



**AVALIANDO O MÓDULO VISCOELÁSTICO COMPLEXO DE COMPÓSITO  
CARBONO-CARBONO POR VIBRAÇÃO FORÇADA**

**José Célio Dias**

Prof. Titular, Escola Federal de Engenharia de Itajubá  
CP 50 – CEP 37500-903 – Itajubá – MG – Brasil – E-mail: [jcelio@iem.efei.br](mailto:jcelio@iem.efei.br)

**Marcelo da Silva Ribeiro**

Doutorando (CAPES), Escola Federal de Engenharia de Itajubá – E-mail: [Marcelo@iem.efei.br](mailto:Marcelo@iem.efei.br)

**Paulo Fernandes Silva**

Prof. Adjunto, Escola Federal de Engenharia de Itajubá – E-mail: [psilva@iem.efei.br](mailto:psilva@iem.efei.br)

**Vilmar Arthur Schwarz**

Prof. Adjunto, Escola Federal de Engenharia de Itajubá – E-mail: [vilmar@iem.efei.br](mailto:vilmar@iem.efei.br)

**Resumo**

*Um estudo experimental foi realizado para avaliar o módulo viscoelástico complexo de compósitos carbono-carbono. Para estes materiais este módulo dependerá dos materiais utilizados, da fração volumétrica e dos detalhes do processo de fabricação. Considerando-se que os fabricantes utilizam métodos de produção distintos, além de diferentes materiais componentes, torna-se necessário determinar as propriedades mecânicas das amostras como produto final acabado. Uma alternativa para se caracterizar as propriedades dinâmico-mecânicas desses materiais é o uso de técnicas não destrutivas (non destructive evaluation – NDE). Utilizando-se uma destas técnicas, vigas desses materiais foram submetidas a ensaios de vibrações forçadas. Em laboratório as amplitudes transversais de vibração foram obtidas em dois pontos da viga, utilizando-se um analisador de vibrações. Ambas as leituras foram registradas simultaneamente, bem como o ângulo de fase referente às amplitudes nestes pontos. Este procedimento experimental permitiu determinar o módulo viscoelástico complexo de vigas de carbono reforçado com fibras de carbono.*

**Palavras-chave:** técnicas não destrutivas, vibração forçada, compósitos carbono-carbono.

## 1. COMPÓSITO CRFC

O compósito CRFC apresenta desempenho diferente dos materiais metálicos e cerâmicos, em termos de resistência mecânica e principalmente capacidade térmica. Este material possui um baixo coeficiente de atrito, permitindo ser aplicado em selos de mancal de eixo rotativo e camisa de pistão. Devido a sua boa resistência em altas temperaturas, o compósito pode ser usado em matrizes e moldes para pressão à quente. A tenacidade e a condutividade elétrica são exploradas em elementos de construção de fornos e eletrodos de grafite para refino de metais. A alta pureza do compósito CRFC, conjugando resistência à quente e radiação ionizante, sugere a sua aplicação na área nuclear, em dutos e reatores de potência. No campo médico tem excelente biocompatibilidade, sua porosidade e o módulo de elasticidade pode ser similar ao realizado pela estrutura óssea, podendo ser aplicado em placas de ossos, próteses de quadril, implantes ortopédicos e cirurgia dentária.

Estes exemplos demonstram a versatilidade do emprego do material compósito de carbono reforçado com fibras de carbono aplicados numa larga variedade de extremas situações de desempenho, onde a combinação de propriedades mecânicas, químicas, térmicas, elétricas e de microestrutura, tem encontrado novas possibilidades de uso.

As pesquisas têm sido dedicadas aos estudos da influência da fração volumétrica e orientações espaciais das fibras de carbono nos compósitos. São também analisadas as correlações existentes entre as características da fibra de carbono e os parâmetros de obtenção, Thomas (1993). Com relação ao processo de fabricação, a operação final de acabamento do compósito CRFC passa por um ou mais processos de usinagem e o conhecimento de suas características de usinabilidade torna-se um ponto relevante para o aprimoramento do processo de obtenção destes compósitos. Entre as pesquisas em andamento, pode-se citar ainda as relacionadas à avaliação das propriedades dinâmico-mecânicas.

Como nos materiais carbonosos e grafiticos convencionais, os componentes individuais do compósito CRFC apresentam ampla variedade de propriedades, decorrentes dos diferentes graus de ordenações estruturais. As propriedades do compósito dependem do projeto da pré-forma, do tipo de fibra, da seleção da matriz e do processo de obtenção. A possibilidade da conjugação de fibras e matrizes permite que o compósito CRFC apresente propriedades adequadas em função de sua aplicação, inclusive de maneira anisotrópica em direções específicas, através da adequada distribuição de fibras no reforço, Buckley e Edie (1993). Os parâmetros que mais influenciam no amortecimento destes materiais são: tipo de fibra de carbono usada, fração volumétrica das fibras, interação fibra/matriz e tipo de tecido.

