

**IAG249-08-2013**  
**EFEITO DA MODIFICAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO POR POLÍMERO E**  
**ADITIVO NO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DO CONCRETO**  
**ASFÁLTICO**  
**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO DEL CONCRETO**  
**ASFÁLTICO EN SUS PARÂMETROS DE FADIGA.**

Leto Momm  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Florianópolis - Brasil  
leto.momm@ufsc.br

Breno Salgado Barra  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Joinville – Brasil  
brenobarra@gmail.com

Yader Alfonso Guerrero Pérez  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Florianópolis – Brasil  
yagcivil@gmail.com

Keyla Junko Shinohara  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Florianópolis – Brasil  
keylajunko@gmail.com

## **Resumo**

O objetivo do trabalho é estudar a influência do comportamento viscoelástico de concretos asfálticos nos parâmetros de fadiga, em concretos asfálticos com ligantes modificados por polímeros SBS e EVA (CAP 50/70 e CAP 30/45), e em mistura morna. Misturas de concreto asfáltico preparadas com granulares de origem rochosa granítica são preparadas de acordo com metodologia fundamental (metodologia francesa). O comportamento viscoelástico é estudado no ensaio de Módulo Complexo a flexão alternada, nas temperaturas de -10°C a 40°C e nas frequências de 1Hz a 30Hz, basicamente, no plano COLE-COLE (módulo real e imaginário); relacionando-o ao parâmetro da fadiga (deformação para  $10^6$  ciclos). Os gráficos no plano COLE-COLE mostram modificações da parte imaginária do módulo complexo (diminuição na modificação com EVA, SBS...) e da parte real (aumento na modificação com SBS...) nos domínios das temperaturas e das frequências estudadas. Os valores máximos da parte imaginária do módulo complexo revelam as temperaturas indicativas do ensaio de fadiga para cada tipo de concreto asfáltico. Translações das temperaturas críticas nas modificações por polímeros formam observadas. Os ensaios de fadiga são feitos à flexão alternada em modo contínuo, na temperatura de 10°C e 25Hz, e em 30°C e 25Hz para o concreto asfáltico de elevada consistência. A componente viscosa do módulo complexo revela que maiores os valores do módulo imaginário maior é energia perdida. Em todas as situações do estudo, os valores da deformação para  $10^6$  ciclos foram menores quando o valor da parte imaginária é menor. O comportamento do concreto asfáltico representado no plano COLE-COLE indica que as

temperaturas de realização dos ensaios de fadiga em 10°C e 25Hz poderiam não ser as temperaturas críticas para o ensaio.

## Resumen

El objetivo del trabajo es estudiar la influencia del comportamiento viscoelástico de concretos asfálticos en los parámetros de fatiga, en concretos asfálticos con ligantes modificados por polímeros SBS e EVA (CAP 50/70 e CAP 30/45), y en mezcla tibia. Mezclas de concreto asfáltico preparadas con granulares de origen granítico son preparadas de acuerdo con la metodología fundamental (metodología francesa). El comportamiento viscoelástico es estudiado en el ensayo de módulo complejo a flexión alternada, en las temperaturas de -10°C a 40°C y en las frecuencias de 1Hz a 30Hz, básicamente, en el plano COLE-COLE (módulo real e imaginario); relacionándolo al parámetro de fatiga (para deformación  $10^6$  ciclos). Los gráficos en el plano COLE-COLE mostraron modificaciones en la parte imaginaria del módulo complejo (disminución en la modificación con EVA, SBS...) en los dominios de las temperaturas y de las frecuencias estudiadas. Los máximos valores de la parte imaginaria del módulo complejo revelan las temperaturas indicativas del ensayo de fatiga para cada tipo de concreto asfáltico. Desplazamientos de las temperaturas críticas en las modificaciones por polímeros fueron observados. Los ensayos de fatiga son hechos a flexión alternada y en modo continuo, en la temperatura de 10°C e 25Hz, y en 30°C e 25Hz para el concreto asfáltico de elevada consistencia. La parte viscosa del módulo imaginario revela que con valore mayor de módulo imaginario hay mayor valore de energía perdida. En todas las situaciones del estudio, los valores de la deformación de ruptura para un millón de ciclos fueron menores cuando el valor de la parte imaginaria es menor. El comportamiento del concreto asfáltico representado en el plano COLE-COLE indica que las temperaturas de realización de los ensayos de fatiga en 10°C e 25Hz podrían no ser las temperaturas críticas para el ensayo.

