

**IAG197-01-2013**  
**ESTUDO DO COMPORTAMENTO NO DOMÍNIO FREQUENCIAL E**  
**VISCOELÁSTICO DE MITURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO**  
**MODIFICADAS NO MÓDULO COMPLEXO**  
**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EN EL CAMPO DE LA**  
**FRECUENCIAL Y VISCOELÁSTICO DE MEZCLA ASFALTO**  
**MODIFICADA POR EL INTERMEDIO DE MÓDULO COMPLEJO**

Adosindro Joaquim de Almeida  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC  
Florianópolis, Brasil  
[aduzindo@yahoo.com.br](mailto:aduzindo@yahoo.com.br)

Leto Momm  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC  
Florianópolis, Brasil  
[leto.momm@gmail.com](mailto:leto.momm@gmail.com)

Carlos Fernande Quintero Quintero  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC  
Florianópolis, Brasil  
[civ\\_carlos@hotmail.com](mailto:civ_carlos@hotmail.com)

Breno Salgado Barra  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC  
Florianópolis, Brasil  
[brenobarra@gmail.com](mailto:brenobarra@gmail.com)

Gustavo Garcia Otto  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC  
Florianópolis, Brasil  
[otto.gus@gmail.com](mailto:otto.gus@gmail.com)

## **RESUMEN**

El presente trabajo trata del análisis de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros PR PLAST S e PR FLEX 20 y la verificación del comportamiento reológico en el plano COLE-COLE. En este gráfico, es posible evidenciar la evolución de la parte real e imaginaria de las mezclas asfálticas. El ensayo del módulo complejo es realizado a flexión alternada a dos puntos sobre el cuerpo de prueba trapezoidal a las temperatura -10°C, 0°C, 10°C, 20°C, 30°C, 40°C y para cada temperatura diferentes frecuencias (1Hz, 3Hz, 10Hz e 30Hz). Para este artículo fueron preparadas 3 mezclas asfálticas: BBM-3 (*Béton Bitumineux Mince* clase 3) con adición de PR FLEX 20, BBME-2 (*Béton Bitumineux Module Élevé* clase 2) con adición de PR PLAST S e GB-4 (*Grave Bitume* clase 4). Todas las mezclas utilizaron ligante convencional CAP 50/70 y los aditivos son aplicados directamente sobre los granulares en el momento de la mezcla. Las

mezclas fueron preparadas con dos curvas granulométricas, siendo una curva para las mezclas BBM-3 y GB-4 y la otra curva para la mezcla BBME-2. A partir del resultado de la representación del módulo complejo en el plano COLE-COLE, se obtuvo la temperatura de 20°C, la más crítica de las mezclas, o sea, donde la parte imaginaria es mayor, es decir, donde ocurriría la mayor pérdida de energía por fricción interna. Por lo tanto, esta sería la temperatura indicada para la realización del ensayo de fatiga.

## RESUMO

O presente trabalho trata da análise das misturas asfálticas modificadas com polímeros *PR PLAST S* e *PR FLEX 20* e a verificação do comportamento reológico no plano COLE-COLE. No plano COLE-COLE é possível evidenciar a evolução da parte real e imaginária das misturas asfálticas. O ensaio do módulo complexo é realizado a flexão alternada a dois pontos sobre o corpo de prova trapezoidal a temperaturas -10°C, 0°C, 10°C, 20°C, 30°C, 40°C e para cada temperatura diferentes frequências, de 1Hz, 3Hz, 10Hz e 30Hz. Para este estudo foram preparadas três misturas asfálticas: BBM-3 (*Béton Bitumineux Mince* classe 3) com adição de *PR FLEX 20*, BBME-2 (*Béton Bitumineux Module Élevé* classe 2) com adição de *PR PLAST S* e GB-4 (*Grave Bitume* classe 4). Todas as misturas utilizaram ligante convencional CAP 50/70 e os aditivos são aplicados diretamente sobre os granulares no momento da usinagem. As misturas foram preparadas com duas curvas granulométricas, sendo uma curva para as misturas BBM-3 e GB-4 e a outra curva para a mistura BBME-2. A partir do resultado da representação do módulo complexo no plano Cole-Cole, obteve-se a temperatura de 20°C a mais crítica das misturas, ou seja, onde a parte imaginária é maior, isto é, onde ocorreria a maior perda de energia por atrito interno. Portanto esta seria a temperatura indicada para realização do ensaio de fadiga.

