

# DESENVOLVIMENTO DE UM COMPOSITO PARTICULADO PARA APLICAÇÃO EM ESTRUTURAS DE MÁQUINAS DE PRECISÃO

Túlio Hallak Panzera<sup>(2)</sup>  
Juan C. Campos Rubio<sup>(3)</sup>

## Resumo

Muitas das tecnologias modernas exigem materiais com combinações incomuns de propriedades as quais não podem ser atendidas pelos materiais convencionais; isso é especialmente verdadeiro quando características como boa estabilidade e geometrias complexas são exigidas. Desta forma, a aplicação de materiais compósitos em estruturas para máquinas de precisão vem crescendo cada vez mais. O material estudado neste trabalho consiste em um compósito particulado de esferas de sílica envolvido por uma matriz polimérica. As partículas de sílica foram classificadas em um sistema trimodal segundo o modelo de Furnas usado na otimização de empacotamento. Modelos micromecânicos foram utilizados na previsão das propriedades mecânicas efetivas do compósito, como também ensaios mecânicos e análise em elementos finitos foram realizados a fim de comprovar o comportamento do material. Para a construção da estrutura da máquina fresadora utilizou-se o compósito #4 o qual apresentou o melhor resultado.

**Palavras-chave:** Compósito polimérico particulado (sílica/epóxi); Modelo micromecânico; Tratamento mineral; Empacotamento de partículas; Elementos finitos.

(1) 60º Congresso Anual da ABM, 25 a 28 de julho de 2005, Belo Horizonte.

(2) M.Sc., Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica. Av. Antonio Carlos 6627, Belo Horizonte, MG 31.270-901.

(3) Dr., Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica. Av. Antonio Carlos 6627, Belo Horizonte, MG 31.270-901.

## 1 INTRODUÇÃO

Em meados da década de 70, o uso de partículas na indústria de plásticos iniciou-se quando se constatou que o custo de plásticos podia ser reduzido pela incorporação de materiais inertes. Mais recentemente, partículas foram empregadas para melhoramento de certas propriedades mecânicas, ficando conhecidas como partículas *reforçadoras*, denominada fase dispersa. Nestes compósitos, o reforçador normalmente fornece a resistência à tração e rigidez, sendo a matriz responsável pela boa adesão da interface matriz e reforçadores (Almeida & Monteiro, 1998). Os materiais mais comuns para matrizes de compósitos são os polímeros. Segundo Stellbrink (1996), os polímeros podem ser classificados em termorígidos e termoplásticos. Dentre os tipos mais comuns de matrizes poliméricas termorígidas destacam-se as de epóxi, de poliéster e as de vinil éster. De uma maneira geral, pode-se considerar um compósito como sendo qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades. Além disso, as fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e devem estar separadas por uma interface distinta (Callister, 2002).

Do ponto de vista da aplicação de compósitos, a determinação das propriedades efetivas torna-se um item de fundamental importância, a fim de prever as propriedades efetivas termo-elásticas de um compósito baseado em suas propriedades, arranjo e a fração volumétrica das fases. Este estudo é denominado como *micromecânica* (Stellbrink, 1996), a condição de interface partícula-matriz pode ser perfeita ou parcialmente aderida (interface fraca). A interface fraca ou interface imperfeita surge devido a reações químicas entre os constituintes ou pode ser introduzida no projeto do compósito para alterar as suas propriedades. Segundo Hashin (2002), quando a proporção entre os módulos das diferentes fases é muito grande, para relações de dureza mútua até mais ou menos 10, os limites derivados não são muito precisos e fornecem péssimas estimativas para os módulos efetivos.