Tecidos são uma forma comum de filamentos interlaçados muito utilizados na fabricação de CRFC e são caracterizados pelo espaçamento entre mechas adjacentes, tamanhos da mecha, porcentagem de fios em cada direção, eficiência de empacotamento da mecha e pela complexidade do entrelaçamento dos fios.

Durante a moldagem a matriz impregnante é alojada entre dois tecidos e por conseqüência podem originar porosidades pelo aprisionamento de ar. A quantidade de porosidade gerada após a carbonização não depende somente do arranjo das fibras, mas, também, de muitos outros parâmetros como adesão fibra/matriz, ciclo de cura, etc. As Figuras (1) e (2) ilustram as configurações básicas dos tecidos de fibra de carbono utilizados, com indicações das direções: urdume e trama. Para os compósitos oriundos do tecido Twill 2x1 ocorre perda de peso da fibra influenciando no aumento de porosidades. Este tecido possui tela (ou malha) do tipo "Basket", onde a trama alterna dois cabos do urdume na face superior e um cabo do urdume na face inferior.

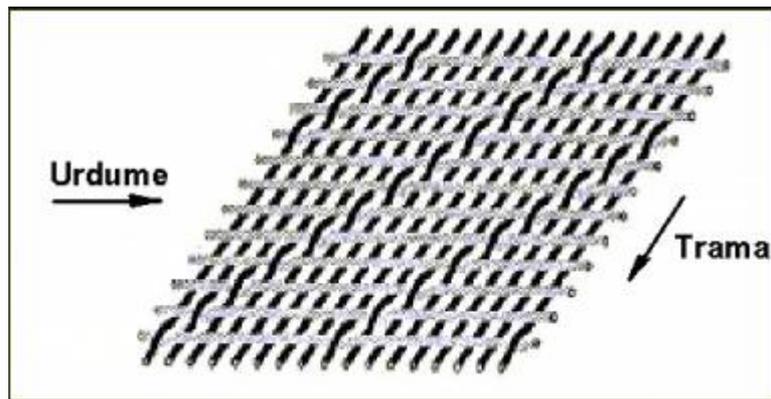


Figura 1. Representação esquemática da arquitetura do tecido CRFC do tipo 8HS

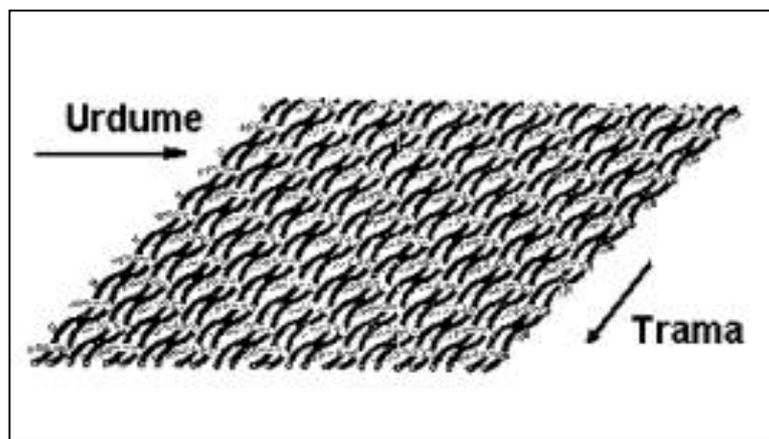


Figura 2. Representação esquemática da arquitetura do tecido CRFC do tipo Twill

## 2. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DINÂMICO-MECÂNICAS

As amostras de CRFC não podem ser ensaiadas à tração com técnicas similares às utilizadas para amostras de metais. Se uma amostra de CRFC é carregada em ensaio de tração, usando-se as garras de fricção de forma tradicional, a combinação das tensões de compressão e o dano causado pela “pressão” da garra podem provocar a ruptura prematura da amostra nessa região. Dai a necessidade de se desenvolver um método confiável para avaliação das propriedades mecânicas destes materiais.

No caso do aço, o módulo de elasticidade de amostras obtidas por diferentes fabricantes, pode ser considerado o mesmo. Tradicionalmente, o módulo de elasticidade é obtido à partir da parte linear da curva tensão-deformação elaborada a partir do ensaio de tração. Para as amostras de CRFC o módulo de elasticidade dependerá dos materiais utilizados, da fração em volume dos materiais e dos detalhes do processo de fabricação. Considerando-se que os fabricantes utilizam métodos de produção distintos, além de diferentes materiais componentes, torna-se necessário medir o módulo de elasticidade das amostras como produto final acabado.

Uma alternativa para caracterizar as propriedades dinâmico-mecânicas dos materiais é a avaliação não destrutiva - non destructive evaluation (NDE). Uma variedade de técnicas NDE é usada para avaliação da integridade dos materiais compósitos. Ela inclui métodos de propagação de ondas, como o pulso ultra-sônico e a frequência de ressonância.