## INTRODUÇÃO

As características viscoelásticas dos concretos asfálticos são muito bem mostradas na representação do módulo complexo no Plano COLE-COLE (representação da parte real no eixo das abscissas, no plano cartesiano, e da parte imaginária no eixo das ordenadas, no plano cartesiano). As modificações dos ligantes asfálticos por polímeros ou a adição de produtos na preparação das misturas mornas alteram os valores tanto do módulo elástico (módulo real) como do módulo perdido (módulo imaginário) e os valores da deformação para  $10^6$  ciclos. Busca-se, no presente texto, mostrar que modificadores dos ligantes asfálticos e aditivos de preparação de misturas mornas alteram tanto o módulo dinâmico como os valores da deformação para  $10^6$  ciclos.

Assim, o presente trabalho interpreta os efeitos da modificação dos ligantes por polímero SBS e EVA e os aditivos de preparação de misturas mornas nos gráficos resultantes do ensaio de módulo complexo, (plano COLE-COLE) em relação à fadiga. Observe-se que esta interpretação é feita nos limites deste conjunto de ensaios de laboratório, realizados no protótipo de máquina de fadiga e módulo (FADECOM I) desenvolvido e construído no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina. Os ensaios de Módulo Complexo foram realizados no intervalo de temperaturas de -10°C a 40°C e de frequências de 1Hz a 30Hz (norma AFNOR NF P 98-260-2, 1992) e o ensaio de fadiga na frequência de 25Hz e 10°C (norma AFNOR NF P 98-261-1 (exceto um ensaio a 30°C), ambos na flexão alternada, em modo contínuo, em corpos de prova trapezoidais. Todas as misturas foram preparadas com a mesma granulometria e mesmos materiais pétreos.

Os concretos asfálticos herdam as características do cimento asfáltico que eles contem e possuem, então, comportamento viscoelástico e termosuscetível dependente da temperatura e da frequência da aplicação da força (De La Roche, 1996; Rivière, 1996; Francken, 1977; Saunier, 1968, Momm, 1998, Barra, 2009; Guerrero Pérez, 2013).

Para estudar os concretos asfálticos pode-se aplicar ao corpo viscoelástico uma tensão senoidal da forma:

$$\sigma = \sigma_m \text{sen}(\omega t) \quad (1)$$

No domínio das deformações suficientemente pequenas (inferiores a  $10^{-5}$ ) para que o material conserve o comportamento linear, resulta uma deformação defasada relativa de mesma frequência da tensão (De La Roche, 1996):

$$\varepsilon = \varepsilon_m \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (2)$$

O módulo complexo é definido como a relação entre a tensão senoidal pulsante aplicada ao material e a amplitude senoidal da deformação (De La Roche, 1996; Rivière, 1996):

$$E^*(i\omega) = \sigma^*(i\omega) / \varepsilon^*(i\omega) = \sigma_m / \varepsilon_m e^{i\varphi} = |E^*| e^{i\varphi} \quad (3)$$

$E^*$  é o módulo complexo;  $|E^*|$  é a norma do módulo complexo;  $\sigma^*$  e  $\varepsilon^*$  são os valores complexos de tensão e de deformação no tempo  $t$ ;  $\sigma_m$  e  $\varepsilon_m$  são os valores das amplitudes da tensão e da deformação;  $\omega = 2\pi f$  é a pulsação do sinal e  $f$  é a frequência da solicitação;  $\varphi$  é o ângulo de defasagem de retardo da deformação em relação tensão aplicada.

A defasagem  $\varphi$  entre a tensão e a deformação dá a ideia do caráter viscoso ou elástico do material. Se o ângulo  $\varphi = 0$ , o material é elástico.

O módulo complexo  $E^*$  pode ser escrito sob a forma:

$$E^* = E_1 + i E_2 \quad (4)$$

$E_1$  é a parte real, que representa a energia armazenada no material e que pode ser recuperada;  $E_2$  é a parte imaginária, que representa a energia perdida por atrito interno do material, comportamento viscoso irreversível.

A energia produzida por dissipação viscosa por ciclo e por unidade de volume é dada pela expressão:

$$\Delta W_i = \pi \varepsilon_i \sigma_i \text{sen}(\varphi_i) \quad (5)$$

$W_i$  é a energia no ciclo  $i$ ;  $\varepsilon_i$  é amplitude de deformação no ciclo  $i$ ;  $\sigma_i$  é amplitude de tensão no ciclo  $i$ ;  $\varphi_i$  é defasagem entre tensão e deformação no ciclo  $i$ .

O ângulo de defasagem varia no intervalo de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Neste intervalo a função seno é crescente. A energia dissipada é função do produto da tensão e da deformação e do ângulo de defasagem, isto é, com a viscoelasticidade do concreto asfáltico. A representação do módulo complexo no plano COLE-COLE (equação 4) revela os valores da parte imaginária, da parte real, e o respectivo ângulo de fase (figura 1).

