
A INFLUÊNCIA DAS PARTÍCULAS DE SiC NAS TENSÕES TÉRMICAS EM COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA

Waldemar Alfredo Monteiro*

Zoroastro de Miranda Boari**

Carlos Alexandre de Jesus Miranda***

Resumo

Dados experimentais publicados sobre a distribuição de partículas de SiC em matrizes de alumínio e sua influência na resistência do compósito são revistos neste trabalho. Análises qualitativas indicam que as características microestruturais são muito influenciadas pelos reforços de SiC e sua distribuição. Por exemplo, na matriz adjacente aos reforços de cerâmica, há uma realçada nucleação e crescimento de precipitados, especialmente, Mg_2Si . Estudos recentes também reconhecem que desvios na uniformidade da distribuição de reforços podem marcadamente influenciar as características de deformação plástica, embora seus efeitos possam ser negligenciados nas propriedades elásticas. Para o caso da distribuição uniforme, o tratamento matemático utiliza técnicas de elementos finitos, método de Eshelby ou mecanismos de discordâncias. O objetivo deste trabalho é mostrar, por meio das técnicas de elementos finitos, como a distribuição de partículas de SiC em matrizes de alumínio influem nos campos de tensão de longo e curto alcances, considerando-se apenas cargas térmi-

* Professor adjunto da Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM) e Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Universidade de São Paulo (Ipen-USP). Pesquisador sênior do Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais do Ipen de São Paulo. *E-mail:* wamonte@net.ipen.br

** Pesquisador do Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais do Ipen de São Paulo. *E-mail:* zoroastr@uol.com.br

*** Pesquisador do Centro de Engenharia Nuclear do Ipen de São Paulo. *E-mail:* Cmiranda@net.ipen.br

cas. Assim, estudou-se o caso em que as partículas, de forma quadrada e circular, estavam uniformemente distribuídas, procedendo à simulação em regime elástico.

Palavras-chave: Compósitos de matriz metálica, distribuição de SiC em compósitos de matriz metálica, tensão térmica.

Abstract

This work reviews some experimental results that have been published about aluminum matrix reinforced with SiC distribution and their influence in composite material resistance. Qualitative analyses have been indicating indicate that microstructural characteristics were very influenced by SiC particulate distribution. For example, in the matrix adjacent to the ceramic reinforcement there are an enhanced nucleation and growth of the precipitates, especially Mg_2Si . Recent studies also recognized that deviations from the periodicity of reinforcement distribution could markedly influence the plastic deformation characteristics even when they have a neglected effect on the elastic properties. The finite element method, the Eshelby method and dislocation mechanisms are usually employed in formulation of the constitutive response. The aim of this work is to show the stress distribution around the particles and inside the clusters and it was primarily only considered thermal stress distribution around particles equally distributed and evolution of the elastic stresses.

Keywords: Metal matrix composites, distribution of SiC in metal matrix composites, thermal tension.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a comunidade científica tem procurado melhorar o desempenho de compósitos de matrizes metálicas. Segundo Taya e Arsenault (1989), os compósitos de matriz metálica têm diversas vantagens que são muito importantes para seu uso como material estrutural, possuem alta condutividade elétrica e térmica, apresentam alta resistência em ambientes de vácuo, em relação aos polímeros (YOSHIMURA, 1994), e podem ser conformados e tratados como qualquer outra liga metálica (MOURISCO, 1995). No entanto, as propriedades mecânicas desses materiais dependem de frações volumétricas, formas, tamanhos e distribuição da fase dispersa, além da microestrutura da matriz.

Nessa área de ciência dos materiais, há uma preocupação constante em representar esse comportamento mecânico dos compósitos por meio de modelamento matemático. No entanto, Clyne e Withers (1993) concordam que, por causa da complexidade das interações entre reforços e matriz, é difícil um modelo representar globalmente a resistência desse material. Assim, este trabalho usa o método de elementos finitos para determinar a distribuição de tensões térmicas ao redor das partículas e dentro dos agrupamentos de reforços. Neste artigo, considerou-se o modelo de partículas circulares e quadradas em regime elástico.