Muitas técnicas NDE com o propósito de avaliar o módulo viscoelástico complexo dos materiais compósitos foram desenvolvidas por Paxson (1975), Greif e Johnson (1991), Greif e Hebert (1992), Li e Weng (1997), Vaidya, Raju e Kowbel (1992), Vaidya e Raju (1994) e Cawley e Adams (1978).

Estas pesquisas combinaram procedimentos teóricos e experimentais através de ensaios por vibrações mecânicas. Por exemplo, uma viga CRFC de comprimento  $2L$  pode ser submetida a um ensaio de vibração transversal com excitação atuando no centro. Através de um analisador de vibração obtém-se a amplitude transversal em dois pontos da viga. Ambas as leituras, no ponto de excitação e em uma extremidade livre, devem ser registradas simultaneamente. Também, deve ser registrado o ângulo de fase  $\phi$  referente às amplitudes nestes pontos, conforme mostra a Fig. (3). Este ensaio permite avaliar o desvio do comportamento elástico ideal sob deformações cíclicas para as vigas de CRFC.

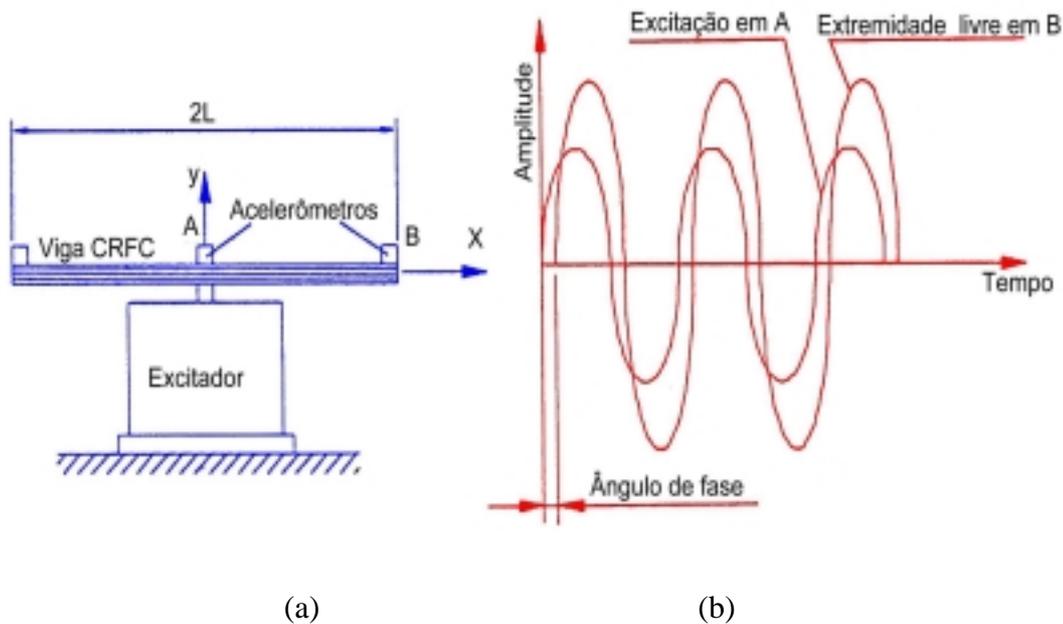


Figura 3. Esquema do arranjo experimental para teste por vibração forçada

### 3. CONCEITO DE MÓDULO VISCOELÁSTICO COMPLEXO

O estudo de vibrações em vigas é bem documentado e discutido em vários livros textos e artigos em periódicos como em Den Hartog (1956), Thomson (1976), Hess (1964), Lee (1973), Maurizi, Rossi e Reyes (1976) e Pestel e Leakie (1963). Utilizando-se de métodos matriciais, pode-se equacionar as amplitudes em qualquer posição ao longo da viga. Para o arranjo mostrado na Fig. (3), considerando pequenas amplitudes para a viga de comprimento  $L$ , pode-se escrever a equação:

$$y_B = y_A \cdot e^{i\omega t} \left\{ \frac{\cos \phi + \cosh \phi}{1 + \cos \phi \cosh \phi + \frac{m_p}{m} \phi (\sinh \phi \cos \phi - \sin \phi \cosh \phi)} \right\} \quad (1)$$

Designando o parâmetro  $\bar{H}$  como sendo a relação entre a amplitude na extremidade livre e a amplitude na posição de excitação (leituras obtidas através de acelerômetros), resulta;

$$\bar{H} e^{-i\phi} = \frac{\cos \phi + \cosh \phi}{1 + \cos \phi \cosh \phi + \frac{m_p}{m} \phi (\sinh \phi \cos \phi - \sin \phi \cosh \phi)} \quad (2)$$

Onde  $\varphi$  é o ângulo de fase entre as amplitudes no ponto de excitação e na extremidade da viga, sendo  $m_p$  a massa concentrada (acelerômetro) e  $m$  a massa da viga de CRFC.