O uso da sílica cristalina ( $\text{SiO}_2$ ) é resultado de sua alta dureza, estabilidade química, resistência ao calor, baixo coeficiente de expansão térmica e boas propriedades elétricas de isolamento. Furnas Apud Pandolfelli (2000) mostrou que as proporções dos vários tamanhos de partículas envolvidas na elaboração de uma distribuição de máxima densidade de empacotamento formam uma progressão geométrica. Para se conseguir tal característica deve-se estudar diferentes porcentagens dos componentes a fim de obter o melhor coeficiente de empacotamento do material; isso ocorre quando as partículas finas preenchem completamente os vazios existentes entre as maiores. Segundo Ribeiro (1998), a otimização do coeficiente de empacotamento pode ser feita de maneira prática e simplificada, através do denominado ensaio de Feret, o qual considera um sistema trimodal. Um fator importante, que deve ser considerado na obtenção de misturas com elevadas densidades de empacotamento é o denominado “efeito de parede”, o qual pode ser explicado como sendo aquele que surge no empacotamento de partículas pequenas (finas) na superfície de partículas maiores (grossas). Assim quando a relação entre os diâmetros efetivos das partículas é tal que permita a uma partícula fina considerar a superfície de contato com uma partícula grossa como praticamente plana, a porosidade na região próxima à superfície das partículas grossas será maior que no restante do volume (Pandolfelli, 2000), modificando as propriedades nesta região.

## 2 METODOLOGIA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 2.1 Composição do Compósito Particulado

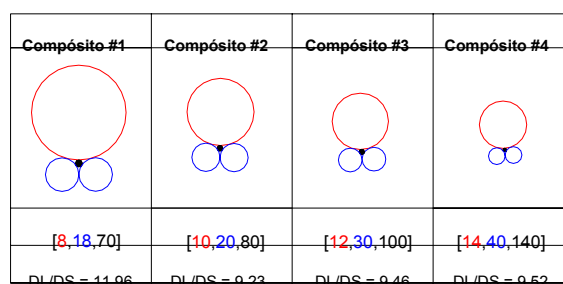
A caracterização visual da forma dos grãos das areias foi feita através da observação das mesmas, utilizando um microscópio óptico. As propriedades gerais da areia de sílica foram obtidas através de um programa de seleção de materiais conhecido como CES-4 (*Cambridge Engineering Selector*). As propriedades da matriz, coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade foram determinadas através de ensaios mecânicos de tração (D 638-97, ASTM) e compressão (D 695-96, ASTM), respectivamente.

**Tabela 1.** Propriedades mecânicas das fases do compósito.

| <i>Fase Matriz: resina epóxi</i>       | <i>Fase dispersa: areia de sílica</i> |
|--|---------------------------------------|
| Coeficiente de Poisson: 0,35           | Coeficiente de Poisson: 0,17          |
| Módulo de elasticidade: 2,15GPa        | Módulo de elasticidade: 63GPa         |
| Tensão máxima de resistência: 82,55MPa | Formato: grãos arredondados           |

### 2.2 Modelo de Furnas

Foram escolhidos 4 modelos distintos distribuídos uniformemente na curva granulométrica, dando origem aos seguintes compósitos #1, #2, #3, #4, seguindo uma seqüência de módulo de finura decrescente, (Figura 1).



**Figura 1.** Modelos de empacotamento considerando misturas trimodais.

#### Previsão de desempenho:

- O aumento do tamanho das partículas diminui o módulo de elasticidade: (#4 e #3).
- A densidade de empacotamento se eleva com o aumento do valor do quociente [DL/DS]: (#1 e #4).
- O efeito de parede é desconsiderado quando a relação entre os diâmetros maiores e menores é maior ou igual a 10: (#1).

### 2.3 Classificação das Partículas

As areias de sílica foram classificadas, seguindo a norma CEMP nº 81 da ABIFA, para determinação da distribuição granulométrica, (Figura 2). Segundo Rotheron (1995), o efeito do tamanho da partícula no módulo de elasticidade em um compósito epóxi preenchido com esferas de vidro diminui linearmente com o aumento do tamanho das partículas e quanto mais afastada do formato esférico for a partícula, menor é a densidade de empacotamento de uma distribuição que a contenha.