2 MECANISMOS DE RESISTÊNCIA

O método de elementos finitos não é o único modo usado para obter as tensões, há o método de Eshelby e a mecânica das discordâncias. Geralmente, o método de elementos finitos é mais usado para o caso de partículas grandes, em que a matriz transfere para os reforços uma parte da carga que suporta (NARDONE; PREWO, 1985), enquanto a mecânica das discordâncias usa o fato de que, no resfriamento, por causa das diferenças nos coeficientes de expansão térmica entre matriz e reforço, há deformações plásticas localizadas no material da matriz. Essas deformações causam encruamento, e, conseqüentemente, surgem altas densidades de discordâncias ao redor das partículas que acabam dificultando o movimento de outras discordâncias e, portanto, restringindo a deformação plástica do compósito. Além disso, se as partículas forem pequenas, estas funcionarão como precipitados incoerentes, formando barreiras para a movimentação das discordâncias que produziriam deformação plástica.

As partículas pequenas têm diâmetros entre 0,01 e 0,1 μm , e as partículas grandes têm diâmetros entre 0,1 e 50 μm . Estas últimas tendem a restringir o movimento da

matriz ao redor das próprias partículas. Nesse caso, a resistência mecânica do compósito depende da ligação na interface partícula-matriz. Outra importante propriedade é o módulo de elasticidade do compósito que depende da fração volumétrica e do tamanho do reforço, sendo mais dependente da fração volumétrica, embora esta dependência não seja linear (MCDANELS,1985).

Em primeira análise, o aumento de resistência mecânica é, portanto, devido à resistência que as partículas de SiC e a densidade de discordâncias ao redor das partículas impõem à movimentação das discordâncias no material.

3 SIMULAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS PARA PARTÍCULAS ISOLADAS E DISTRIBUIÇÃO UNIFORME DE PARTÍCULAS, CONSIDERANDO REGIME ELÁSTICO

3.1 Introdução

O compósito estudado é constituído de matriz de liga de Al-Cu (2024) reforçada com partículas de carboneto de silício. O objetivo dessa simulação é determinar os efeitos que a diferença nos coeficientes de expansão térmica entre os constituintes provoca na resistência do material, uma vez que essa diferença produz uma maior densidade de discordâncias ao redor das partículas.

As propriedades físicas da liga de alumínio (CLYNE; WITHERS, 1993) usadas na simulação são:

1. Módulo de Young: 73 GPa.
2. Massa específica: 2.800 kg/m³.
3. Coeficiente de dilatação térmica: 23,6 x 10⁻⁶/°C.
4. Coeficiente de Poisson: 0,33.
5. Módulo de elasticidade transversal: 50 GPa.

A seguir, apresentam-se as propriedades físicas do carboneto de silício (CLYNE; WITHERS, 1993):

1. Módulo de Young: 450 GPa.
2. Massa específica: 3.200 kg/m³.
3. Coeficiente de dilatação térmica: 4 x 10⁻⁶/°C.
4. Coeficiente de Poisson: 0,17.
5. Módulo de elasticidade transversal: 190 GPa.

Espera-se que o compósito possua uma combinação dessas propriedades para ter um bom desempenho como material de engenharia. Para todos os modelos, utilizaram-se os seguintes parâmetros de temperatura e dimensões de partículas:

1. Temperatura inicial de referência: 600°C.
2. Temperatura final: 20°C.
3. Dimensão lateral da partícula: $L = 0,20 \times 10^{-6}$ m.

Usou-se o método de elementos finitos dentro do contexto de modelo de célula unitária bidimensional cujas condições de simetria e contorno (III.1) são descritas a seguir:

$$\begin{aligned}
 T_x = T_y = 0; \quad u_x = 0; \quad & \text{para } x = 0 \\
 u_y = 0; \quad & \text{para } y = 0 \\
 u_x = -DL; \quad & \text{para } x = 2C + L \\
 u_y = -DL; \quad & \text{para } y = 2C + L
 \end{aligned} \tag{1}$$

em que $DL = (2C + L) \cdot 23,6 \times 10^{-6} \cdot 580$ (contração da matriz).

Em todos os modelos, optou-se por cargas térmicas para condições de contorno e características do material anteriormente descritas. Conseguiu-se um bom refinamento de malhas para essa etapa de análise em regime elástico.

3.2 Partículas isoladas

Adotaram-se o modelo de uma partícula quadrada e outro de partícula circular na base de alumínio de dimensões tão grandes que podem ser consideradas infinitas, ou seja, a fração volumétrica é extremamente pequena (figuras 1 e 2). Nesses modelos, a dimensão lateral é $C = 10 L$ e a intenção é verificar a influência da forma da partícula na distribuição de tensão, ou seja, verificar quão maior é a concentração de tensão na quina da partícula quadrada.