A equação anterior ainda pode ser escrita na forma:

$$J - iK = \frac{\cos \phi + \cosh \phi}{1 + \cos \phi \cosh \phi + \frac{m_p}{m} \phi (\sinh \phi \cos \phi - \sin \phi \cosh \phi)} \quad (3)$$

O parâmetro  $\bar{H}$  bem como o ângulo de fase  $\varphi$  são obtidos experimentalmente para diferentes valores da frequência de excitação  $f$ . Com os valores de  $\bar{H}$  e  $\varphi$  pode-se avaliar o valor de  $\phi$ , sendo este parâmetro um número complexo escrito na forma:  $\phi = \phi' + i\phi''$ .

O módulo viscoelástico complexo pode ser escrito na forma:

$$E = \frac{A\rho 4\pi^2 f^2}{I} \left( \frac{L}{\phi} \right)^4 \quad (4)$$

Onde  $A$  é a área da seção transversal,  $I$  é o momento de inércia e  $\rho$  é a massa específica da viga. Sendo  $\phi$  um número complexo esta equação é constituída de duas parcelas, uma real e a outra imaginária. Logo, pode-se escrever que:  $E = E' + iE''$ .

Normalmente,  $E$  é denominado de módulo viscoelástico complexo. A parte real (relacionada com a energia elástica armazenada em cada ciclo) é representada por  $E'$  e a parte imaginária (relacionada com a energia viscosa dissipada com o calor em cada ciclo) é representada por  $E''$ . A razão entre a parte imaginária deste módulo e a parte real é chamada de fator de dissipação ou de perda do compósito, designado por  $\eta$ . Portanto,  $\eta = E''/E'$ .

As parcelas  $E'$ ,  $E''$  e  $\eta$  são dependentes do tempo e da temperatura; logo os ensaios são realizados adotando os procedimentos: (1) intervalo de frequência a uma temperatura constante ou (2) intervalo de temperatura a uma frequência constante.

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A coleta de dados foi obtida utilizando os seguintes equipamentos: Excitador de Vibração B&K, Amplificador de Potência B&K, Gerador de Função SFG, Medidor de Vibração B&K e Analisador de Vibração HP. A tabela 1 apresenta os materiais, dados geométricos e massa das vigas ensaiadas.

Tabela 1. Dimensões e massa dos materiais ensaiados

Compósito CRFC	L(mm) comprimento	b(mm) - largura da seção transversal	h(mm) - altura da seção transversal	m(g) massa
8HS-Trama moldado	217.00	15.00	2.30	11.86
Twill moldado	217.00	20.00	3.00	16.43

As figuras (3-6) apresentam as curvas médias dos resultados experimentais obtidos em laboratório e os resultados calculados conforme equações apresentadas para dois compósitos CRFC ensaiados em vibração forçada.