A simples verificação da redução do ângulo de fase (como é corrente para a relação  $G \text{sen}(\varphi)$ ), não é suficiente para compreender a influência da modificação do concreto asfáltico, tanto em relação à fadiga como em relação ao módulo. É necessário observar o fenômeno no domínio das frequências (1Hz a 30Hz) e das temperaturas ( $-10^\circ\text{C}$  a  $40^\circ\text{C}$ ). O parâmetro relacionado à deformação permanente ( $G/\text{sen}(\varphi)$ ) não revela significado no plano complexo frequencial. Ainda, avaliar o comportamento do concreto asfáltico a partir do comportamento do ligante não é suficiente, pois o concreto asfáltico apenas herda as características viscoelásticas do ligante. A viscoelasticidade do concreto asfáltico é fortemente afetada pela granulometria da formulação e pelo tipo de finos

empregado. O estudo do ligante geralmente é realizado no plano do cisalhamento (G) e os concretos asfálticos são testados no plano normal (E). As relações entre eles se faz pelas constantes de Lamé. A verificação de que há alteração da parte real não indica diretamente vantagem ou desvantagem da modificação; a análise de vantagem se faz mediante o dimensionamento do pavimento.

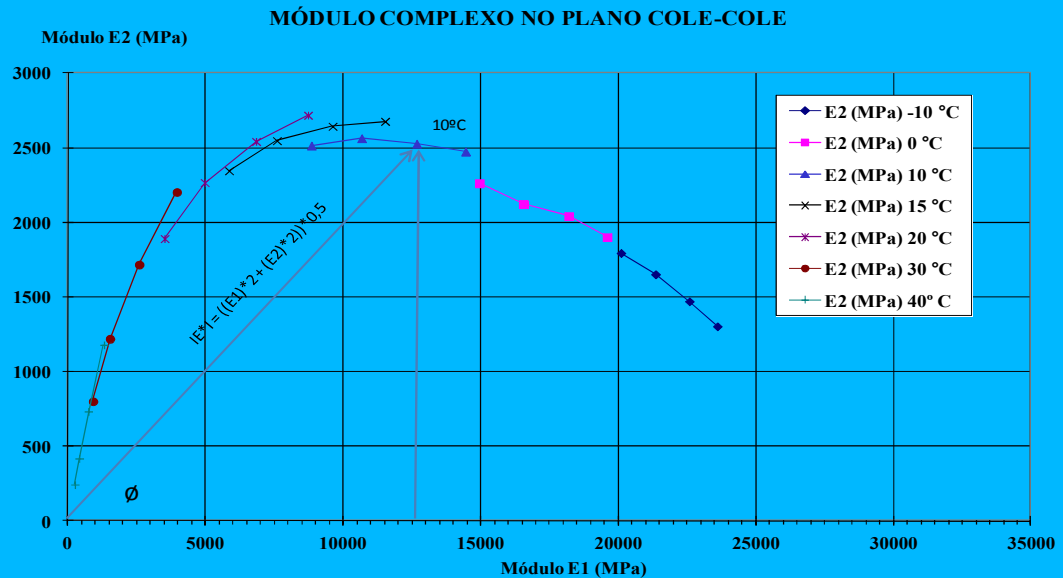


Figura 1. Representação do módulo no plano COLE-COLE

## CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO POR POLÍMERO EVA

O efeito da modificação por polímero EVA em concreto asfálticos preparado com CAP 50-70 pode ser observado no plano COLE-COLE (figura 2).

A modificação do CAP 50-70 por polímero EVA provocou redução dos valores de módulo imaginário em todo o domínio de temperaturas e frequências dos ensaios. Nas baixas temperaturas, a redução foi muito significativa; enquanto que para as altas temperaturas, a redução foi quase insignificante. A modificação por polímero EVA produziu a redução do módulo real nas baixas temperaturas e aumento nas altas temperaturas, e nas temperaturas intermediárias (20°C) não alterou o módulo real.