## INTRODUÇÃO

A realização de um projeto de pavimento de misturas de concreto asfáltico passa por um processo de dimensionamento, em que são necessários conhecer as propriedades dos materiais a serem empregados na construção de estrada. O módulo complexo é um dos parâmetros fundamentais e necessário a dimensionamento do pavimento.

A mistura de concreto asfáltico é constituída de granulares e de ligante asfáltico, este último é o principal responsável pela característica viscosa das misturas asfálticas. A mistura asfáltica possui comportamento viscoelástico e termosuscetível.

A noção do módulo complexo ( $E^*$ ) é introduzida para generalizar as leis da mecânica dos princípios reservados aos corpos viscoelásticos, ele existe no domínio das baixas solicitações (micro deformação - da ordem de  $10^{-6}$  deformação) chamado domínio de comportamento linear onde o princípio de superposição de Boltzmann é válida (Rivière, 1996). Os materiais puramente elásticos podem ser caracterizados quantitativamente por duas constantes, o módulo de YOUNG e o coeficiente de POISSON. Mas, para os concretos asfálticos, a definição não pode ser a mesma. A mistura de concreto asfáltico herda as características do cimento asfáltico que o constitui, e possui, um comportamento viscoelástico e termosusceptível, ou seja, dependem da temperatura e da frequência da aplicação da carga (De La Roche, 1996; Rivière, 1996, Momm, 1998).

Neste trabalho foram preparadas três misturas das quais com os aditivos poliméricos *PR PLAST S* (base plastômero) e *PR FLEX 20* (junção de plastômeros e elastômeros). As misturas

preparadas são BBM-3 (*Béton Bitumineux Mince* classe 3) com adição de *PR FLEX 20*, BBME-2 (*Béton Bitumineux Module Élevé* classe 2) com adição de *PR PLAST S*, e GB-4 (*Grave Bitume* classe 4). Todas as misturas foram preparadas com ligante convencional CAP 50/70 e os aditivos foram adicionados sobre os granulares no momento da usinagem das misturas. As misturas foram preparadas com duas curvas granulométricas com diâmetro máximo igual a 15,9mm diferenciando-se nos teores de finos.

As misturas foram especificamente preparadas, com função diferentes e destinadas para camadas diferentes da estrutura de pavimento.