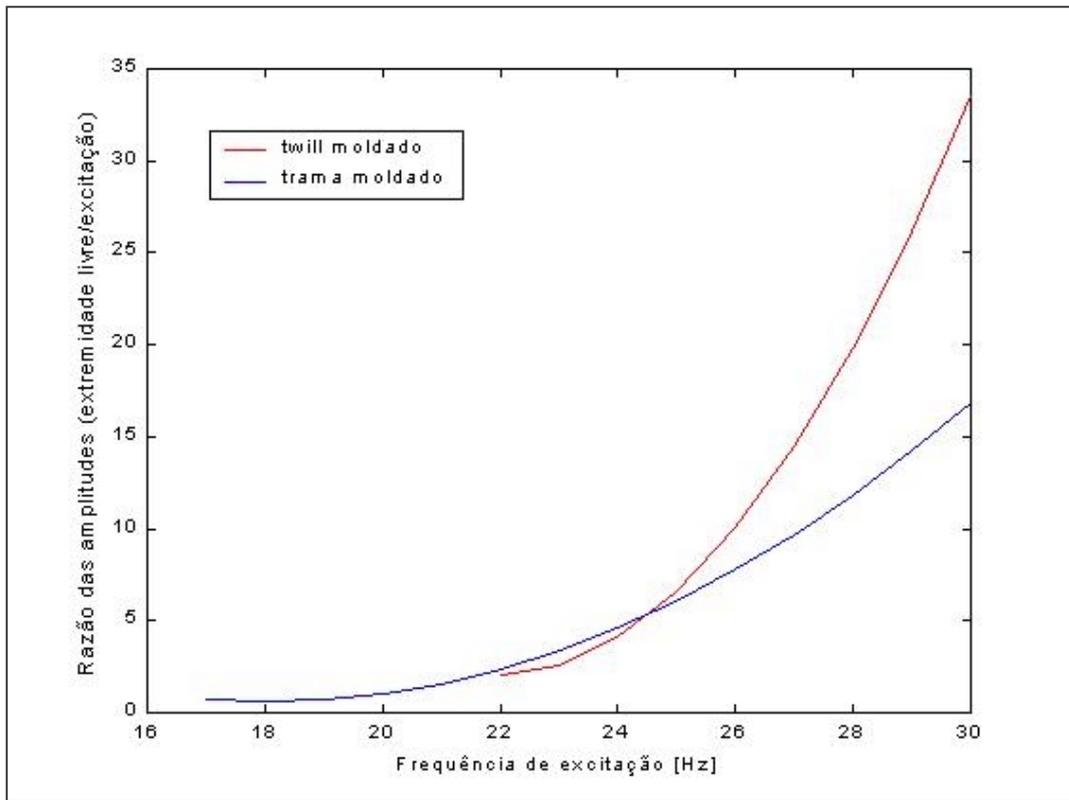


Figura 3. Razão das amplitudes em função da frequência de excitação

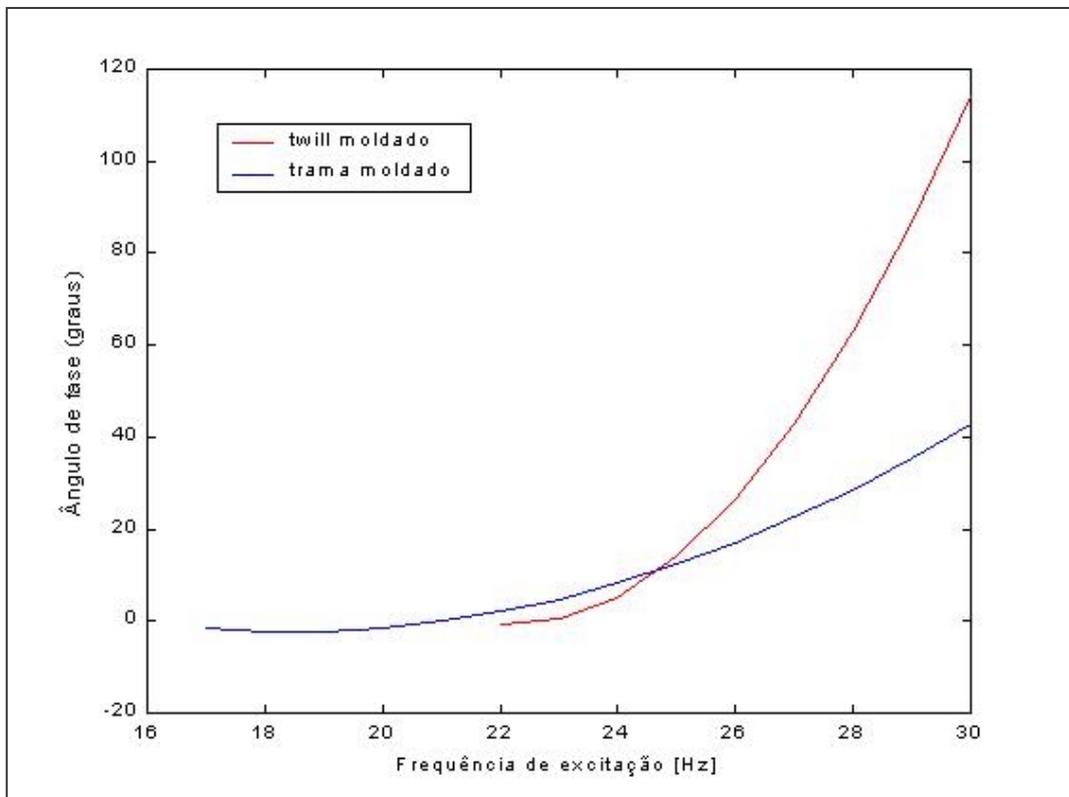


Figura 4. Ângulo de fase em função da frequência de excitação

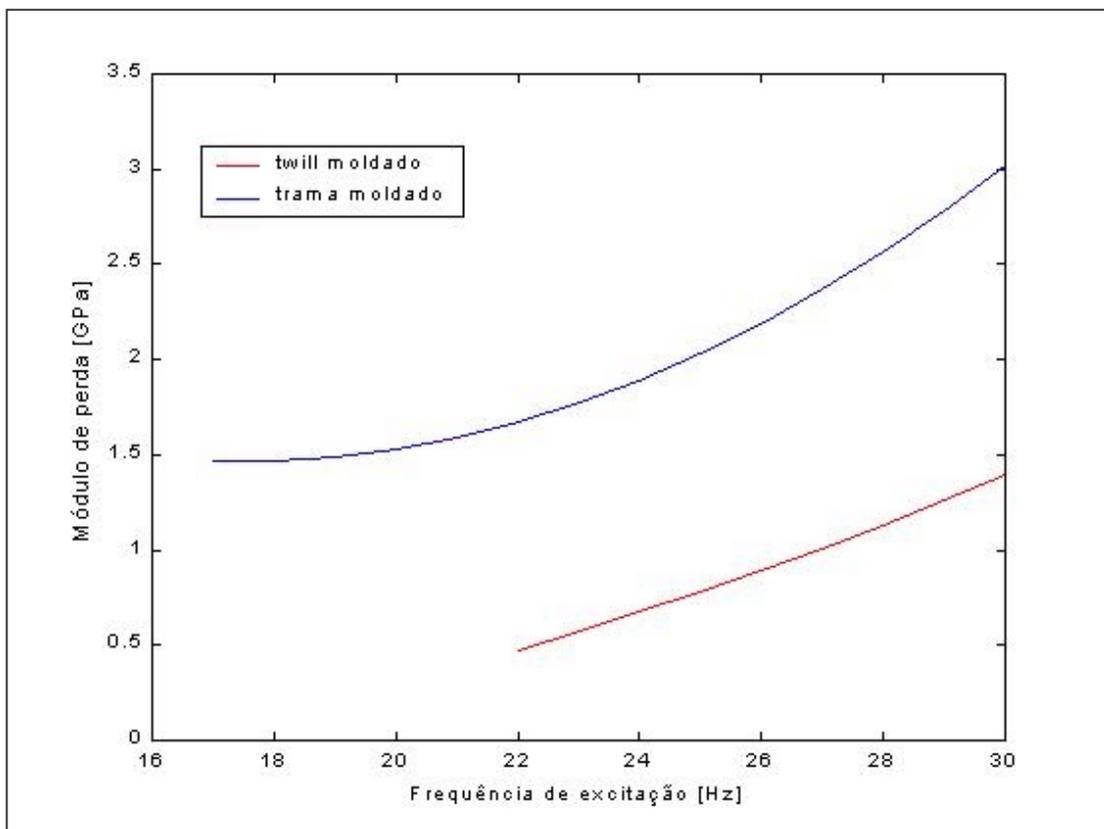


Figura 5. Módulo de perda em função da frequência de excitação