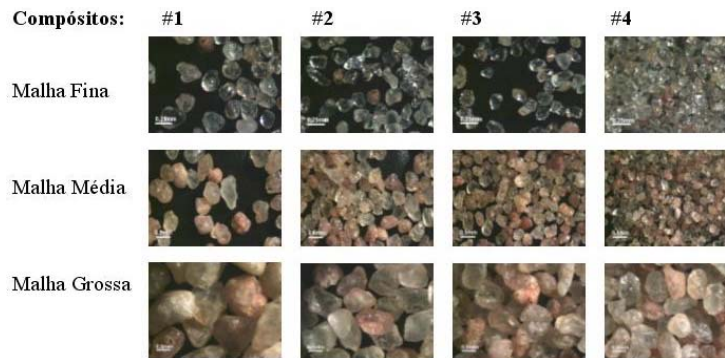


Figura 2. Classificação das partículas para cada compósito.

Previsão de desempenho:

- Partículas mais arredondadas apresentam uma maior densidade de empacotamento: (#4)
- Partículas de tamanhos menores apresentam um maior módulo de elasticidade: (#4)

**2.4 Determinação da Composição da Mistura Trimodal**

A otimização do coeficiente de empacotamento é feita baseado no ensaio de Feret, utilizando um triângulo com subdivisões. Cada ponto marcado no interior do triângulo representa uma porcentagem de diferentes tamanhos de partículas (A, B e C), determinando a área do triângulo onde fica localizado o menor volume. Assim, consegue-se mais rapidamente encontrar a mistura que apresenta o melhor empacotamento, (Figura 3).

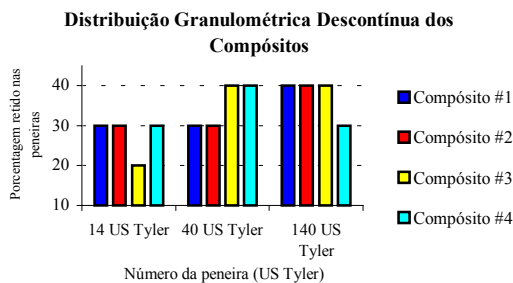


Figura 3: Composições, ensaio de Feret.

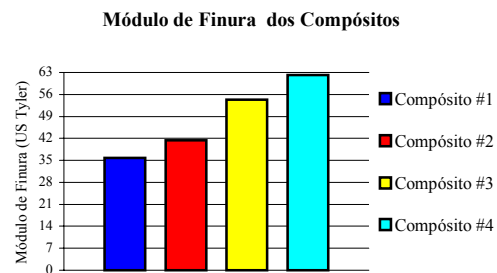


Figura 4: Módulos de finura dos compósitos.

Previsão de desempenho:

- Observa-se na figura 3, uma tendência no aumento da porcentagem de partículas finas para obtenção de uma densidade de empacotamento máximo. Os compósitos #1, #2 e #3 apresentaram em suas composições 40% de partículas finas.
- O módulo de finura representa a média ponderada das misturas trimodais obtidas, apresentando os valores 35,8; 41,4; 54,4; 62,2 para os compósitos #1, #2, #3 e #4 respectivamente, (Figura 4).

## 2.6 Previsão das Propriedades Efetivas do Compósito

A previsão das propriedades mecânicas foi feita utilizando-se dois modelos micromecânicos, baseados nos estudos de Hashin (1983) e Turcsányi Apud Almeida e Monteiro (1998).

Segundo Rothon (1995) o aumento da fração volumétrica de particulado ( $V_p$ ) aumenta o módulo de deformação volumétrica. Com o aumento da fração volumétrica ( $V_p$ ), o módulo de cisalhamento ( $G$ ) passa por um valor máximo e posteriormente uma diminuição. No ensaio de cisalhamento, ao redor do ponto máximo de cisalhamento ( $G$ ), é observado um crescimento de trinca não contínuo, como também uma propagação *stick-slip*.

