

Estudo do comportamento da dilatação térmica do compósito Mg-B(20%)

Study of the thermal expansion behavior of the composite Mg-B (20%)

Alexandre R. Soares¹
Edney S. Trindade¹
Luciana Prisco²
José R.M. d'Almeida²
Bojan Marinkovic^{1,2}

Artigo
Original

Original
Paper

Palavras-chaves:

Compósitos
Magnésio
Boro
Fibras

Resumo

O compósito de Mg-B(20%) apresenta aplicações relacionadas à área aeronáutica/aeroespacial, conforme seus históricos de utilização relatados e avaliados por alguns autores, devido a suas propriedades, em especial a relação resistência / peso. O foco do estudo realizado foi levantar pormenorizadamente seu comportamento de expansão térmica para taxas controladas de adição de calor e ciclos térmicos de trabalho. Os resultados mostraram-se dentro do esperado para esta espécie de material, ou seja, as fibras são mais solicitadas numa faixa de temperatura e orientações e a matriz passa a ter maior predomínio global em outras faixas e orientações, o que é comprovado no decorrer deste estudo experimental.

Abstract:

The composite of Mg-B (20%) has applications related to the aeronautical / aerospace, according to their historical usage reported and evaluated by some authors, and due to its properties, especially regarding the resistance / weight. The focus of the study was to collect detailed behavior of thermal expansion for controlled rates of addition of heat and thermal cycling of work. The results were as expected for this material, i.e., the fibers are more loaded in a range of temperatures and orientations and the matrix is replaced by greater global dominance on other range of temperatures and orientations, which is proven in the course of this experimental study.

Key words

Composites
Magnesium
Bore
Fibeis

¹ Alunos do Programa de Mestrado em Materiais, UNIFOA

¹ Professor do Programa de Mestrado em Materiais, UNIFOA

² Professores do Programa de Engenharia de Materiais, PUC-RJ

² Técnica de Laboratório do Programa de Engenharia de Materiais, PUC-RJ

1. Introdução

Compósitos reforçados com fibras são de uma forma geral importantes quando se deseja maximizar propriedades conjugadas em direções específicas e obter a melhor relação resistência mecânica /peso. As ligas leves, como as ligas de alumínio com densidades da ordem de $2,7\text{g/cm}^3$ e as ligas de magnésio com densidades da ordem de $1,7\text{g/cm}^3$ reforçadas com fibras de boro são utilizadas na otimização de propriedades para aplicações aeronáuticas e aeroespaciais. As fibras de boro foram as primeiras cargas em compósitos em forma de fibras a serem utilizados na produção de estruturas aeronáuticas [1].

As fibras de boro são fabricadas através de um processo de deposição química de vapor de tricloreto de boro e hidrogênio ($2\text{BCl}_3 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{B} + 6\text{HCl}$) em cima de um arame de tungstênio com diâmetros na ordem de $10\mu\text{m}$, [2]. Com relação ao comportamento térmico de compósitos reforçados com fibras, já existem alguns estudos realizados com o intuito de se compreender os mecanismos de expansão térmica de matrizes de ligas leves tais como as ligas de alumínio (ligas 1100 e 2024) reforçadas com fibras de boro, [3]. Outro estudo realizado no segmento por Qin et al. [4] enfocou os efeitos do ciclo térmico no comportamento da expansão térmica de matrizes de ligas de alumínio (liga AA5A06) reforçadas com fibras de boro. Por outro lado, Maksimovich et al., [5], estudaram a influência da temperatura na estrutura e nas propriedades mecânicas do compósito fibroso de Mg-B(20%).

O presente estudo busca entender o mecanismo de dilatação térmica sofrido pelo compósito de Mg-B(20%) unidirecional em determinadas faixas de temperaturas e direções, expressando tal comportamento através do seu coeficiente de expansão térmica (α).

Em resumo o objetivo é estudar e entender a relação (1) para o Mg-B(20%):

$$\alpha = (1/L_0)(\Delta L/\Delta T) \quad (1)$$

O coeficiente de expansão térmica de materiais compósitos reforçados com fibras já foi modelado por diversos autores para direções longitudinais e transversais [3,6], sendo

que o modelo de Schapery e a regra das misturas serão usados para a comparação com os coeficientes experimentais obtidos neste estudo. Estes serão detalhados a seguir.