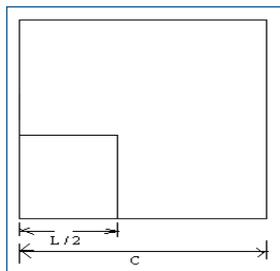


Figura 1 Modelo de partícula quadrada em matriz de alumínio de dimensões infinitas.

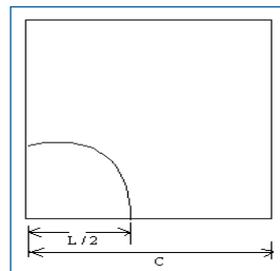


Figura 2 Modelo de partícula circular em matriz de alumínio de dimensões infinitas.

3.3 Partículas em arranjos simétricos

3.3.1 Arranjo pentagonal

Nesse arranjo, as partículas estão uniformemente distribuídas nas configurações mostradas na Figura 3, onde se veem os casos de partículas quadradas e de partículas circulares. O objetivo dessa configuração é verificar a influência na distribuição de tensões ao redor de uma partícula em razão da presença das outras e qual a diferença nos campos de tensão quando trocamos as formas dessas partículas.

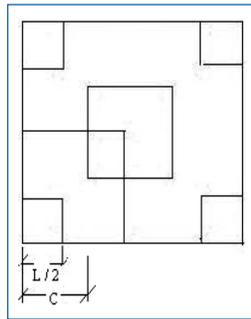


Figura 3 Arranjo pentagonal: (a) partículas quadradas e (b) partículas circulares.

3.3.2 Arranjo quadrado

Esse é o caso de distribuição uniforme de partículas quadradas em um modelo e de partículas circulares em outro (Figura 4). O objetivo é saber se, trocando a configuração, haverá diferenças na distribuição de tensões e se a forma da partícula para esse tipo de disposição é um fator importante para a determinação dessas tensões.

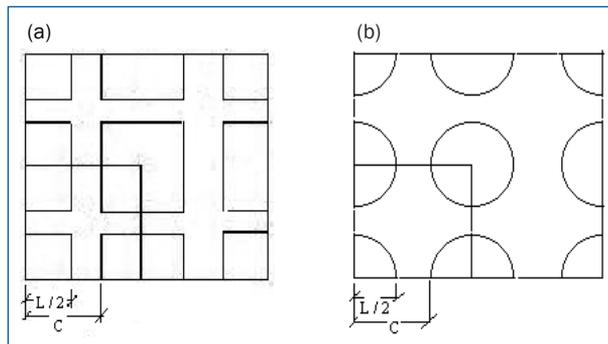


Figura 4 Arranjo quadrado: (a) partículas quadradas e (b) partículas circulares.

Como o objetivo desses arranjos é testar a influência de uma partícula sobre a sua vizinha mais próxima, foram feitas simulações para as duas configurações, nas quais usamos aproximações sucessivas de partículas, variando C de acordo com os seguintes valores: 10,0 L; 5,0 L; 4,0 L; 3,5 L; 3,0 L; 2,5 L; 2,0 L; 1,5 L. Utilizaram-se como referência somente os efeitos da variação da temperatura, e as condições de simetria e de contorno referiram-se às restrições de deslocamento.

As dimensões do modelo são dadas por $C = a_n \cdot L$ para $a_n = 10,0; 5,0; 4,0; 3,5; 3,0; 2,5; 2,0; 1,5$.

Para o presente estudo sobre a influência da distância entre partículas de carbono de silício, uniformemente distribuídas em matriz de alumínio, optou-se por calcular e “plotar” as tensões equivalentes de von Mises. Deve-se notar que a fração volumétrica aumenta à medida que diminui o valor de a_n .

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Partículas isoladas

A Figura 5 mostra as curvas de isotensão para os casos de partículas quadradas e circulares. As tensões determinadas pelo programa foram as tensões equivalentes de von Mises.