O grande empenho e esforço na modelagem de um compósito particulado foram realizados por Zvi Hashin, baseado nos trabalhos de Hill. Os limites inferiores (-) e superiores (+) dos módulos de deformação volumétrica (1) e de cisalhamento (2) efetivos obtidos por Hashin e Shtrikman (1963) são:

$$K_{(-)}^* = K_m + \frac{V_p}{\frac{1}{(K_p - K_m)} + \frac{3V_p}{(3K_m + 4G_m)}} \quad K_{(+)}^* = K_p + \frac{(1 - V_p)}{\frac{1}{(K_m - K_p)} + \frac{3V_p}{(3K_p + 4G_p)}} \quad (1)$$

$$G_{(-)}^* = G_m + \frac{V_p}{\frac{1}{(G_p - G_m)} + \frac{6(1 - V_p)(K_m + 2G_m)}{5G_m(3K_m + 4G_m)}} \quad G_{(+)}^* = G_p + \frac{(1 - V_p)}{\frac{1}{(G_m - G_p)} + \frac{6V_p(K_p + 2G_p)}{5G_p(3K_p + 4G_p)}} \quad (2)$$

Quando:

$$K_m < K_p$$

$$G_m < G_p$$

Onde:

|  |   |
|--|---|
| <b>E</b> módulo de elasticidade                                    | <b>(*)</b> indica propriedades efetivas |
| <b>G</b> módulo de cisalhamento                                    | <b>(+)</b> limite superior              |
| <b>K</b> módulo de deformação volumétrica                          | <b>(-)</b> limite inferior              |
| <b><math>V_p</math></b> indica a fração volumétrica de particulado | <b>(m)</b> indica a matriz              |
|  | <b>(p)</b> indica as partículas         |

Os limites superiores e inferiores do módulo de elasticidade efetivo seguem da relação usual entre os módulos de volume e cisalhamento para quaisquer limites de  $K$  e  $G$ .

$$E_{(\pm)}^* = \frac{9K_{(\pm)}^* G_{(\pm)}^*}{3K_{(\pm)}^* + G_{(\pm)}^*} \quad (3)$$

O coeficiente de Poisson efetivo pode ser determinado pela equação 4, conhecida como regra da mistura.

$$\nu^* = V_p \nu_p + (1 - V_p) \nu_m \quad (4)$$

Para a proporção de 20% de matriz e 80% de particulado os valores obtidos para o módulo de elasticidade e Poisson são 29,24GPa e 0,23, respectivamente.

Devido a diferença entre os valores dos módulos das fases apresentados neste trabalho ser maior que 10 vezes, adotou-se o modelo de Turcsányi, que correlaciona o estado de tensão do compósito particulado com a distribuição de empacotamento,

morfologia e a adesão matriz-particulado, a fim de comparar os resultados e verificar a característica das interfaces. A equação proposta para o cálculo do módulo de elasticidade efetivo, introduz um fator de eficiência  $\varphi$ , obtido diretamente através dos valores do parâmetro B (Tabela 2), calculado a partir da equação 5.

**Tabela 2.** Fator de eficiência ( $\varphi$ ) em função das propriedades da interface (B).

| $B(\varphi)$ |                       |
|--------------|-----------------------|
| $B > 3$      | $\varphi = 1$         |
| $B \leq 3$   | $0,3 < \varphi < 0,5$ |
| $B \leq 2,5$ | $\varphi = 0$         |

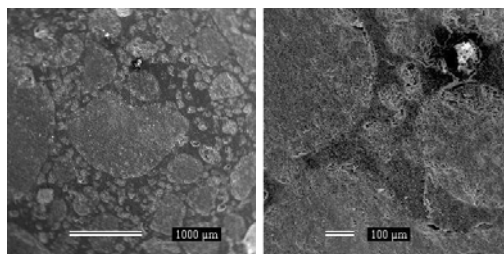
$$\sigma_{yc} = \left( \frac{1 - V_p}{1 + \Lambda V_p} \right) \times (\sigma_{ym}) \times \exp(BV_p) \quad (5)$$