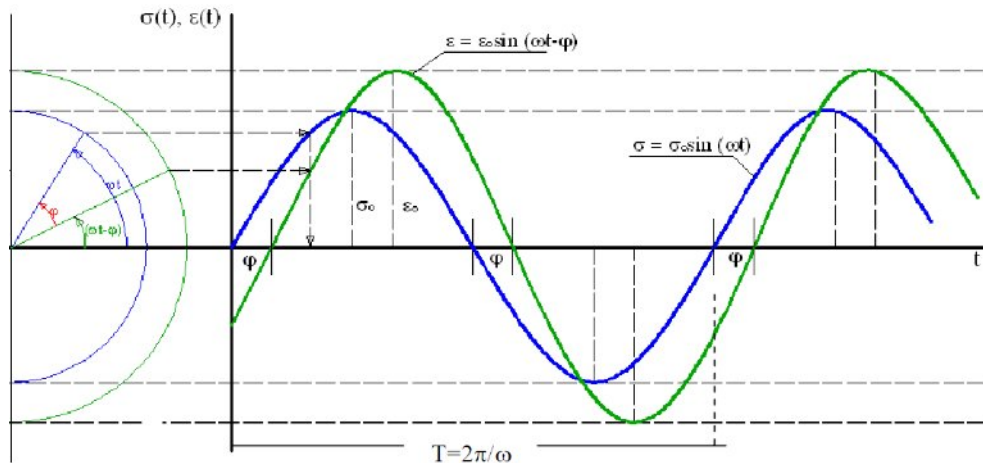
## MÓDULO COMPLEXO

O módulo complexo ( $E^*$ ) é a relação entre a tensão senoidal de pulsação ( $\omega$ ) aplicada ao corpo de prova e a deformação senoidal que resulta no regime estável, devido às características viscoelásticas do material, expressa pela Equação (1).

$$E^*(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{-i\varphi} = |E^*| e^{i\varphi} \quad (1)$$

A tensão senoidal de pulsação ( $\omega$ ) aplicada ao corpo de prova expressa pela Equação (2) a deformação atrasa pela resposta da tensão imposta ao corpo de prova conforme ilustrada na Figura 1. Isso traduz por ângulo de fase ou defasagem ( $\varphi$ ) entre os dois sinais expressos pela Equação (3). O ângulo de fase dá uma idéia de predominância viscosa ou elástica dos materiais, quando o ângulo de fase é zero grau ( $\varphi = 0^\circ$ ), o material apresenta uma característica puramente elástica e quando este é  $90^\circ$  ( $\varphi = 90^\circ$ ), o material é puramente viscoso (De la Roche, 1996; Rivière, 1996).

**Figura 1: Módulo complexo mediante flexão alternada no domínio, funções defasadas (Quintero, 2011)**



$$\sigma = \sigma_0 \text{Sen}(\omega t) \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_0 \text{Sen}(\omega t) \quad (2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \text{Sen}(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

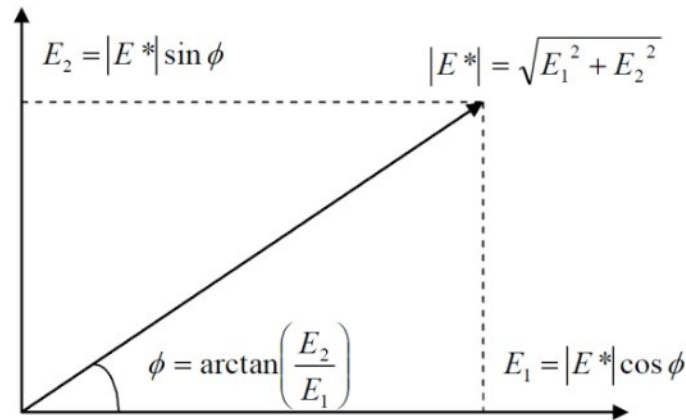
O módulo complexo é decomposto por dois elementos ou partes, imaginária e elástica conforme expressa a Equação (4) e ilustrada na Figura 2.

$$E^*(i\omega) = E_1 + iE_2 \quad (4)$$

Em que:

- $\sigma, \varepsilon$  são amplitude da tensão e da deformação;
- $\omega$  é  $2\pi f$  a pulsação do sinal e  $f$  é a frequência da solicitação;
- $\sigma^*, \varepsilon^*$  são valores complexo de tensão e da deformação;
- $\phi$  é ângulo de defasagem;
- $|E^*|$  é norma de módulo complexo ou de rigidez;
- $E^*$  é módulo complexo ou de rigidez;
- $E_1$  é módulo elástico dinâmico ou parte real (energia recuperada);
- $E_2$  é módulo imaginário (energia perdida) e
- $i$  é número complexo ( $i = \sqrt{-1}$ ).