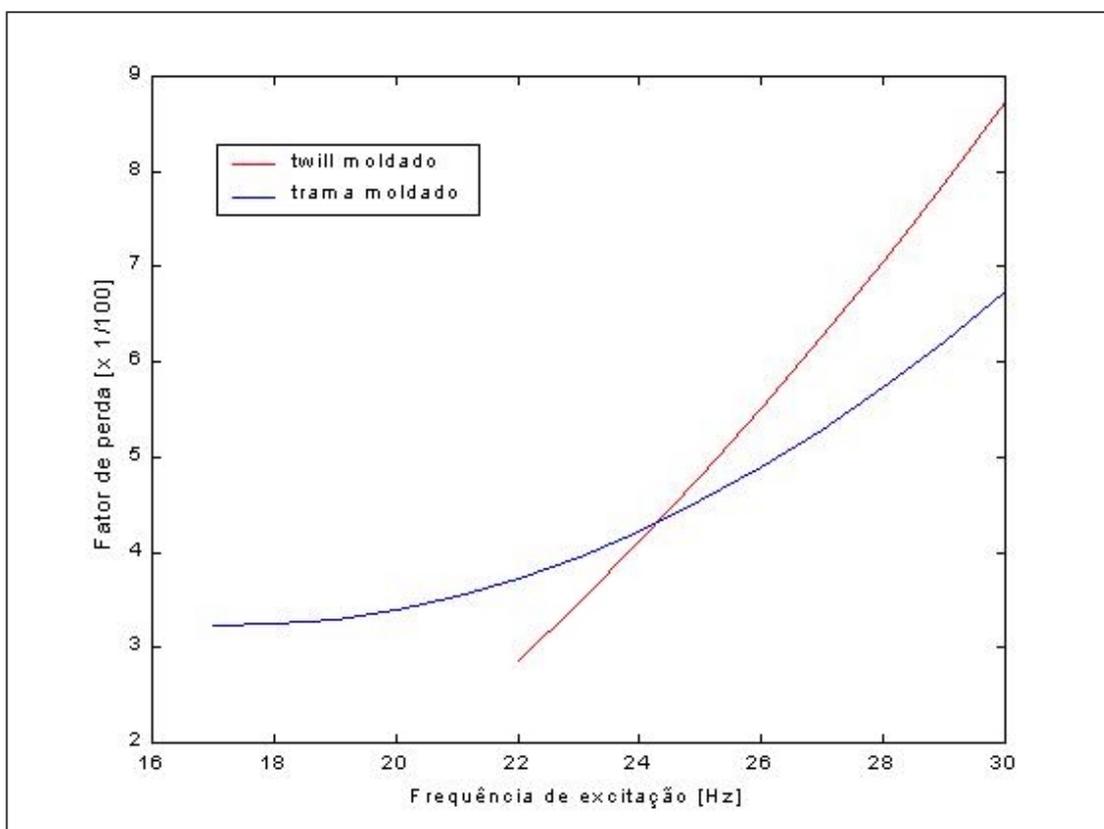


Figura 6. Fator de perda em função da frequência de excitação

As tabelas (2) e (3) apresentam alguns dos resultados experimentais obtidos em laboratório e os resultados calculados conforme equações apresentadas para dois compósitos CRFC ensaiados em vibração forçada.