Os índices  $c$  e  $m$ , correspondem ao compósito e à matriz, respectivamente.  $\Lambda$  corresponde ao parâmetro de forma relacionado com a distribuição de empacotamento das partículas. Para partículas arredondadas, seu valor é de 2,5.  $B$  é o parâmetro relacionado com as propriedades da interface matriz-particulado. Para valores de  $B \leq 3$  a interface é fraca e não é obtido o efeito de reforço da partícula. Entretanto, quando B aproxima-se de zero, não existe nenhum efeito reforçador e a ação da partícula é nula. Então, se tem a equação para o cálculo do módulo de elasticidade efetivo:

$$E_c = (E_p)^{\varphi V_p} \times (E_m)^{1 - V_p} \quad (6)$$

O parâmetro B calculado é de 2,96 indicando uma adesão de interface fraca. Após a determinação do fator de eficiência, calcula-se o módulo de elasticidade efetivo do compósito pela equação 6, apresentando um valor de 6,11GPa.

Considerando a discrepância dos resultados entre os modelos micromecânicos e objetivando a análise das condições de interface matriz-particulado realizou-se uma foto (Figura 5) do compósito de melhor desempenho (#4) no microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca JEOL, modelo JSM-840A.



**Figura 5.** Imagens de microscópio eletrônico de varredura do compósito #4.

Pode-se observar a ausência de bolhas no interior do compósito e uma distribuição homogênea das partículas, mostrando a ausência do efeito de parede. Entretanto, verifica-se a presença de micro bolhas na superfície do compósito. Esta por sua vez, pode ter sido a principal causa na diferença dos resultados entre os modelos micromecânicos propostos. Os fatores que podem ter influenciado o surgimento de

bolhas são: a viscosidade da resina, a amplitude da vibração no vazamento do material e principalmente, a ausência de vácuo no processo de cura.

## 2.7 Previsão do Comportamento Mecânico do Compósito

O programa de simulação numérica Ansys<sup>TM</sup> (vs. 5.7) possibilitou a previsão do comportamento do material sob esforços de flexão. A seção do corpo de prova de flexão possui uma forma retangular, com dimensões de 20mm x 4mm. A distância entre os apoios para a realização do ensaio de flexão é de 39,7mm. A carga aplicada no centro do corpo de prova foi de 140N. A Figura 6 mostra o estado de deformação do corpo de prova, apresentando um deslocamento linear (flecha) de 0,281mm.

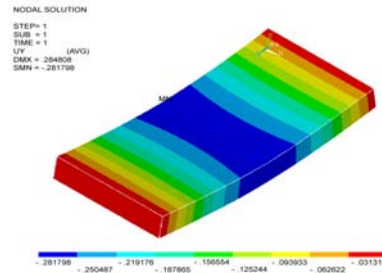


Figura 6. Resultado da previsão das deformações do corpo de prova.

## 2.8 Ensaio Mecânico de Compressão

O número de corpos de prova utilizados para o ensaio mecânico de compressão (D695-96, ASTM) foi de 10 por compósito. A Tabela 3 apresenta os resultados de módulo de elasticidade e tensões de resistência máxima para os compósitos.

Tabela 3. Resultados experimentais.

| <b>Resultados dos módulos de elasticidade dos compósitos (MPa)</b> |              |              |              |              |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
|  | Compósito #1 | Compósito #2 | Compósito #3 | Compósito #4 |
| Média  | 7365,22      | 5966,21      | 7174,97      | 7663,96      |
| Desvio-padrão  | 333,02       | 626,32       | 253,44       | 387,31       |
| <b>Resultados das Tensões de Resistência Máxima (MPa)</b>          |              |              |              |              |
|  | Compósito #1 | Compósito #2 | Compósito #3 | Compósito #4 |
| Média  | 81,07        | 76,00        | 83,76        | 85,04        |
| Desvio-padrão  | 2,95         | 5,86         | 3,83         | 2,27         |

De acordo com a previsão de resultados, o *compósito #4* apresentaria o maior módulo de elasticidade, levando em consideração, o tamanho e o formato da partícula. Os gráficos da Figura 7 comprovam esta estimativa.