**Figura 2: Representação de módulo complexo.**

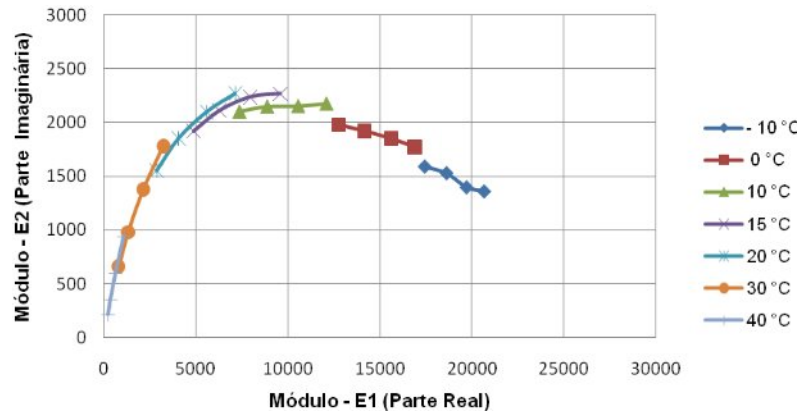


O comportamento reológico da mistura de concreto asfáltico pode ser representado através de diferentes formas de representação gráfica do módulo complexo. As representações gráficas correlacionam as variáveis: a frequência de solicitação, a temperatura, o ângulo de fase ( $\phi$ ), assim como a rigidez complexa  $|E^*|$ . Neste artigo, destaca-se a representação mais importante do comportamento viscoelástico das misturas asfáltico o Plano COLE-COLE que relaciona as partes reais e imaginárias.

### Plano COLE-COLE

O plano COLE-COLE um gráfico que relaciona a parte real ( $E_1$ ) do módulo complexo em função da parte imaginária ( $E_2$ ) em coordenadas aritméticas, obtém-se uma curva única semelhante a um arco de círculo. A curva do plano COLE-COLE caracteriza o material asfáltico, e também é usado para calibrar o modelo reológico ao comportamento mecânico do material. A Figura 3 ilustra a curva do Plano Cole-Cole (De la Roche, 1996; Momm, 1998, Baaj, 2002).

**Figura 3: Representação do Módulo Complexo de um Concreto Asfáltico no Plano COLE-COLE (Momm, 1998)**



## DEFINIÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA

As curvas granulométricas definidas para pesquisa são de graduação densa. Para a determinação da curva é fixado o tamanho máximo da peneira 15,9mm.

As curvas granulométricas definidas pela pesquisa são calculadas pela Equação (5).

$$p = 100 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (5)$$

Onde:

p é a porcentagem que passa na peneira de abertura d;

a é a uma constante igual a 100;

d é menor diâmetro da peneira (mm);

D é o diâmetro máximo de abertura da peneira que passa 100% (mm) e

n é expoente da curva granulométrica.

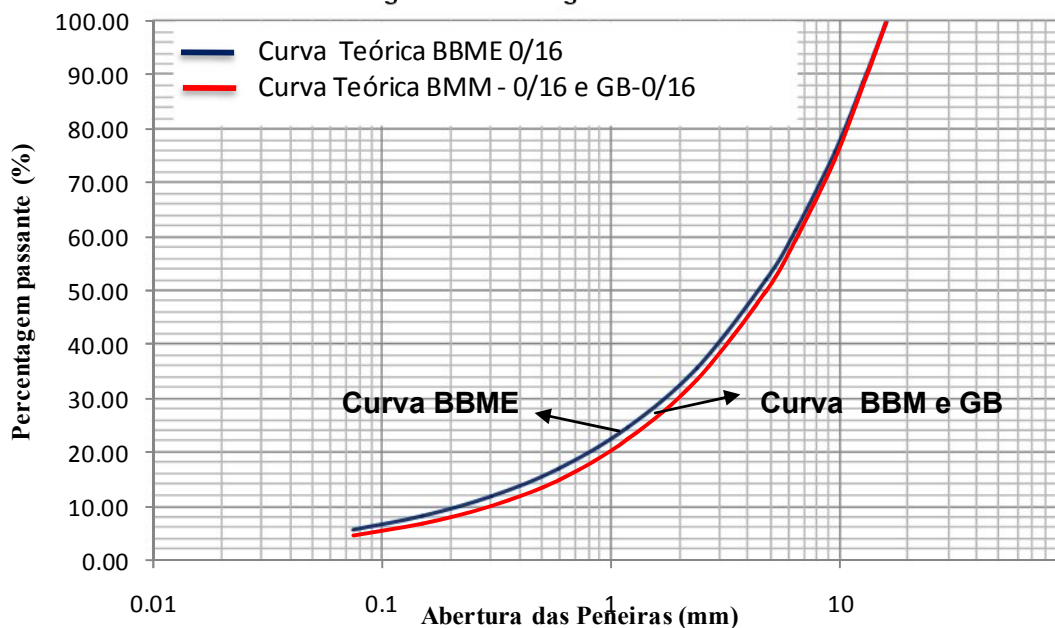
A distribuição granulométrica é mostrada na Tabela 1 e são ilustradas na Figura 4.