1.1 Modelo de Schapery

Aplicaremos o modelo com o intuito de verificar a aproximação proposta por Schapery para o comportamento dos coeficientes de expansão térmica nas direções longitudinal e transversal às fibras de compósitos, proporcionando o estabelecimento de parâmetros teóricos para a realização posterior de uma comparação aos resultados experimentais específicos do compósito Mg-B(20%).

Para o modelo de Schapery as equações que descrevem o comportamento de compósitos reforçados por fibras nas direções longitudinais e transversais são:

$$\alpha_{\parallel} = \frac{\alpha_f V_f E_f + \alpha_m V_m E_m}{V_f E_f + V_m E_m} \quad (2)$$

$$\alpha_{\perp} = (1 + \nu_m)\alpha_m V_m + (1 + \nu_f)\alpha_f V_f - \alpha_{\parallel} \nu_c \quad (3)$$

$$\nu_c = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (4)$$

Onde: V_f e V_m são as frações volumétricas nominais, E_f e E_m são os módulos de elasticidade (Young), α_f e α_m são os coeficientes de expansão térmica das fibras e da matriz, respectivamente, α_{\parallel} e α_{\perp} são os coeficientes de expansão térmica do compósito nas direções longitudinal e transversal às fibras na amostra, ν_f e ν_m são os coeficientes de Poisson das fibras e da matriz, enquanto ν_c é o coeficiente de Poisson do compósito.

Uma observação interessante é que o modelo de Schapery depende da orientação das fibras, o que é evidenciado através de suas respectivas equações descritas acima, contudo não considera as eventuais ligações químicas entre matrizes e fibras.

Para uma avaliação preliminar do comportamento do compósito Mg-B(2%) foram calculados os coeficientes de expansão térmica aplicando-se o modelo de Schapery, resultando nos seguintes valores:

Tabela 1 – Coeficiente de Expansão Térmica do Mg-B(20%) de acordo com o Modelo de Schapery.

Propriedades do compósito de Mg-B(20%) - T ≈ 25°C							
V _f	V _m	E _f (GPa)	E _m (GPa)	α _f (1/°C)	α _m (1/°C)	v _f	v _m
0,20	0,80	400	45	4,86x10 ⁻⁶	24,8 x 10 ⁻⁶	0,21	0,35
Longitudinal α = 11,05 x 10 ⁻⁶ (1/°C)		Transversal α _⊥ = 24,40 x 10 ⁻⁶ (1/°C)			Poisson ν _c = 0,32		

1.2 Regra das Misturas

Aplicaremos a clássica regra das misturas com o intuito de verificar a aproximação para o comportamento dos coeficientes de expansão térmica médios experimentais da mistura entre a matriz de magnésio e as fibras de boro, proporcionando também o estabelecimento de parâmetros teóricos de comparação aos resultados experimentais específicos do compósito Mg-B(20%).

Para a regra da mistura as equações que descrevem o limite superior e o limite inferior do comportamento de compósitos reforçados por fibras são respectivamente:

$$\alpha^c = V_f \alpha_f^c + V_m \alpha_m^c \quad (5)$$

$$\alpha_c = \frac{\alpha_f \alpha_m}{\alpha_f V_m + \alpha_m V_f} \quad (6)$$

Onde: V_f e V_m são as frações volumétricas nominais, α_f e α_m são os coeficientes de expansão térmica das fibras e da matriz, respectivamente.

É válida a observação de que a regra das misturas independe das orientações das fibras e de qualquer processo de ligação química, sendo interpretada como uma mistura simplesmente volumétrica das propriedades.

Para uma avaliação preliminar do comportamento do compósito Mg-B(20%) foram calculados os coeficientes de expansão térmica aplicando-se a regra das misturas, resultando nos seguintes valores:

Tabela 2 – Coeficiente de Expansão Térmica do Mg-B(20%) de acordo com a Regra das Misturas.