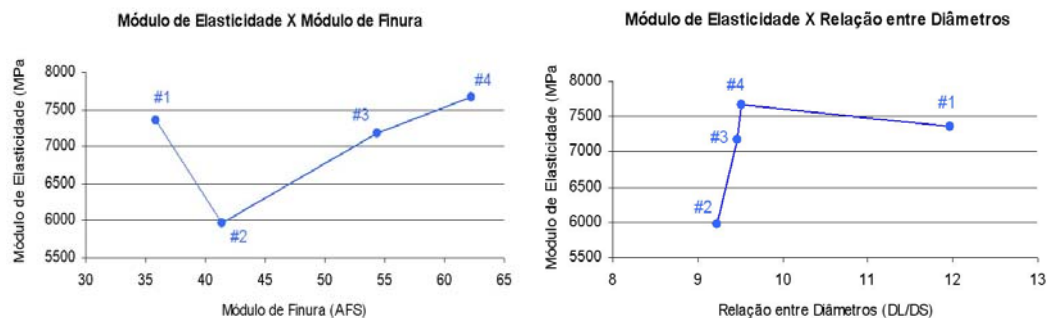
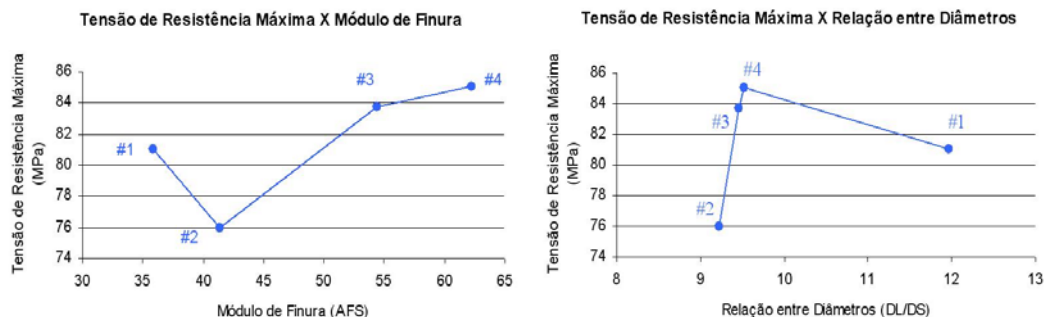


Figura 7. Gráficos comparativos dos módulos de elasticidade em função dos módulos de finura e relações entre diâmetros dos compósitos.

Os resultados das tensões máximas apresentadas no gráfico da figura 8, mostra a mesma tendência entre os resultados de módulo de elasticidade, embora as características de tamanho e forma da partícula estejam em evidência com o resultado positivo obtido pelo *compósito* #3.



**Figura 8.** Gráfico comparativo das tensões de resistência máxima em função dos módulos de finura e relações entre diâmetros dos compósitos.

Esta análise mostrou-se coerente com os resultados experimentais, indicando a significância do fator de empacotamento das partículas, como também do efeito de parede (características da interface) nas propriedades mecânicas efetivas do material. Portanto, os resultados obtidos pelos compósitos #1 e #4 na previsão de desempenho são concordantes aos resultados experimentais.

## 2.9 Comparação entre os Modelos Micromecânicos e os Ensaios Experimentais

Visando a comparação dos resultados dos módulos de elasticidade entre os modelos micromecânicos e os valores experimentais, construiu-se um gráfico considerando o valor médio entre os limites determinado pelo método de Hashin, o valor determinado pelo método de Turcsányi e a média dos dados experimentais de todos os compósitos.

O principal motivo pela discrepância entre os resultados experimentais e o modelo micromecânico proposto por Hashin pode ter sido a presença de micro bolhas na superfície dos compósitos, já que através da microscopia eletrônica permitiu-se identificar uma caracterização de interface perfeita. O método de Turcsányi mostrou-se eficaz na previsão das propriedades mecânicas efetivas baseando-se nos resultados experimentais dos compósitos. Através do parâmetro B que indica as condições de interface, pode-se avaliar a adesão da interface, como também, verificar o comportamento do material, comparando seus resultados com outros modelos, tornando-o uma ferramenta útil no estudo e desenvolvimento de novos materiais.