**Tabela 1: Distribuição granulométrica**

<b>MISTURA</b>		<b>MISTURA</b>	
<i>Béton Bitumineux Mince e Grave Bitume</i>		<i>Béton Bitumineux Module Élevé</i>	
Expoente n da curva granulométrica = 0,54		Expoente n da curva granulométrica = 0,58	
Abertura (mm)	Material Passante (%)	Abertura (mm)	Material Passante (%)
15,9	100,00	15,9	100,00
12,7	87,80	12,7	88,54
9,5	74,22	9,5	75,66
6,45	59,31	6,45	61,35
4,76	49,75	4,76	52,05
2,38	33,30	2,38	35,76

1,19	22,30	1,19	24,57
0,59	14,85	0,59	16,80
0,3	10,04	0,3	11,65
0,15	6,72	0,15	8,00
0,075	4,5	0,075	5,5

Figura 4: Curva granulométrica



## CARACTERÍSTICAS DOS ADITIVOS

### Aditivo PR PLAST S

O *PR-PLAST S* é um aditivo do tipo plastômero, composto de poliolefina termoplástica, destinado a melhorar as características mecânicas das misturas asfálticas. A taxa de adição na mistura asfáltica está compreendida entre 0,4% e 0,8% em peso total da mistura asfáltica.

### Aditivo PR FLEX 20

O *PR FLEX 20* é um aditivo composto basicamente de uma mistura de elastômero e plastômero por um ligante asfáltico especial, em que a composição é de 30% de asfalto e 70% de polímeros. A taxa de adição na mistura está entre 5 à 10% de ligante.

### Taxa de Adição dos Aditivos

A taxa utilizada dos aditivos na preparação das misturas asfálticas nesta pesquisa é baseada na média das taxas recomendadas pelo fabricante do aditivo. Na mistura BBME-2 é utilizada a taxa de 0,60% de *PR-PLAST S* sobre a massa da mistura de concreto asfáltico e para a mistura BBM-3 a taxa é de 7,00% de *PR-FLEX 20* sobre a massa do ligante asfáltico.

## ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO (RIGIDEZ)

A medida do módulo complexo foi realizada por ensaio dinâmico de flexão alternado a dois pontos sobre o corpo de prova trapezoidal de dimensão 70mm de base inferior, 25mm de base superior e 250mm de altura.

As flechas e as amplitudes de deslocamento são calculadas antes do início dos ensaios. O deslocamento imposto no ensaio de módulo complexo é de  $40\mu$ deformação, menor que  $50\mu$ deformação a máxima estabelecida pela norma AFNOR P 98-260-2, 1992. A amplitude sinusoidal é aplicada sobre a base superior (ou menor) do corpo de prova conforme ilustra a imagem da Figura 5.