Tabela 2 – Resultados experimentais e calculados para o compósito twill moldado em função da frequência de excitação

Resultados Experimentais			Resultados Calculados			
f	Razão das Amplitudes	$\varphi$	Parâmetro Adimensional	Módulo de Armazenagem	Módulo de Perda	Fator de Perda
Hz	-	Graus	$\phi$	E' (GPa)	E'' (GPa)	$\eta \times 10^{-2}$
22.8	3.35282	3.65	1.451715-i0.011786	17.26	0.56	3.244
25.2	6.29998	12.30	1.535830-i0.019286	16.72	0.84	5.006
27.2	15.81157	47.84	1.598536-i0.025464	16.65	1.06	6.367
28.2	-	102.30	-	-	-	-

Tabela 3 – Resultados experimentais e calculados para o compósito 8HS-trama moldado em função da frequência de excitação

Resultados Experimentais			Resultados Calculados			
f	Razão das Amplitudes	$\varphi$	Parâmetro Adimensional	Módulo de Armazenagem	Módulo de Perda	Fator de Perda
Hz	-	Graus	$\phi$	E' (GPa)	E'' (GPa)	$\eta \times 10^{-2}$
20.4	2.23876	2.27	1.306524-i0.011814	44.89	1.62	3.609
23.2	3.26547	4.13	1.394625-i0.012981	44.72	1.67	3.734
26.0	6.14380	12.25	1.476670-i0.018471	44.65	2.24	5.017
27.6	12.09685	29.60	1.522284-i0.020893	44.54	2.45	5.501
29.4	-	98.70	-	-	-	-

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O caráter não-destrutivo dos ensaios por vibração mecânica e as baixas deformações aplicadas ao CRFC permitem repetir o ensaio no mesmo material fazendo com que a medida do módulo viscoelástico complexo seja uma ferramenta ideal para caracterização do mesmo. Durante a realização dos ensaios, os devidos cuidados foram tomados para evitar a atrito interna excessiva do material em análise, uma vez que este fenômeno pode causar degradação das propriedades físicas do compósito CRFC. O atrito interno é devido à não homogeneidades: Poros, trincas, delaminações nas mechas de tecidos, interfaces entre diferentes ciclos de densificações, etc. Estas não-homogeneidades são pontos de dissipação de energia.

Os parâmetros de ensaio e fatores ambientais como amplitude, frequência de excitação e temperatura, também afetam o módulo viscoelástico complexo e os valores de amortecimento do compósito. Os ensaios foram realizados considerando o intervalo de frequência antes da primeira frequência natural, temperatura de 23°C e umidade relativa de 60%. A massa do acelerômetro utilizado foi da ordem de 2.8 g, sendo os ensaios realizados considerando o primeiro procedimento comentado anteriormente (1- intervalo de frequência a uma temperatura constante).

O compósito manufaturado com tecido 8HS trama apresentou um valor médio de 44,85 GPa para o módulo de armazenagem, com 60% em volume de fibras, enquanto o compósito manufaturado com tecido twill apresentou módulo de armazenagem da ordem de 16,7 GPa com 61% em volume de fibras, mostrando que fibras de carbono com maior módulo de elasticidade dão origem à compósitos com maior módulo de armazenagem. Pode-se observar que, para os dois tipos

de compósitos, o módulo de armazenagem não apresenta alteração significativa em função da frequência de excitação.

Ambos os materiais apresentam altos valores para o módulo de perda. Pode-se observar que, para os dois tipos de compósitos, o módulo de perda apresenta alteração significativa em função da frequência de excitação conforme valores apresentados nas tabelas 2 e 3 (da ordem de 20 à 30 Hz). O mesmo variou de 172% para o twill moldado e de 63% para o 8HS trama moldado, devido ao comportamento viscoelástico da matriz fenólica. O máximo deste módulo, no intervalo de frequência considerado, ocorreu próximo da primeira frequência natural para ambos os casos. Isto é decorrente das amplitudes máximas que ocorrem quando o ângulo de fase alcança valores próximos de 90°.