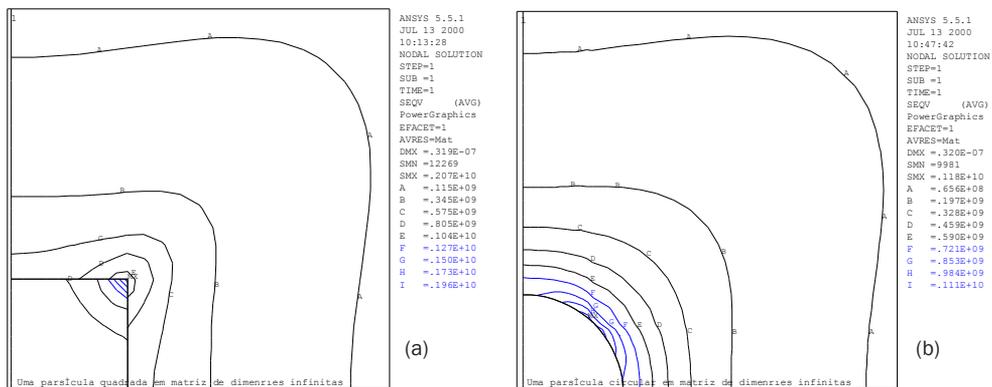


Figura 5 Tensões equivalentes de von Mises, considerando as partículas quadradas e circulares em matriz de dimensões infinitas. Unidades em Pa.

Pode-se notar que, no caso de partículas quadradas, em razão das quinas, há alta concentração de tensões ao redor destas. Em relação às partículas circulares, nota-se que as tensões são menores que aquelas das partículas quadradas. Deve-se lembrar que é muito difícil encontrar partículas perfeitamente circulares. Assim, as partículas quadradas são mais reais porque apresentam cantos vivos. Notamos que o valor de tensão máxima ocorre bem próximo da quina da partícula quadrada e também muito próximo do contorno da partícula circular, o que, nesse caso, corrobora as observações de Shen et al. (1994) e Zhirui, Tzi-Kang e Lloyd (1993).

As curvas de isotensão da Figura 5 mostram pontos onde os níveis de tensão superaram muito o limite de escoamento do alumínio (175 MPa), o que levaria o material ao colapso se não fosse o fato de a matriz permitir, por ser dúctil, grandes deformações plásticas, surgindo altas densidades de discordâncias ao redor das partículas e, assim, aparecendo os mecanismos de resistência do material.

Esse mecanismo surge quando o material que está sob grande carga tende a deformar-se plasticamente, movimentando discordâncias, as quais, quando encontram as altas densidades de discordâncias ao redor das partículas, apresentam grandes chances de se anularem mutuamente, dificultando, assim, a deformação do material. Além disso, para ligas de alumínio com 4% Mg, aparecem, ao redor das partículas, precipitados Mg_2Si que aumentam a possibilidade de haver endurecimento por precipitação, além de contarem com a produção, por causa das altas energias de deformação, de discordâncias geometricamente necessárias.

4.2 Arranjos simétricos: distribuição uniforme de partículas

4.2.1 Arranjo pentagonal

O Gráfico 1 apresenta os efeitos da aproximação mútua de partículas quadradas na resistência do material composto, para o caso de configuração pentagonal. Essas aproximações sucessivas foram obtidas fazendo variar $C = a_n L$, onde $a_n = 10,0; 5,0; 4,0; 3,5; 3,0; 2,5; 2,0; 1,5$.

Para $C = 10,0 L$, não se notou diferença significativa em relação a $C = 5,0 L$. As maiores interações entre partículas ocorreram no intervalo $1,0 < a_n < 5,0$.

Usou-se o mesmo método de aproximação mútua entre partículas circulares, e os dados de tensões máximas e mínimas foram reunidos na Tabela 1. O Gráfico 1 foi construído para comparação.

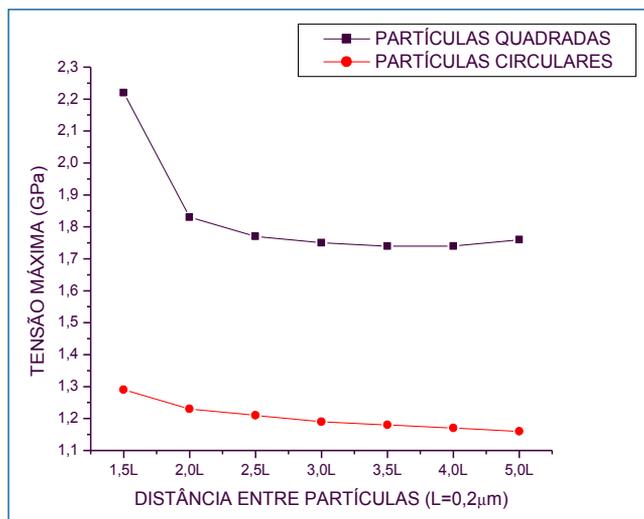


Gráfico 1 Tensões máximas em função da distância entre partículas para o arranjo pentagonal de partículas quadradas e circulares.