Propriedades do compósito de Mg-B(20%) - T ≈ 25°C			
V _f	V _m	α _f (1/°C)	α _m (1/°C)
0,20	0,80	4,86x10 ⁻⁶	24,8 x 10 ⁻⁶
Limite Superior ⁽⁵⁾ α ^c = 20,81 x 10 ⁻⁶ (1/°C)		Limite Inferior ⁽⁶⁾ α _c = 13,62 x 10 ⁻⁶ (1/°C)	

2. Procedimentos Experimentais e Amostras

As chapas de Mg-B(20%) foram fabricadas através do processo de ligação por difusão ocorrida entre matrizes-fibras (Diffusion Bonding Process). Nesse processo de ligação ocorre a interdifusão atômica entre as superfícies em contato quando atinge-se determinadas temperaturas e níveis de pressão / vácuo. A principal vantagem desse processo de liga-

ção é o controle da orientação das fibras adicionadas e da fração volumétrica destas, [7].

O processo divide-se primeiramente em operações de distribuição coordenada das fibras em lâminas da matriz, seguida do empilhamento entre essas lâminas da matriz e da compressão numa câmara de vácuo proporcionando a aderência entre as superfícies de contato das lâminas da matriz e das fibras para posterior difusão atômica e ligação entre as superfícies a altas temperaturas.

Esquemáticamente o processo pode ser descrito da seguinte forma, Figura 1:

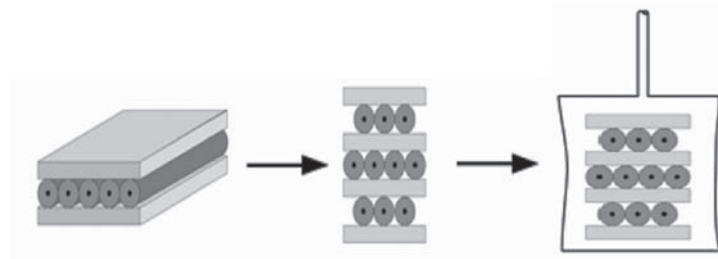
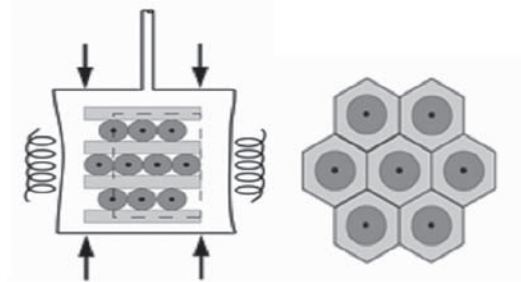


Figura 1 – O Processo de ligação por difusão usado para o processamento do composto Mg-B(20%) [7].



O processo de ligação por difusão em uma câmara de vácuo teria o seguinte aspecto (Figura 2):

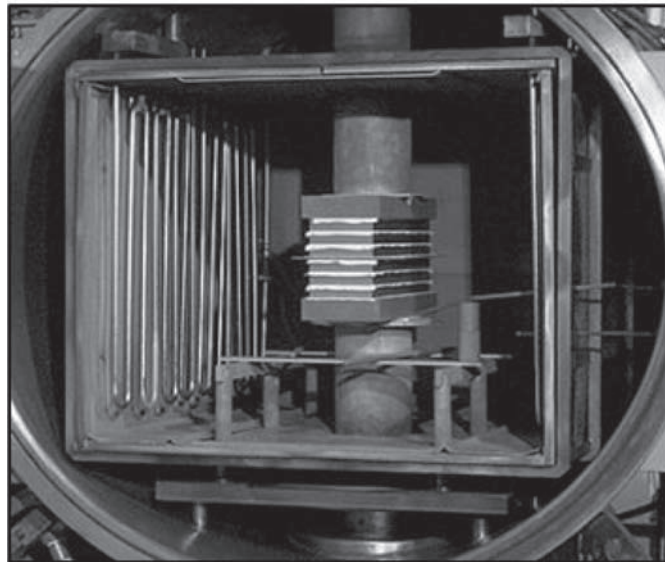


Figura 2 – Câmara de vácuo usada para o processo de ligação por difusão.

2.1 Amostras

As amostras (Figura 3) ensaiadas através de dilatometria foram cortadas em uma cortadeira de precisão Isomet com discos de diamante, dimensionadas em 12,45mm de comprimento e um limite máximo de largura

de 8mm devido a restrições do dilatômetro NETZSCH DIL 402C. As amostras foram cortadas sob os ângulos de 0, 60 e 90° em relação às orientações das fibras.