## 6. CONCLUSÕES

A técnica utilizada permite obter as propriedades dinâmico-mecânicas de compósitos. Os ensaios são de simples execução e não destrutivos, possibilitando a obtenção dessas propriedades em função da frequência de excitação. É importante salientar que os valores de leitura para os ângulos de fase e calculados para o parâmetro  $\phi$ , ambos são sensíveis aos procedimentos de obtenção dos mesmos. Como sugestão de atividade em laboratório recomenda-se uma pesquisa para elaborar uma plataforma computacional para determinar esses parâmetros no momento da realização do ensaio. A disponibilidade deste tipo de ferramenta permitirá uma atividade em laboratório com grande flexibilidade para selecionar as informações consideradas consistentes e efetuar os cálculos necessários para a caracterização das propriedades dinâmicas do material em análise.

## 7. REFERÊNCIAS

- Buckley, J. D., Edie, D. D., 1993, "Carbon/Carbon Materials and Composites", USA: Noyes Publications.
- Cawley, P., Adams, R. D., 1978, *Journal Composite Materials*, Vol. 12, pp. 336-347.
- Den Hartog, J. P., 1956, "Mechanical Vibrations", McGraw-Hill Book, Company Inc.
- Greif, R., Hebert, B., 1995, "Experimental Techniques for Dynamic Characterization of Composite Materials", *Journal of Engineering Materials and Technology*, v.117, pp. 94-100.
- Greif, R., Johnson, M. S., 1991, "A Combined Theoretical/Experimental Approach to the Dynamic Characterization of Viscoelastic Materials", *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 114, pp. 77-80.
- Hess, M. S., 1964, "Vibration Frequencies for a Uniform Beam with Central Mass and Elastic Supports", *Journal of Applied Mechanics*, 31(3).
- Lee, T. W., 1972, "Vibration Frequencies for a Uniform Beam with One End Spring-Hinged and Carrying Mass at the Other Free-End", *Journal of Applied Mechanics*, 40(3).
- Li, J., Weng, G. J., 1997, "Influence of Inclusion Microgeometry on Some Thermomechanical Properties of Isotropic Polymer-Matrix Composites", *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 119, pp. 242-250.
- Maurizi, M. J., Rossi, R.E., Reyes, J. A., 1976, "Vibration Frequencies for a Uniform Beam with One End Spring-Hinged and Subjected to a Translational Restraint at the Other End", *Journal of Sound and Vibration*, 48(4).
- Paxson, E. B., 1975, "Real and Imaginary Parts of the Complex Viscoelastic Modulus for Boron Fiber Reinforced Plastics", *Journal Acoustical Society of America*, pp. 891-898.
- Pestel, E. C., Leckie, F. A., 1963, "Introduction to State Vectors and Transfer, In: Matrix Methods in Elastomechanics", McGraw-Hill.
- Thomas, C. R., 1993, "Essentials of Carbon/Carbon Composites, Cambridge: The Royal Society Chemistry, 233 p.

Thomson, W. T., 1976, "Vibration Theory and Applications, George Allen & Unwin", London.  
Vaidya, U. K., Raju, P. K., 1994, Materials Evaluation, pp. 682-688.  
Vaidya, U. K., Raju P. K., Kowbel W., 1992, "Material Damping Studies on Carbon/Carbon Composites, Carbon", Vol. 30, pp. 925-929.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## EVALUATING THE VISCOELASTIC COMPLEX MODULUS OF COMPOSITES CARBON-CARBON BY FORCED VIBRATION

### **José Célio Dias**

Prof. Titular, Escola Federal de Engenharia de Itajubá  
CP 50 – CEP 37500-903 – Itajubá – MG – Brasil – E-mail: [jcelio@iem.efei.br](mailto:jcelio@iem.efei.br)

### **Marcelo da Silva Ribeiro**

Doutorando (CAPES), Escola Federal de Engenharia de Itajubá – E-mail: [Marcelo@iem.efei.br](mailto:Marcelo@iem.efei.br)

### **Paulo Fernandes Silva**

Prof. Adjunto, Escola Federal de Engenharia de Itajubá – E-mail: [psilva@iem.efei.br](mailto:psilva@iem.efei.br)

### **Vilmar Arthur Schwarz**

Prof. Adjunto, Escola Federal de Engenharia de Itajubá – E-mail: [vilmar@iem.efei.br](mailto:vilmar@iem.efei.br)

### **Abstract**

An experimental study to investigate the complex modulus of composites Carbon Reinforced Fiber Carbon (CRFC) was carried out. For these materials, this modulus will depend of the component materials utilized, of volumetric fraction and fabrication process. Considering that the manufacturer utilize distinct methods of production, besides different constituent materials, it became necessary to determinate the mechanical properties as a final finished product. An alternative to characterize the dynamic-mechanical properties of these materials is the application of non-destructive evaluation (NDE) techniques. By using one of these techniques, a large number of beams of these materials were submitted to forced vibration tests in laboratory, where the transversal amplitudes, as well as the phase angle of two points of the beam were obtained simultaneously by using a vibration analyzer. With this experimental proceeding, the viscoelastic complex modulus of the carbon reinforced fiber carbon was evaluated.

**Keywords:** non-destructive techniques, forced vibration, carbon-carbon composites.