O Gráfico 1 mostra que as formas das partículas são determinantes para a diferença entre os níveis de tensões térmicas. As partículas quadradas induzem um valor muito maior de tensão máxima que as partículas circulares. Essa tensão chega a ser aproximadamente 70% maior para partículas quadradas do que para partículas circulares, quando a distância entre as partículas de mesma forma é de 1,5 L. Quando se refere às tensões mínimas, o quadro muda. As tensões mínimas são maiores para as partículas circulares do que para as partículas quadradas. No entanto, essas tensões estão bem abaixo do limite de escoamento do material no ponto em que elas ocorrem, em qualquer um dos casos.

TABELA 1

Tensões máximas e mínimas em função das aproximações interpartículas no arranjo pentagonal. Medidas em Pa

C		5,0L	4,0L	3,5L	3,0L	2,5L	2,0L	1,5L
PARTÍCULAS QUADRADAS	SMN	5,90.10 ⁷	5,57.10 ⁷	5,29.10 ⁷	4,86.10 ⁷	4,18.10 ⁷	2,97.10 ⁷	0,557.10 ⁷
	SMX	1,76.10 ⁹	1,74.10 ⁹	1,74.10 ⁹	1,75.10 ⁹	1,77.10 ⁹	1,83.10 ⁹	2,22.10 ⁹
PARTÍCULAS CIRCULARES	SMN	6,05.10 ⁷	5,79.10 ⁷	5,58.10 ⁷	5,26.10 ⁷	4,74.10 ⁷	3,82.10 ⁷	1,99.10 ⁷
	SMX	1,16.10 ⁹	1,17.10 ⁹	1,18.10 ⁹	1,19.10 ⁹	1,21.10 ⁹	1,23.10 ⁹	1,29.10 ⁹

Com base no Gráfico 1, conclui-se que a forma das partículas é mais importante que a distância entre elas nas condições de distribuição uniforme, pois, para as várias aproximações discriminadas na Tabela 1, as diferenças maiores entre as tensões máximas não chegam a 28% para partículas quadradas e 12% para as partículas circulares. Esses dados estão de acordo com as previsões de vários autores (ZHIRUI; TZI-KANG; LLOYD, 1993; VIRRO; PILLING, 1990; FERRY et al., 1993).

A Figura 6 indica os campos de tensão nos casos em que as dimensões do modelo são 5,0 L e 1,5 L, ou seja, nos casos em que as partículas foram bastante aproximadas. Verifica-se, dessa maneira, que a distribuição de tensões modifica-se muito. No primeiro caso, para 5,0 L, a interferência entre os campos de tensão gerados por cada partícula individualmente é praticamente nula, ou seja, quase não há interação entre as partículas. Quando se compara a Figura 6(a) com a Figura 5(a), verifica-se que a forma do campo de tensões é basicamente a mesma, sendo também pequena a diferença entre os valores de tensão.

Quando se analisa a Figura 6(b), pode-se verificar a grande interação entre os campos de tensão quando as partículas estão muito próximas. A distribuição de tensões é bem diferente do caso analisado no item anterior, em que tensões maiores ocorrem em pontos mais próximos das partículas, isto é, elas estão concentradas em torno das partículas, enquanto, no caso de partículas mais próximas, o “espalhamento” dessas tensões é maior.