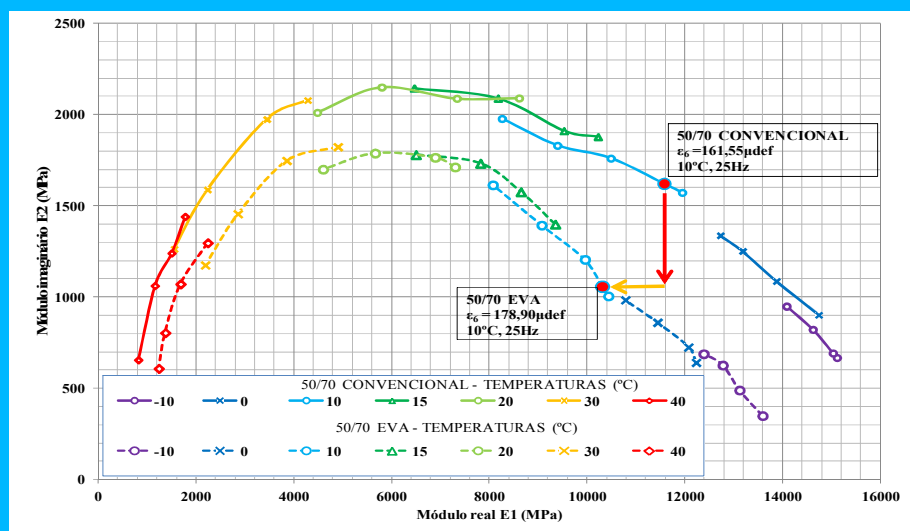


Figura 2. Módulo complexo – Concreto asfáltico com CAP 50-70 convencional e modificado por EVA (SHINOHARA, 2012)

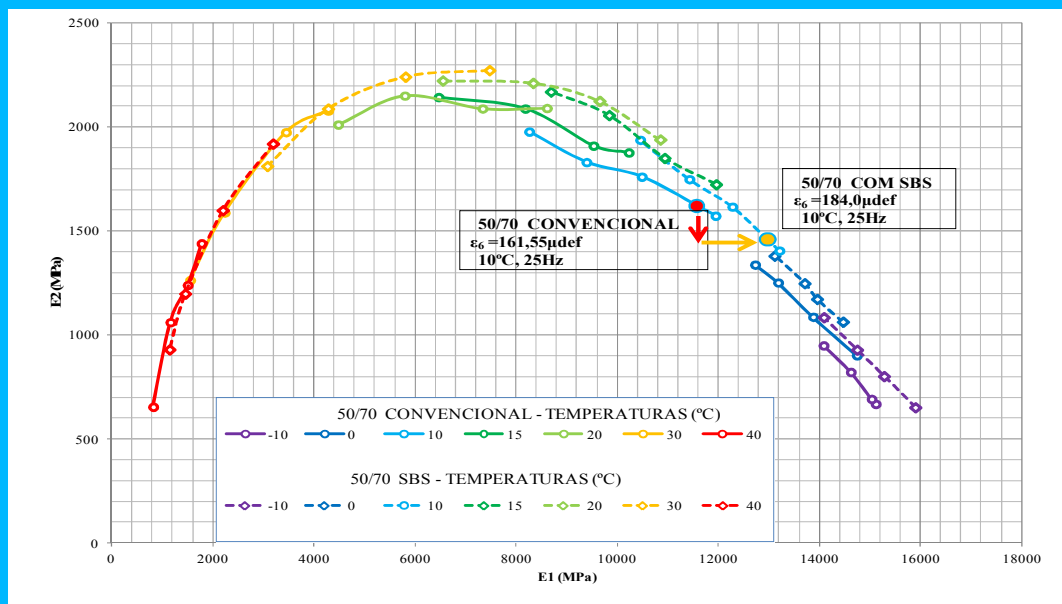
Os valores de deformação para  $10^6$  ciclos ( $\epsilon_6$ ) foram de 161,55 microdeformações na formulação com cimento asfáltico convencional e de 178,25 microdeformações para a formulação com cimento asfáltico modificado por polímero. O valor significativamente maior da deformação para  $10^6$  ciclos indica que a polimerização favoreceu muito a fadiga nesta temperatura. Este fenômeno está indicado no gráfico do plano COLE-COLE com a verificação da redução do valor do módulo imaginário.

Observa-se que em ambas as misturas testadas, os valores de deformação para  $10^6$  ciclos são valores mais elevados que os valores correntes encontrados. Na formulação com cimento asfáltico convencional, o valor esperado deveria se aproximar de 100 a 140 microdeformações. Com certeza, estes valores seriam obtidos se a fadiga fosse realizada em temperatura entre 15°C e 20°C. Embora as normas recomendem a realização dos ensaios de fadiga na temperatura de 10°C, a temperatura indicada para a realização dos ensaios de fadiga para estas formulações de concreto asfálticos seria entre 15°C e 20°C (ainda que pese o risco de haver deficiência na dissipação do calor durante o ensaio).

## CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO POR POLÍMERO SBS

A representação do módulo complexo do concreto asfáltico preparado com ligante CAP 50-70 convencional e com ligante CAP 50-70 modificado por polímero SBS revela que nas baixas temperaturas a modificação por polímero SBS provoca redução do módulo imaginário, mas nas altas temperaturas e temperaturas intermediárias provoca o aumento do módulo imaginário (figura 3).

O gráfico no plano COLE-COLE revela que o módulo real aumenta em todo o espectro de temperaturas, desde as baixas temperaturas até as altas temperaturas, embora com aumento não muito significativo.