**Figura 5: Aparelho e ensaios à flexão de 2 pontos**



O ensaio de módulo complexo consiste em submeter o corpo de prova a uma solicitação senoidal a diferentes temperaturas. O espectro de temperaturas do ensaio é de  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$  e  $40^{\circ}\text{C}$ . Para cada temperatura o módulo é medido a diferentes frequências de 1Hz, 3Hz, 10Hz e 30Hz.

## RESULTADO DE ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO

A característica quanto à rigidez das misturas de concreto asfáltico é determinada a partir do ensaio de módulo complexo.

Neste trabalho, o ensaio de Módulo Complexo é realizado à flexão alternada a dois pontos (2PB) em modo contínuo. A amplitude de deslocamento é controlada, no domínio frequencial. Os corpos de prova foram submetidos à solicitações do tipo senoidal, em várias temperaturas e frequências de solicitação.

Os corpos de prova foram cortados e ficaram em repouso por um período de 15 dias. Após esse período, inicia-se o processo de triagem.



O processo de triagem consiste na eliminação dos corpos de prova até encontrarem os corpos de provas homogêneos e que atendem às condições de homogeneidade descritas na norma AFNOR P 98-260-2, 1992.

Uma vez que o ligante asfáltico é responsável pelo comportamento viscoelástico e termossusceptível das misturas asfálticas, vale lembrar que todas as misturas foram formuladas com o ligante CAP 50/70 com uma consistência média com penetração de  $65.10^{-1}$  mm.

A seguir, os resultados obtidos no ensaio do módulo complexo das misturas de concreto asfáltico são apresentados. A medida de módulo da mistura BBM-3 é feita num espectro de temperatura de 0°C, 10°C, 15°C, 20°C, 30°C e 40°C. Quanto às misturas BBME-2 e GB-4 são medidos os módulos nas temperaturas de -10°C, 0°C, 10°C, 15°C, 20°C, 30°C e 40°C.

Este espectro de temperatura testado permite verificar o comportamento do material nas altas e baixas temperaturas e diferentes frequências de sollicitação.

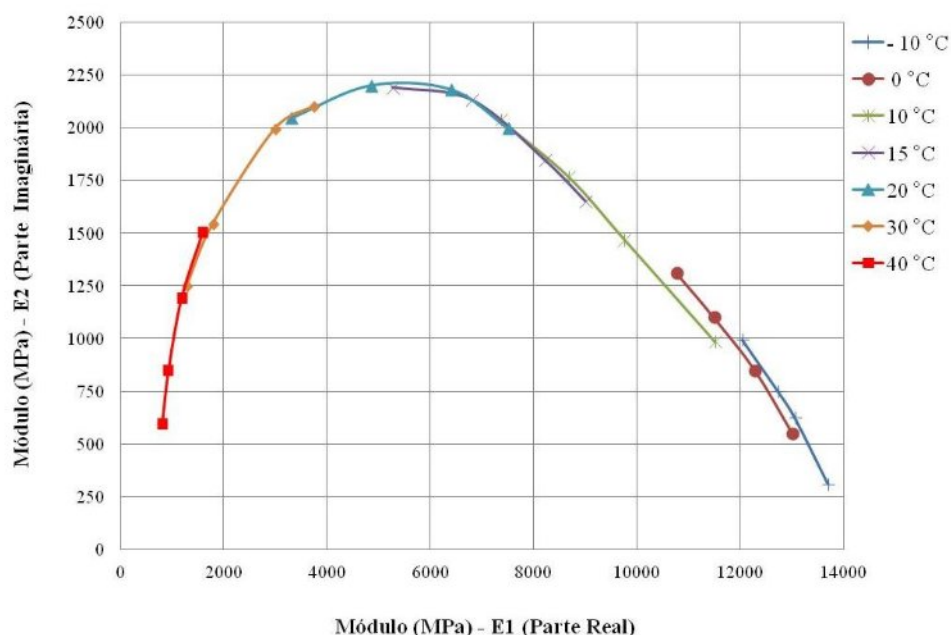
### Curva no Plano Cole-Cole

A partir dos resultados da curva no plano COLE-COLE do módulo complexo das misturas estudadas, percebe-se a evolução da parcela elástica e viscosa em função da temperatura e da frequência de sollicitação, com o aumento da temperatura, houve uma diminuição do módulo complexo e consequentemente o aumento do ângulo de fase, ou perda de energia.