Figura 3 – Amostras do composto Mg-B(20%) confeccionadas para ensaios de dilatometria.

2.2 Dilatometria

Os ensaios de dilatometria, das amostras cortadas sob os ângulos de 0, 60 e 90° em relação às orientações das fibras, foram realizados num dilatômetro NETZSCH DIL 402C, com uma taxa de variação da temperatura de 5°C/min durante o aquecimento, num intervalo entre as temperaturas de 32°C e 520°C, enquanto para o resfriamento foi utilizada uma taxa de resfriamento diferente até que se atingisse a temperatura ambiente novamente. Contudo essa taxa não foi controlada ou forçada, se processou naturalmente conforme resfriamento das amostras e do

equipamento. Paralelamente foram realizados também os ensaios cíclicos para avaliar o comportamento experimental da dilatação térmica do compósito Mg-B(20%) na orientação longitudinal das fibras (0°). Para essa análise foram realizados 5 ciclos de aquecimento e resfriamento.

3. Resultados e Discussão

Os coeficientes de expansão térmica obtidos por meio experimental para as amostras com orientações (0°, 60°, 90°) estão plotados na Figura 4.

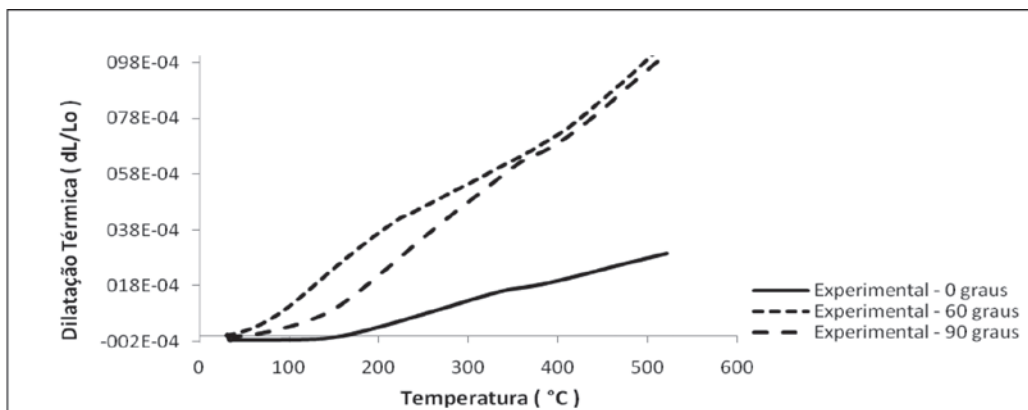


Figura 4 – Comportamento de expansão térmica das amostras do compósito Mg-B(20%) em orientações de 0°, 60° e 90°.

Os coeficientes de expansão térmica obtidos por meio experimental para as amostras com orientações (0°, 60°, 90°) estão plotados na Figura 5 no intervalo de temperaturas de 125°C a 520°C, tal procedimento foi utilizado

para relatar o comportamento das amostras em uma base válida para todas as amostras uma vez que as amostras apresentaram comportamentos anômalos abaixo de 125°C, sobretudo a amostra de 0°.

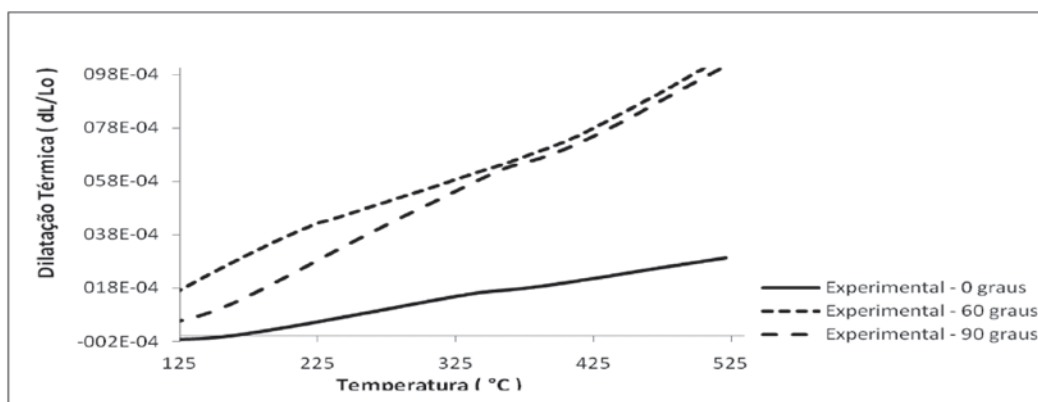


Figura 5 – Comportamento de expansão térmica das amostras do compósito Mg-B(20%) no intervalo de 125°C a 520°C.