**Figura 3. Módulo complexo no plano COLE-COLE do concreto asfáltico com ligante CAP 50-70 convencional e com ligante CAP 50-70 modificado por SBS**

Na temperatura de 10°C, na qual o ensaio de fadiga foi realizado, a deformação para  $10^6$  ciclos foi de 161,55 microdeformações para o concreto asfáltico preparado com CAP 50-70 convencional e de

184,0 microdeformações para o modificado por SBS. Nesta temperatura, a modificação por SBS favorece a fadiga significativamente.

No entanto, o valor máximo do módulo imaginário ocorre nas proximidades da temperatura de 20°C para o concreto asfáltico modificado por SBS. Isto significa que o valor de deformação para  $10^6$  ciclos deve ser menor se o ensaio for realizado nesta temperatura, que seria a temperatura crítica. Nas temperaturas altas, de 20°C a 40°C a modificação por polímero SBS pode ser prejudicial para a fadiga, reduzindo o valor de deformação para  $10^6$  ciclos.

## CONCRETO ASFÁLTICO DE ELEVADA CONSISTÊNCIA MODIFICADO POR SBS

O gráfico do módulo complexo no plano COLE-COLE (figura 4) revela que a modificação por polímero SBS no cimento asfáltico CAP 30-45 provoca redução do módulo imaginário em todo o domínio de temperaturas estudado em relação ao cimento asfálticos CAP 50-70 sem modificação. O módulo real do concreto asfáltico com CAP 30-45 modificado por SBS é inferior ao concreto asfáltico com CAP 50-70 sem modificação, em todo domínio de temperatura estudado.

O ensaio de fadiga realizado a 10°C e 25Hz revela o valor de 161,55 microdeformações para a deformação para  $10^6$  ciclos na mistura com cimento asfálticos CAP 50-70 e o valor de 199,0 microdeformações para a deformação para  $10^6$  ciclos da mistura de CAP 30-45 modificado com SBS. Nesta temperatura, a modificação por polímero SBS no cimento asfáltico de elevada consistência revela-se significativamente vantajosa na fadiga.

No entanto, a temperatura crítica para a fadiga seria nas proximidades da temperatura de 20°C para a mistura de CAP 30-45 modificada por polímero SBS, com a provável redução da deformação para  $10^6$  ciclos.

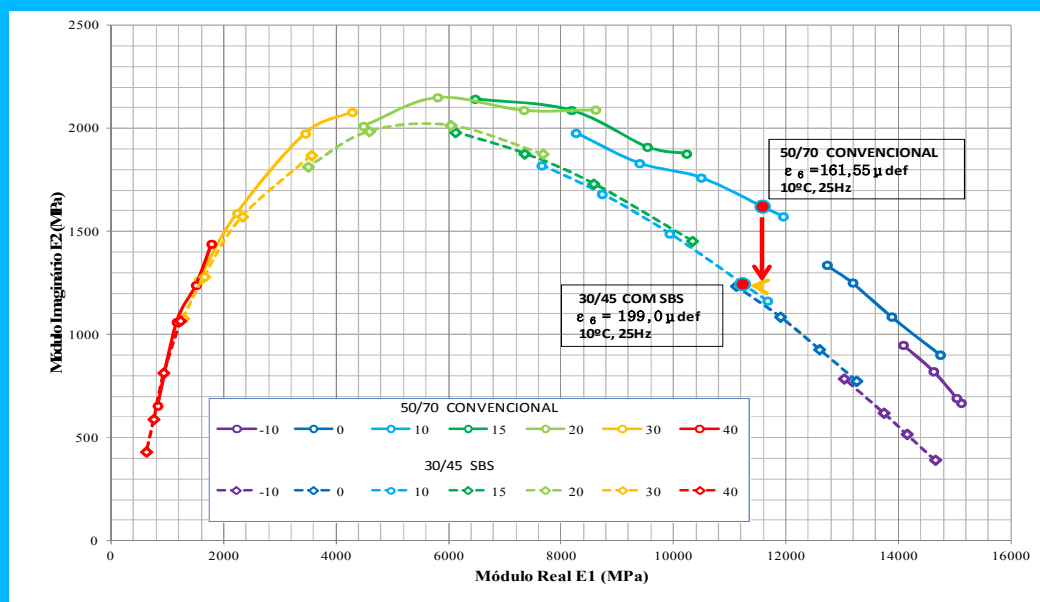


Figura 4. Módulo complexo no plano COLE-COLE de concreto asfáltico com cimento asfáltico com CAP 50-70 e com CAP 30-45 modificado por SBS