Os valores máximos de módulo imaginário, para três misturas, ocorrem nas temperaturas de 15°C a 20°C, estas temperaturas são as indicadas para realização do ensaio de fadiga. A curva do plano COLE-COLE é também usada para calibrar o modelo de comportamento reológico do Huet-Sayegh.

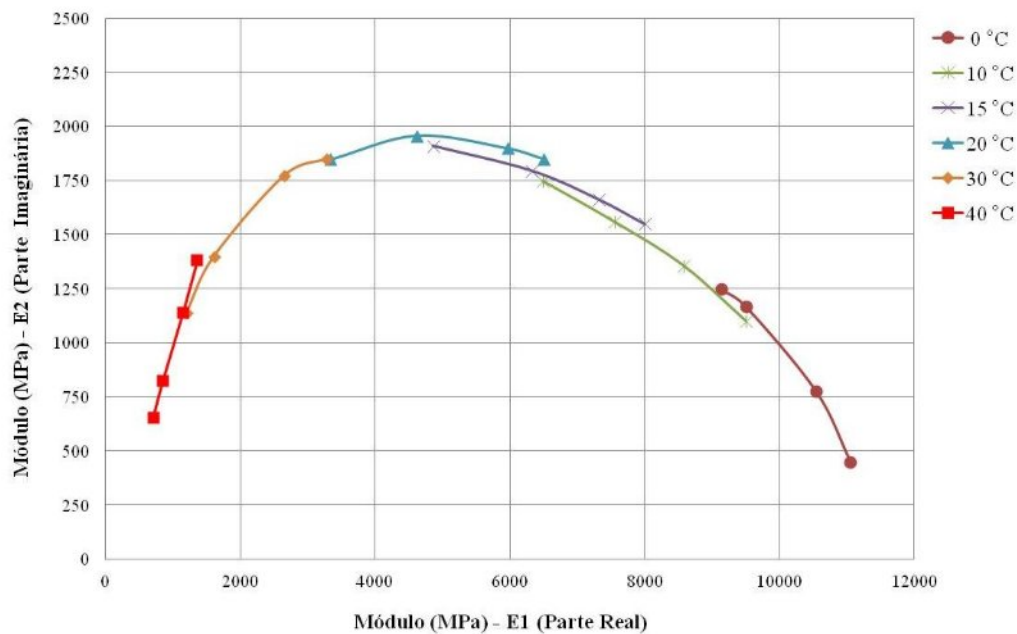
Nas Figuras 6, 7 e 8, encontram-se os resultados de representações das curvas no Plano Cole-Cole das misturas de concreto asfáltico BBME-2, BBM-3 e GB-4, respectivamente.

**Figura Error! No text of specified style in document.6: Representação do Módulo Complexo da mistura BBME-2 no Plano COLE-COLE.**