No caso específico da análise do coeficiente de expansão térmica para comparação ao modelo de Schapery e o modelo clássico da regra das misturas foi utilizado o conceito de

comportamento médio global das amostras, uma vez que tal análise apresenta consistência física e matemática quando se deseja avaliar comportamentos globais e não-isolados de caracte-

rísticas físicas e /ou mecânicas dos materiais. Além disso, é sabido que os compósitos com essas características não possuem um valor verdadeiramente homogêneo para coeficientes de expansão térmica, [3] e sim a superposição dos efeitos das matrizes e das fibras. Dois autores na década de 70 utilizaram o mesmo conceito de coeficiente médio de expansão térmica para compósitos em matrizes de alumínio reforçados com fibras de Boro [3] segundo a relação:

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta L / L_0}{\Delta T}$$

Os coeficientes de expansão térmica médios do compósito de Mg-B(20%) segundo as orientações de 0,60, 90° estão tabelados abaixo (Tabela 3):

Tabela 3 – Coeficiente de Expansão Térmica do Mg-B(20%) experimentais.

Propriedades do compósito de Mg-B(20%) - ΔT no intervalo de 125 °C a 520°C			
V_f	V_m	$\alpha_f (1/^\circ\text{C})$	$\alpha_m (1/^\circ\text{C})$
0,20	0,80	$4,86 \times 10^{-6}$	$24,8 \times 10^{-6}$
$\alpha_{0^\circ} = 3,62 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$		$\alpha_{60^\circ} = 18,27 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$	
		$\alpha_{90^\circ} = 14,82 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$	

O comportamento médio experimental dos coeficientes de expansão térmica das amostras para 0,60 e 90° em comparação com

os modelos de Schapery e da regra das misturas é apresentado na Figura 6.

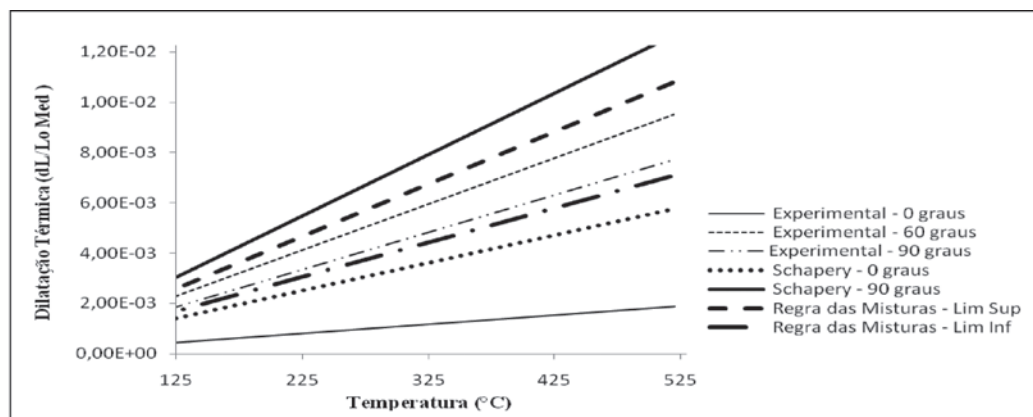


Figura 6 – Comparação dos coeficientes de expansão térmica teóricos (modelo de Schapery e Regra das misturas) e experimentais para as amostras em 0, 60 e 90° do compósito Mg-B(20%).

Tabela 4 – Sumário dos Coeficientes de Expansão Térmica Médios do Mg-B(20%) usados na Figura 6.