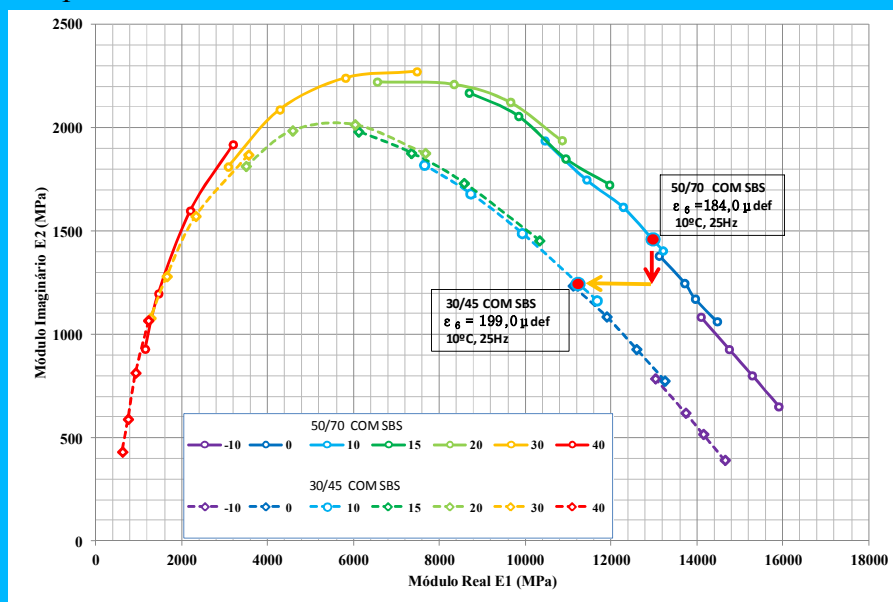
## CONCRETOS ASFÁLTICOS MODIFICADOS POR SBS – CAP 50-70 E 30-45

A representação do módulo complexo no plano COLE-COLE do concreto asfáltico modificado por polímero SBS revela redução do módulo imaginário para o concreto asfáltico com cimento asfáltico de maior consistência (CAP 30-45) em todo o domínio de temperaturas estudado, com valores mais significativos para as altas temperaturas (figura 5).

Os valores de módulo real no concreto asfáltico de maior consistência modificado por SBS são inferiores em todo o domínio de temperaturas e mais significativos nas baixas temperaturas.

O valor da deformação para  $10^6$  ciclos no ensaio de fadiga a  $10^\circ\text{C}$  e  $25\text{Hz}$  do concreto asfáltico com CAP 30-45 modificado com SBS é de  $199,0$  microdeformações e de  $184,0$  microdeformações para com CAP 50-70 modificado com SBS. Contudo, o módulo real é inferior no concreto asfáltico com ligante mais consistente.

A representação do módulo complexo no plano COLE-COLE revela que a temperatura crítica para a fadiga ocorre nas proximidades da temperatura de  $20^\circ\text{C}$  para concreto asfáltico com CAP 30-45 e CAP 50-70 modificados por polímero SBS (Figura 5). Ensaaios de fadiga executados nesta temperatura, com certeza apresentam valores de deformação para  $10^6$  ciclos inferiores aos valores encontrados na temperatura de  $10^\circ\text{C}$ .



**Figura 5. Módulo complexo no plano COLE-COLE dos concretos asfálticos com CAP 50-70 e CAP 30-45 modificados por polímero SBS**

## CONCRETO ASFÁLTICO MORNO COM ZEÓLITAS

Mistura de concreto asfáltico morno preparada com Zeólitas a partir de uso de ligante asfáltico CAP 50/70, de outra refinaria, tem aumento dos valores de módulo imaginário em praticamente todos os intervalos de frequências e temperaturas testados. No ensaio de fadiga realizado na temperatura de  $10^\circ\text{C}$  e  $25\text{Hz}$ , o valor da deformação de ruptura de 1 milhão de ciclos resultou menor para valor maior de módulo imaginário (figura 6).

O gráfico no plano COLE-COLE indica que o uso das Zeólitas para produzir o asfalto morno provocou aumento do módulo imaginário em todas as temperaturas, e aumento do módulo real nas temperaturas baixas e intermediárias e redução nas temperaturas altas.

O valor da deformação de  $10^6$  ciclos teve redução para o ensaio de fadiga na temperatura de  $10^\circ\text{C}$ .