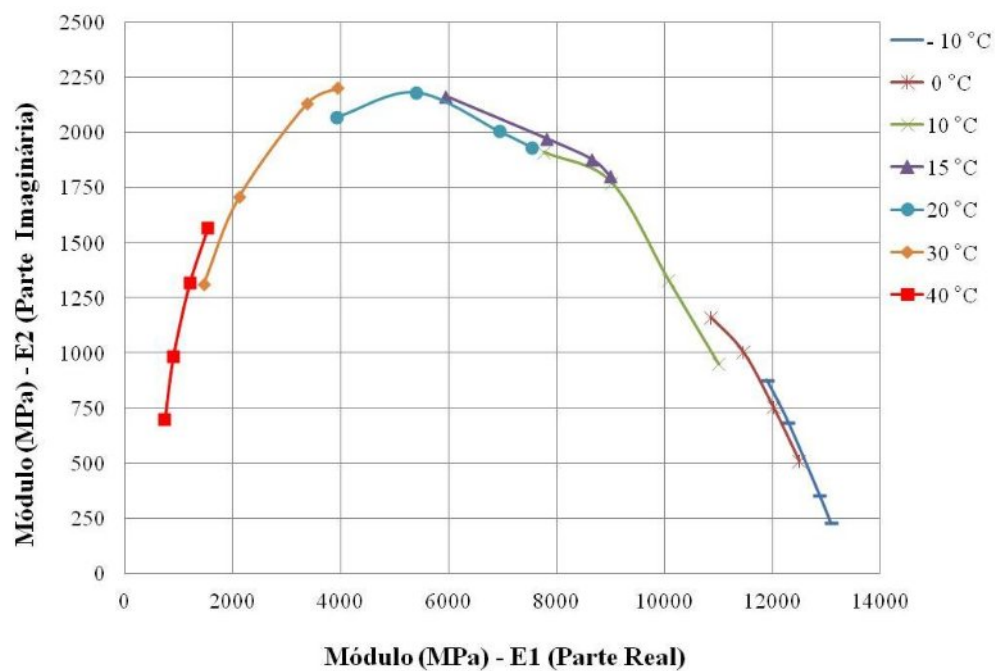




**Figura 7: Representação do Módulo Complexo da mistura BBM-3 no Plano COLE-COLE.**



**Figura 8: Representação do Módulo Complexo da mistura GB-4 no Plano COLE-COLE.**



## CONCLUSÕES

O ensaio de módulo complexo auxilia no entendimento das características do comportamento mecânico das misturas de concreto asfáltico. O módulo complexo é um dos parâmetros fundamentais das misturas de concreto asfáltico, pois é um dos parâmetros necessários a dimensionamento de pavimento, a rigidez do material. Os valores do módulo complexo encontrados no ensaio de módulo complexo em 15°C e 10Hz para as misturas são de 8.853Mpa para mistura GB-4, 8.421Mpa para mistura asfáltica BBME-2 e de 7.512Mpa para a mistura BBM-3.

Na representação do módulo complexo da curva do plano COLE-COLE evidencia a evolução da parte real e imaginária do módulo complexo das misturas de concreto asfáltico. Todas as misturas apresentam maior módulo imaginário na temperatura de 20°C, isto é, a temperatura mais crítica em que ocorreria a maior perda de energia. A mistura BBM-3 apresenta os valores mais afastados e baixo do módulo imaginário, ou seja, menor perda de energia pelo atrito interno do material, em relação as misturas BBME-2 e GB-4. As misturas BBME-2 e GB-4, assemelham-se quando ao comportamento no plano COLE-COLE.

A temperatura crítica de 20°C seria o mais indicado para realização do ensaio de fadiga para as misturas asfálticas estudadas neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Association française de normalisation- AFNOR P 98-260-2. Essais relatifs aux chaussées: Mesure des caractéristiques rhéologiques des mélanges hydrocarbonés. Partie 2: Détermination du module complexe par flexion sinusoïdale, 1992.
- Baaj, Hassan. 2002. Comportement a la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés, Thèse de Docteur. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- De La Roche, C. (1996), Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux, expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Paris.
- Momm, L. 1998. Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotestura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico. Tese de Doutorado, São Paulo, 259p.
- Quintero, Carlos. 2011. Fernando Quintero. Estudo de misturas asfálticas com ligantes de consistência elevada: formulação e comportamento mecânico, Dissertação, Florianópolis. 229p.

Rivière, N. 1996. Comportement en fatigue des enrobés bitumineux, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I.