Coeficientes de Expansão Térmica Médios das amostras do compósito de Mg-B(20%) no intervalo de 125°C a 520°C usado na Figura 5.		
Experimental - 0° $\alpha_{0^\circ} = 3,62 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$	Experimental - 60° $\alpha_{60^\circ} = 18,27 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$	Experimental - 90° $\alpha_{90^\circ} = 14,82 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$
Schapery - 0° $\alpha_{\parallel} = 11,05 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$		Schapery - 90° $\alpha_{\perp} = 24,40 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$
Regra das Misturas - Lim Sup. $\alpha^c = 20,81 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$		Regra das Misturas - Lim Inf. $\alpha_c = 13,62 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$

Com relação à interpretação desse gráfico (Figura 6) é importante ressaltar que para as amostras de 0, 60 e 90° considerou-se os coeficientes de expansão térmica médios no intervalo de temperatura de 125°C a 520°C, pois os comportamentos experimentais destas amostras abaixo de 125°C são significativamente diferentes, sobretudo para a amostra de 0° (longitudinal). Os coeficientes de expansão térmica médios experimentais apresentam valores inferiores ao modelo de Schapery, uma vez que o modelo de Schapery não considera qualquer tipo ou efeitos das ligações químicas aparentemente presentes entre fibras e matriz no compósito estudado, Mg-B(20%). Esta possível existência de ligações químicas entre a matriz de Mg e as fibras de B torna o compósito mais rígido e, portanto, sujeito a uma menor dilatação térmica do que o previsto pelo modelo de Schapery. Além disso, a aproximação do coeficiente de expansão térmica da amostra de 90° ao coeficiente de expansão térmica da matriz (Figura 6 e Tabela 3) era esperada, visto que as propriedades dos compósitos nas direções de 90° ou próximas desta direção de fibras aproximam das propriedades intrínsecas da fase matriz. O modelo da regra das misturas apresenta limites superiores e inferiores, sendo que os coeficientes médios experimentais para as amostras de 60° e 90° ficaram dentro dos limites da regra das misturas, enquanto o coeficiente médio experimental da amostra em 0° ficou fora deste intervalo e inferior aos limites da regra das misturas. É interessante notar que os coeficientes de expansão térmica de acordo com a regra das misturas (limite superior e limite inferior) ficaram entre os coeficientes do modelo de Schapery (longitudinal e transversal). Os coeficientes de expansão térmica médios relativos (CTE Medio Relativo) do compósito Mg-B(20%) para orientação longitudinal das fibras (0°) ao longo de 5 ciclos de aquecimento e resfriamento apresentaram o seguinte comportamento (Figura 7).

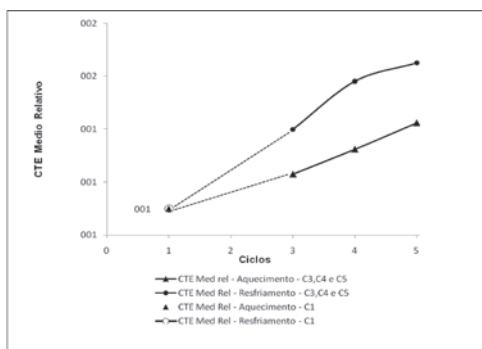


Figura 7 – Comportamento de expansão térmica do Mg-B(20%) em função dos ciclos térmicos.

O CTE Médio Relativo foi escolhido como uma medida de comparação entre os coeficientes de expansão térmica apresentados pela amostra 0° ao longo de diferentes ciclos térmicos para se avaliar a ordem de alteração dos coeficientes de expansão térmica médios em função do aumento de ciclos térmicos. No caso específico desse estudo o coeficiente de expansão térmica do ciclo 1 relativizou os coeficientes de expansão térmica dos outros ciclos, tanto no aquecimento quanto no resfriamento. Foi omitido nos gráficos o ciclo térmico 2 devido a um comportamento anômalo não esperado e por isso deverá ser reavaliado futuramente para verificar as tendências de aumento dos coeficientes de expansão térmica médios observados ao longo da aplicação dos ciclos. As linhas tracejadas da Figura 7 representam apenas uma tendência esperada entre os ciclos 1, 2 e 3 e não efetivamente aos valores experimentais relacionados e encontrados durante o ciclo. Da Figura 7 pode ser observado que com o aumento de ciclos térmicos, o coeficiente de expansão térmica do compósito sofre um aumento significativo, com a aparição de histereses visto que os coeficientes de expansão térmica no aquecimento e no resfriamento para o mesmo ciclo térmico apresentam valores bastante diferentes. O aumento do coeficiente de expansão térmica em função da ciclagem deve-se ao possível mecanismo de quebra de ligações químicas e subsequente decoesões das fibras em relação à matriz, resultando em coeficientes de expansão térmica cada vez mais altos e próximos aos da matriz pura (Mg). Este fenômeno pode ser compreendido pela predominância da matriz neste compósito (80% volumétricos) que rege as propriedades físico-químicas do material compósito devido à redução da interação entre as fibras e a matriz.