PARTÍCULAS QUADRADAS

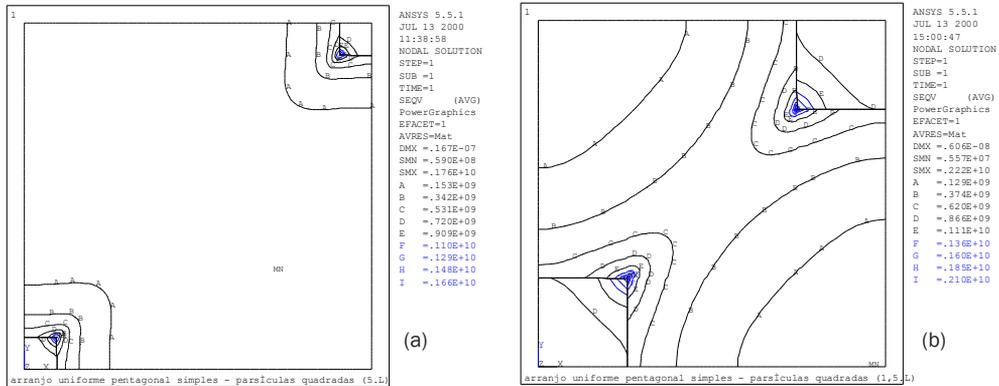


Figura 6 Campos de tensão quando as partículas quadradas estão afastadas de 5,0 L e 1,5 L. Unidades em Pa.

A Figura 7 representa os campos de tensão para partículas circulares. Nesse caso, também se percebe a influência da aproximação das partículas sobre o campo de ten-

são. A configuração do campo é parecida com a do caso anterior, porém os níveis de tensão são menores, chegando a ser bem menores em pontos afastados do contorno da partícula para a dimensão de 5,0 L. Quando se compara a forma quadrada de partícula com a forma circular, quando estas estão bem próximas, nota-se um campo de tensão bem mais intenso para as partículas quadradas do que para as partículas circulares, considerando modelos de mesmas dimensões, o que está de acordo com as previsões de Christman, Needleman e Suresh (1989).

PARTÍCULAS CIRCULARES

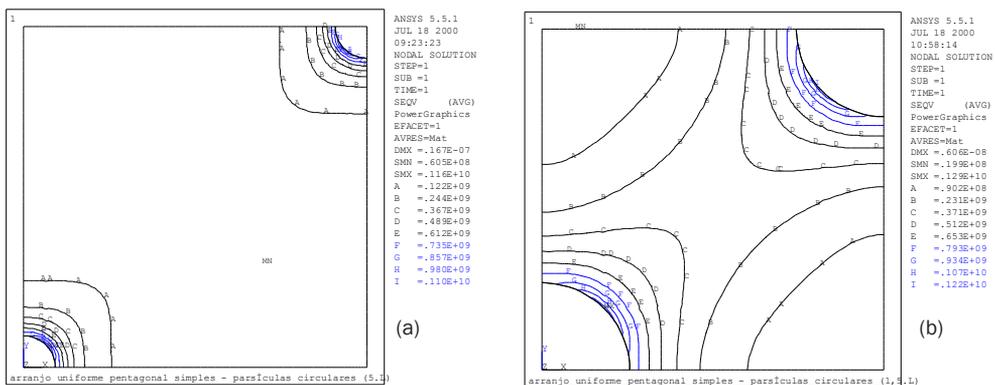


Figura 7 Campos de tensão quando as partículas circulares estão afastadas de 5,0 L e 1,5 L. Unidades em Pa.

A diferença entre os níveis de tensão ao redor das partículas quadradas e circulares está no fato de que aquelas apresentam cantos vivos cujo efeito é aumentar a tensão.

4.2.2 Arranjo quadrado

Nessa configuração, verificou-se uma inversão de efeitos. O arranjo de partículas circulares produziu um conjunto de tensões maiores que o arranjo de partículas quadradas para as várias aproximações efetuadas, contrariando as previsões. A diferença entre tensões máximas para a distância interpartícula de 1,5 L é muito maior entre as duas formas de partículas do que quando a distância entre elas é de 5,0 L. Com base na Figura 8, pode-se afirmar que o arranjo de partículas quadradas apresenta um bom refinamento de malhas em toda a extensão do modelo; no entanto, na configuração de partículas circulares, o refinamento é bom em uma diagonal. Já na outra, as malhas grosseiras não permitiram um bom traçado das curvas de isotensão, influenciando na precisão dos resultados.

A Figura 8 indica os campos de tensão para partículas quadradas, e a Figura 9 mostra a distribuição de tensões para partículas circulares, todas obtidas por meio do arranjo quadrado. No modelo de 5,0 L, onde as partículas estão muito afastadas entre si, não há quase interação entre os campos de tensão produzidos pelas partículas individualmente, porém, quando essas partículas são aproximadas nas dimensões indicadas pelas figuras 8(b) e 9(b), verifica-se uma grande interação entre os campos de tensão.