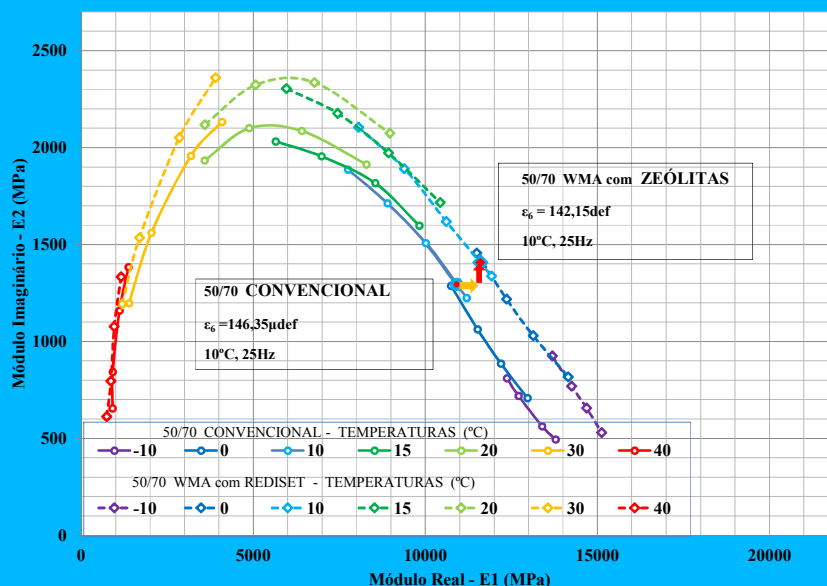


Figura 6. Módulo complexo no plano COLE-COLE dos concretos asfálticos com CAP 50-70 (outra refinaria) e concreto asfáltico morno com Zeólitas (Guerrero Pérez, 2013)

## FADIGA DOS CONCRETOS ASFÁLTICOS MODIFICADOS POR EVA E SBS

Os dois parâmetros que melhor particularizam a fadiga dos concretos asfálticos são a deformação para  $10^6$  ciclos e o expoente da equação de fadiga (LCPC - *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, 1997). Os resultados estão resumidos na tabela 1.

A deformação para  $10^6$  ciclos obtida no ensaio de fadiga serve para determinar a deformação admissível no dimensionamento do pavimento, aplicando os coeficientes de relação laboratório campo e de ajustamento. Segundo as diretrizes de dimensionamento dos pavimentos franceses, a deformação admissível é definida segunda a seguinte equação (LCPC – *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, 1997):

$$\varepsilon_{t,ad}(NE, \theta_{eq}, f) = \varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz}) \cdot [E(10^\circ\text{C})/E(\theta_{eq})]^{0,5} \cdot (NE/10^6)^b \cdot k_r k_c k_s \quad (6)$$

Em que  $\varepsilon_{t,ad}(NE, \theta_{eq}, f)$  é a deformação admissível do material em função do número de eixos (NE), da temperatura equivalente ( $\theta_{eq}$ ) e da frequência de solicitação (f);  $\varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz})$  é a deformação para  $10^6$  ciclos calculada com base nos resultados da curva de fadiga do material;  $E(10^\circ\text{C})$  é o módulo dinâmico medido à temperatura de  $10^\circ\text{C}$  e 10Hz;  $E(\theta_{eq})$  é o módulo dinâmico medido à temperatura equivalente ( $15^\circ\text{C}$ , 10Hz); NE é o número de eixos (130kN); b é o expoente (inclinação na escala log-log) da curva de fadiga;  $k_r$  é o coeficiente que ajusta a deformação admissível do material em relação ao risco escolhido;  $k_c$  é o coeficiente que ajusta a relação laboratório/campo;  $k_s$  é o coeficiente que ajusta a falta de uniformidade de suporte em campo.

A deformação para  $10^6$  ciclos é um parâmetro de elevada significância para o dimensionamento. O valor da deformação para  $10^6$  ciclos entra diretamente na equação (6) de determinação da deformação admissível. O valor do expoente da curva de fadiga entra diretamente como expoente



do número de eixos de dimensionamento. Pequenas variações deste parâmetro ocasionam variação econômica relevante, pois, determinam variações nas espessuras das camadas da estrutura do pavimento.

Tabela 1. Parâmetros de fadiga dos concretos asfálticos modificados por polímeros EVA e SBS e do concreto asfáltico morno com Zeólitas

Ligantes	CAP 50-70 (1)	CAP 50-70 (1)	CAP 50-70 (1)	CAP 30-45	CAP 50-70 (2)	CAP 50-70 (2)
Modificações	Convencional	EVA	SBS	SBS	Convencional	ZEÓLITAS
$\varepsilon_6$ ( $\mu\text{def}$ ) (10°C, 25Hz)	161,55	178,9	184	199	146,35	132,32
Variação (%)	0,00	10,74	13,90	23,18	0,00	-9,59
Expoente da fadiga (b)	-4,4507	-3,9114	-5,562	-6,228	-6,078	-3,485
Temperatura Crítica (°C)	15	15	20	20	20	20
	(1) Ligante asfáltico de refinaria I				(2) Ligante asfáltico de refinaria II	

Os ensaios de fadiga dos concretos asfálticos com ligantes modificados por polímero EVA e SBS revelam que na modificação por polímero EVA há aumento de 10,74% da deformação admissível em relação ao concreto asfáltico com ligante convencional (CAP 50-70). Isto significa redução da espessura da camada no dimensionamento da estrutura do pavimento.