4. Conclusão

A comparação do comportamento experimental da expansão térmica do compósito Mg-B(20%) para a faixa de temperaturas de 125°C a 520°C e direções das amostras de 0, 60 e 90° em relação à orientação das fibras de boro durante um ciclo de aquecimento revelou que os coeficientes calculados com base no

modelo de Schapery são bastante conservativos e superiores aos coeficientes médios experimentais. Isso se deve ao fato do modelo de Shapery não levar em consideração as forças das ligações químicas entre matrizes e fibras presentes nas amostras.

A regra das misturas define limites máximos e mínimos para os coeficientes de expansão térmica, criando uma área ou região esperada para o comportamento do compósito. Nesse estudo é observado que os coeficientes de expansão térmica para as amostras de 60 e 90° se encontram na região estipulada pelos máximos e mínimos da regra das misturas, enquanto o mesmo não foi verificado para a amostra de 0°. Esse fato evidencia a predominância do comportamento da matriz sobre as fibras para 60 e 90°. Por outro lado, o coeficiente de expansão térmica da amostra de 0° ficou bem mais próxima do coeficiente de expansão das fibras de Boro. A análise do comportamento de expansão térmica do compósito Mg-B(20%) durante ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento revelou tendência ou predomínio do comportamento global da matriz sobre o comportamento das fibras. O compósito apresentou um aumento gradativo e até mesmo linearizado dos coeficientes de expansão térmica médios. De fato, ao aplicar ciclagem térmica ao compósito de Mg-B(20%) é possível que ocorram decoesões das fibras da matriz e, portanto a diminuição do trabalho termomecânico das fibras, resultando em aumento do coeficiente de expansão térmica do compósito aproximando-o da matriz.

Assim uma avaliação das temperaturas de trabalho e sujeição aos ciclos térmicos devem ser muito bem especificados antes da aplicação do compósito Mg-B(20%) aos projetos. Um controle das faixas de temperatura de trabalho pode viabilizar seguramente sua utilização.

5. Referências Bibliográficas

- [1]- S.T. Peters, "Handbook of Composites", Second Edition, 1998
- [2]- K.K. Chawla, "Fibrous Materials", 1st edition, 1998.
- [3]- K.G. Kreider and V. M. Patarini, "Thermal Expansion of Boron-Fiber/Aluminum Composites". Metallurgical Transactions, Vol 1, nº 12, pag 3431-3435 (December 1970)
- [4]- Y.C. Qin, S.Y. He, D.Z. Yang, "Effect of thermal- mechanical cycling on thermal expansion behavior of boron fiber-reinforced aluminum matrix composite". Materials Chemistry and Physics 86 (2004) 204-209.
- [5]- G.G.Maksimovich, A.V. Filipovskii, V.I. Mikheev, A.I. Gordienko, I.V. Tarasenko and E.N. Vinogradova, "Influence of temperature on the structure and the mechanical properties of a magnesium-boron fibrous composite material". UDC 669.721.5+669.781: 620.171.32.539.434
- [6]- R.U. Vaidya, K.K.Chawla, "Thermal expansion of Metal-Matrix Composites", Composites Science and Technology, 50 (1994) 13-22.
- [7]- K.K.Chawla and N. Chawla, "Metal-Matrix Composites", Springer, 1st edition, 2005.

Endereço para Correspondência:

Bojan A. Marinkovic

bojan @puc-rio.br

Departamento de Engenharia de Materiais - PUC-Rio

Rua Marquês de São Vicente 225

Gávea - RJ

CEP: 22453-900