PARTÍCULAS QUADRADAS

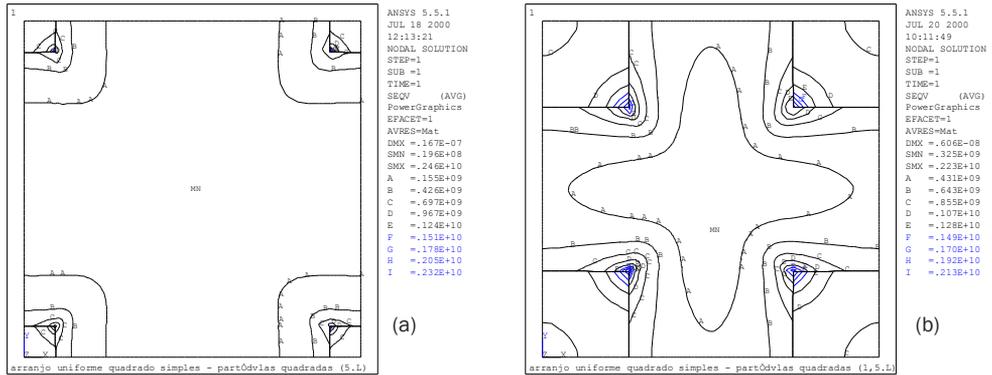


Figura 8 Arranjo quadrado de partículas quadradas em modelo de 5,0 L e 1,5 L. Unidades em Pa.

PARTÍCULAS CIRCULARES

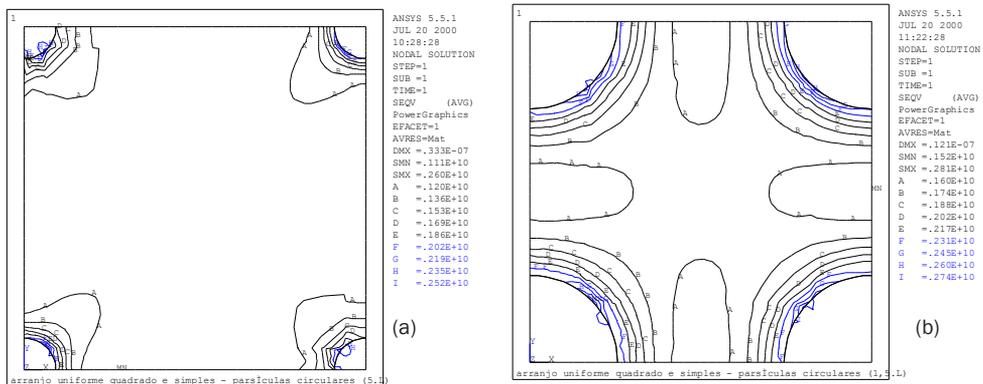


Figura 9 Arranjo quadrado de partículas circulares em modelo de 5,0 L e 1,5 L. Unidades em Pa.

Nas figuras 8(b) e 9(b), pode-se notar a diferença entre os traçados das curvas de isotensão, a qual ocorre por causa da forma, já que as outras grandezas, físicas e geométricas, mantiveram-se constantes.

5 CONCLUSÕES

Em alguns casos modelados, especialmente no arranjo quadrado de partículas circulares, ocorreram imprecisões por causa das limitações do programa cujo número máximo de nós (8.000) não permitiu um grande refinamento de malhas. A análise referiu-se apenas a tensões térmicas causadas por diferenças nos coeficientes de dilatação dos materiais, ou seja, o modelo não sofreu a ação de outras cargas que não fossem as térmicas.

