCLUSÕES**

Com relação aos teores deligante, o maior teor obtido para o AAUQ é atribuído à elevada superfície específica de sua granulometria, com grande proporção de agregado miúdo.

No que se refere ao desempenho mecânico, observou-se que o SMA apresentou maior valor de MR, RT e relação MR/RT, quando comparados aos valores encontrados para as outras duas misturas. Por sua vez, os valores de MR e RT das misturas do tipo AAUQ foram os menores entre as misturas investigadas. No que diz respeito à vida de fadiga, a mistura SMA apresentou o melhor desempenho, quando considerado o mesmo nível de tensão. Atribui-se o desempenho diferenciado do SMA à elevada coesão proporcionada por sua granulometria intertravante.

Na análise viscoelástica das três misturas estudadas, observou-se que, a temperaturas mais baixas, o AAUQ apresentou um comportamento mais viscoso em relação às outras misturas. Porém, em temperaturas mais elevadas, percebeu-se nesta mistura um caráter elástico mais acentuado, o que, contudo, pode ter sido obtido em virtude de falhas operacionais nos ensaios realizados nestas temperaturas. Constatou-se que as misturas do tipo SMA apresentaram uma maior elasticidade (menor ângulo de fase) em relação às misturas do tipo CA, fato este esperado diante da característica de elevada rigidez que essa tipo de mistura apresenta. É interessante observar que o maior comportamento elástico do SMA diante das demais misturas foi apresentada para a maioria das temperaturas empregadas, o que evidencia a predominante influência de sua granulometria intertravante em sua capacidade estrutural.

Na análise dos resultados pelas curvas mestras, verificou-se a semelhança do comportamento viscoelástico das misturas em baixas frequências. Ou seja, para um fluxo de tráfego lento, os resultados não indicam diferença entre os três tipos de revestimento. Por sua vez, a altas frequências, evidenciou-se uma maior rigidez para os revestimentos do tipo SMA, caracterizando esta mistura como a mais adequada a absorver as tensões de um tráfego intenso. As misturas do tipo AAUQ obtiveram menores valores de módulo complexo em altas frequências, indicando, portanto, uma menor capacidade de absorver tensões nessas condições.

### **Agradecimentos**

Agradecimentos são devidos (i) ao Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT pelo apoio na forma de bolsa de iniciação científica ao primeiro autor e bolsa de mestrado à segunda autora; (ii) ao CNPq pelo apoio à pesquisa na forma de uma bolsa de iniciação científica ao terceiro autor e bolsa de produtividade ao orientador; (iii) ao laboratorista Rômulo Jácome pela confecção dos corpos de prova.

### **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.
- ANP (2005) Resolução ANP N° 19, de 11.7.2005 DOU 12.7.2005. Regulamento técnico N° 3/2005. Agência Nacional do Petróleo.

- ASTM (2003) ASTM D3497-79 – Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures, American Society of Testing and Materials.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. (2006) Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ.
- DNER-ME 35 (1998) Agregados – Determinação da Abrasão “Los Angeles”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-ME 81 (1998) Agregados – Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-ME 83 (1998) Agregados – Análise Granulométrica. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-ME 133 (1994) Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-ME 138 (1994) Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-ME 085/94 (1994) Material Finamente Pulverizado – Determinação da Massa Específica Real, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Evangelista Jr., F. (2006) *Análise Quasi-Estática e Dinâmica de Pavimentos Asfálticos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE
- Huang, Y. H. (2004) *Pavement Analysis and Design*. Ed. Prentice Hall, New Jersey, EUA.
- Lytton, R. L., Uzan, J., Fernando, E. M. e Roque, R. (1993) *Characterization and Structural Assessment of Performance Prediction Models and Specification for Asphalt Binders and Paving Mixes*, SHRP Report A-375, Washington, DC.
- Medeiros, M. S. (2006) *Estudo de Interconversão entre o Módulo Complexo e a Creep Compliance na Caracterização de Misturas Asfálticas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 123 fl.
- Medina, J. e Motta, L.M.G. (2005) Mecânica dos Pavimentos. 2ª Edição, Rio de Janeiro.
- NAPA (1999) *National Asphalt Pavement Association, Quality Improvement Series 122. USA, Designing and Construction SMA Mixtures – State-of-the-Practice*.
- Oliveira Filho, C. M. S. (2007) *Estudo do Efeito de Diferentes Granulometrias no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Densas Descontínuas Tipo Stone Matrix Asphalt (SMA)*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 122fl.
- Pinto, S. e Motta, L. M. G. (1995) *Catálogo de Curvas de Fadiga. Boletim Técnico N° 16*. Associação Brasileira de Pavimentação – ABPv. Rio de Janeiro, Brasil.
- Pritz, T. (1998) *Frequency Dependences of Complex Modulus and Complex Poisson's Ratio of Real Solid Materials*. Journal of Sound and Vibration, n 214, pp 83-104.
- Schapery, R. A. (1982) Theory of Viscoelasticity. Lecture Notes.
- SHRP (1994a) *Superior Performing Asphalt Pavements (SUPERPAVE): the Product of SHRP Asphalt Research Program. Strategic Highway Research Program A-410, National Research Council, Washington, DC*.
- SHRP (1994b) *The SUPERPAVE Mix Design System Manual of Specifications, Test Methods, and Practices. Strategic Highway Research Program A-379, National Research Council, Washington, DC*.
- Silva, H. N., Sousa, P. C., Araújo, P. C., Soares, J. B., Holanda, A. S. (2008) *Metodologia Simplificada de Análise Numérica Dinâmica Viscoelástica de Pavimentos Asfálticos*. Anais da 39ª Reunião da Associação Brasileira de Pavimentação / 13º ENACOR, Recife, PE.
- Souza, F. S. e Soares, J. B. (2003) Previsão do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Partir dos Resultados do Ensaio de Creep Estático. In: CNT/ANPET (org.) / LGE (ed.) Transporte em Transformação VII – Trabalhos vencedores do prêmio CNT Produção Acadêmica 2002, Brasília, Brasil.
- Vasconcelos, K. L. (2004) *Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas à Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias*. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 149 fl.
- Williams, M. L.; Landel, R. F.; Ferry, J. D. (1955) *The Temperature Dependence of Relaxation Mechanism in Amorphous Polymers and Other Glass - Liquids*, J, of Am, Chem, Soc, Vol, 77, p, 370.
- Zhang, W.; Drescher, A.; Newcomb, D. E. (1997) *Viscoelastic Analyses of Diametral Contraction of Asphalt Concrete*. Journal of Engineering Mechanics, V. 123, N. 6, P. 596 – 603.