O concreto asfáltico com modificação por polímero SBS ocasionou aumento da deformação admissível em 13,90% em relação ao concreto asfáltico com ligante convencional (CAP 50-70).

E o valor da deformação admissível do concreto asfáltico preparado com ligante asfáltico de maior consistência (CAP 30-45) modificado por polímero SBS revela-se 23,18% maior em relação a deformação admissível do concreto asfáltico convencional.

Em contrapartida, o concreto asfáltico morno com Zeólitas (preparado com CAP 50-70 de outra refinaria) teve o valor da deformação para  $10^6$  ciclos reduzido em relação ao convencional.

Por outro lado, a modificação do ligante por polímero EVA e concreto asfáltico morno com Zeólitas fizeram os materiais tornarem-se menos suscetíveis à variação do número de ciclos, enquanto as modificações por polímero SBS tornaram as curvas de fadiga mais suscetíveis à variação do número de ciclos, considerando valores dos expoentes das curvas de fadiga.

A temperatura crítica de fadiga, assumida como aquela indicada para realizar o ensaio de fadiga para obter-se o valor menor de deformação para  $10^6$  ciclos, não revelou variação com a modificação por polímero EVA (15°C), no entanto, a modificação por SBS indicou aumento desta temperatura crítica (20°C). No entanto, note-se que a temperatura crítica de concretos asfálticos preparados com ligantes de especificação antiga era de 10°C (figura 1) (Momm, 1998).

## CONCLUSÕES

Dos ensaios realizados e no domínio de aplicação deles, as seguintes conclusões podem ser estabelecidas, observando que podem existir modificações de ligantes que conduzem a situações diversas destas:

A modificação do ligante por polímero EVA ocasiona alteração do comportamento do concreto asfáltico, representado no plano COLE-COLE pela redução da parte imaginária do módulo no domínio de todas as temperaturas, pela redução da parte real do módulo no domínio das baixas temperaturas e aumento nas altas temperaturas.

A modificação do ligante por polímero SBS produz alteração do comportamento do concreto asfáltico, representado no plano COLE-COLE pela redução da parte imaginária e da parte real em todo o domínio das temperaturas testadas.

Verifica-se a relação direta entre a redução do módulo imaginário com o aumento da deformação de para  $10^6$  ciclos. A modificação, tanto a por EVA como a por SBS provocam redução do módulo imaginário e o consequente aumento da deformação para  $10^6$  ciclos, conforme verificado para a temperatura de  $10^\circ\text{C}$ , com a realização dos ensaios de fadiga. No concreto asfáltico morno com Zeólitas houve o aumento do módulo imaginário e a consequente redução do valor da deformação para  $10^6$  ciclos.

A modificação dos ligantes por polímeros, tanto por EVA como por SBS revelam aumento da deformação para  $10^6$  ciclos, na temperatura de  $10^\circ\text{C}$  e frequência de 10Hz.

Uma vez que a modificação pelos polímeros EVA e SBS alteram o módulo complexo, tanto a parte real com a parte imaginária, a verificação da vantagem da utilização dos mesmos deve ser verificada com a determinação da fadiga em condições de temperatura crítica e na condição de dimensionamento do pavimento.

A preparação de concreto asfáltico morno com Zeólitas, além de promover a alteração do módulo complexo com aumento de seu valor, revelou a redução do valor da deformação para  $10^6$  ciclos.

## REFERÊNCIAS

- Barra, B. S. (2009). Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- De La Roche, C. (1996). Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux - Expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse, Thèse de Doctorat, École Centrale de Paris.
- Francken, L. (1977). Module complexe des mélanges bitumineux, , *Bulletin de Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées*, n° Spécial V, pp. 181-198.
- Guerrero Pérez, Y. A. (2013). Avaliação do desempenho mecânico e reológico de misturas mornas. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- LCPC – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. (1997). French design manual for pavement structures - Guide technique, SERTRA – LCPC.
- Momm, L. (1998). Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico. Tese de Doutorado, EPUSP.
- Rivière, N. (1996). Comportement en fatigue des enrobés bitumineux, Thèse de Doctorat , Université de Bordeaux I.
- Saunier, J. (1968). Contribution à l'étude des propriétés rhéologiques des enrobés bitumineux, Thèse de Doctorat en Sciences Appliquées, Faculté des Sciences de Paris.
- Shinohara, K. (2012). Estudo do comportamento do concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA no módulo complexo e na fadiga. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.