Quando se comparam configurações diferentes de distribuição uniforme, percebe-se que as tensões térmicas são fortemente afetadas por essa diferença de distribuição, ou seja, no caso do arranjo quadrado, desenvolvem-se tensões muito maiores do que no caso do arranjo pentagonal, para qualquer forma de partícula. Essa previsão está de acordo com muitos pesquisadores (CHRISTMAN; NEEDLEMAN; SURESH, 1989; KOMENDA; HENDERSON, 1991; SORENSEN, 1991; GEHANNON; BRECHET, 1991) que concordam com a proposição de que a distribuição de partículas influi na resistência do material compósito por afetar a distribuição de tensões na matriz. Além da configuração, a forma da partícula e o seu tamanho alteram o campo de tensões no material, colaborando para o desenvolvimento dos mecanismos de resistência deste. O método de elementos finitos, baseado na mecânica do contínuo, permite determinar a distribuição de tensões e, assim, estudar a sua influência na resistência do material, e a precisão do método depende das condições fornecidas, o que implicará também um refinamento maior ou menor de malhas. No entanto, esse método não é o único, há, por exemplo, o princípio da inclusão de Eshelby para a determinação dessas tensões, de maneira que o seu estudo oferece condições para que os métodos possam ser comparados. Um outro fato importantíssimo é a ocorrência da distribuição não uniforme de reforços, em que os agrupamentos de partículas exercem muita influência na resistência do compósito por meio de alguns fenômenos já descritos anteriormente.

REFERÊNCIAS

- CHRISTMAN, T.; NEEDLEMAN A.; SURESH, S. An experimental and numerical study of deformation in metal – ceramic composites. *Acta Metallurgica*, v. 37, n. 11, p. 3029-3050, 1989.
- CLYNE, T. W.; WITHERS, P. J. *An introduction to metal matrix composites*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- FERRY, M. et al. The effect of particulate distribution on the grain size distribution in an aluminum 2014/Al₂O₃ PMMC. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMPOSITE MATERIAL, 1993, Wollongong. Wollongong, Australia: The Minerals Metals & Materials Society, 1993. p. 1259-1264.
- GEHANNO, H.; BRECHET, Y. J. M. Effect of particle distribution on internal stresses in a fibre - reinforced composite: an analytical approach. In: CONFERENCE: METAL - MATRIX COMPOSITES, PROCESSING, MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES, 1991, France. France: Domaine Universitaire de Grenoble, Riso National Laboratory, Materials Department, 1991. p. 355-360.
- KOMENDA, J.; HENDERSON, P. J. Microstructure and creep properties of an aluminum alloy/Al₂O₃ fiber composite. In: CONFERENCE: METAL MATRIX COMPOSITES: PROCESSING MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES, 1991, Roskild. Roskild, Denmark: Swedish Institute for Metals Research, Riso National Laboratory, Materials Department, 1991. p. 449-454.
- MCDANELS, D. L. Analysis of stress – strain, fracture and ductility behavior of aluminum matrix composite containing discontinuous SiC-reinforcement. *Metallurgical Transactions*, v. 16A, p. 1105-1115, 1985.
- MOURISCO, A. J. *Preparação e caracterização de compósito de matriz de alumínio 1100 com partículas de SiC por metalurgia do pó*. 1995. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear)– Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1995.
- NARDONE, V. C.; PREWO, K. M. On the strength of discontinuous SiC – reinforced aluminum composites. *Scripta Metallurgica*, v. 20, p. 43-48, 1985.
- SHEN, Y. L. et al. Effective elastic response of two – phase composites. *Acta Metallurgica et Materialia*, v. 42, n. 1, p. 77-97, 1994.
- SORENSEN, N. Effects of clustering on the creep properties of whisker reinforced aluminum. In: CONFERENCE: METAL – MATRIX COMPOSITES, PROCESSING, MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES, 1991, Roskild. Roskild, Denmark: Swedish Institute for Metals Research, Riso National Laboratory, Materials Department, 1991. p. 667-673.
- TAYA, M.; ARSENAULT R. J. *Metal matrix composites – thermomechanical behavior*. Oxford: Pergamon Press, 1989.

VIRRO, P; PILLING, J. Superplasticity in spray deposited AA-7475 with SiC reinforcement. In: CONFERENCE: SUPERPLASTICITY IN AEROSPACE II, 1990, Anaheim, California. Anaheim, CA: The Minerals, Metal & Materials Society, 1990. p. 47-63.

YOSHIMURA, H. N. *Produção e caracterização de compósito de matriz de alumínio reforçada com partículas de SiC obtidos por extrusão de pó*. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica)–Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

ZHIRUI, W.; TZI-KANG, Z.; LLOYD, D. J. Stress distribution in particulate – reinforced metal – matrix composite subjected to external load. *Metallurgical Transaction A*, v. 24A, n. 1, p. 197-207, 1993.