## 2.10 Ensaio Mecânico de Flexão em Três Pontos

A dimensão dos corpos de prova adotada para o ensaio mecânico de flexão em três pontos seguiu recomendações da norma D 5023 para polímeros da ASTM, com valores de 100mm x 20mm x 4mm.

O deslocamento linear experimental foi de 0,215mm, apresentando um valor próximo ao resultado teórico. Desta forma, considerando o resultado de deslocamento linear teórico de 0,281mm, pode-se dizer que o material compósito



particulado apresentou um comportamento previsto, mostrando seu desempenho em aplicações estruturais.

### 2.11 Estrutura para Máquina de Precisão

Em função dos resultados obtidos nas etapas de análise de compartimento mecânico dos compostos, foi adotado o composto #4, o qual apresentou o melhor desempenho, permitindo a construção de uma estrutura para uma máquina de precisão de pequeno porte (Figura 9).



Figura 9. Aspecto final da estrutura da máquina construída.

## 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As propriedades mecânicas de compósitos particulados de matriz epóxi e partículas de sílica podem ser significativamente alteradas modificando as propriedades das fases, principalmente a fase dispersa estudada neste trabalho. Foi possível constatar que dentre as características mais relevantes que influenciam nas propriedades efetivas do material encontram-se: o tamanho, a forma e o quociente entre os diâmetros maiores e menores da partícula. Baseado nestas afirmações pode-se estimar as características da fase dispersa para a obtenção de um compósito com propriedades otimizadas, onde, o módulo de finura da mistura de partículas deve ser alto o suficiente e, ao mesmo tempo, apresentar uma relação entre diâmetros maior do que 10. Quanto à forma da partícula, deve ser o mais próximo do formato esférico, aumentando a densidade de empacotamento e conseqüentemente as propriedades mecânicas do compósito. Desta forma o compósito particulado que apresentou estas características, como também, o melhor desempenho mecânico foi o *compósito #4*, com um módulo de elasticidade médio de 7,6GPa. Por sua vez, o *compósito #2* obteve o pior desempenho, com uma baixa relação entre diâmetros e módulo de finura, apresentando um módulo de elasticidade médio de 5,9GPa.

Embora a condição da interface ter sido considerada fraca pelo método de Turcsányi, constatou-se pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) uma interface perfeita com ausência do efeito de parede. Verificou-se também a presença de micro bolhas superficiais nos compósitos, sendo este o possível responsável pela discrepância dos resultados entre os modelos micromecânicos.

Finalmente, os resultados obtidos permitiram a construção de uma estrutura de máquina, conferindo à mesma características que permitem enquadrá-la dentro da área de mecânica de precisão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ALMEIDA, J. R. M.; MONTEIRO, S. N. The resin/hardener ratio as a processing parameter for modifying the mechanical behavior of epóxi-matrix/Glass microsphere composite. **Composites Science and Technology**, vol. 58, Elsevier Science Publisher B. V., 1998, pp. 1593 - 1598.
- 2 BLOOM, P. D. et al. Development of novel polymer/quasicrystal composite materials. **Materials Science and Engineering**, 2000, pp. 156 - 159.
- 3 CALLISTER, Jr. W. D., **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., RJ, 2002.
- 4 DENÍCULI, F. D. **Determinação de propriedades termoelásticas de compósitos particulados de matriz de metal utilizando um modelo micromecânico**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia da UFMG/DEMEC, Belo Horizonte, MG, 1999.
- 5 HASHIN, Z. Analysis of composite material. **Journal of Applied Mechanics**, vol. 50, 1983, pp. 481 - 505.
- 6 HASHIN, Z.; MONTEIRO, P. J. M. An inverse method to determine the elastic properties of the interphase between the aggregate and the cement paste. **Cement and Concrete Research**, vol. 32, 2002, pp. 1291 - 1300.
- 7 HASHIN, Z.; SHTRIKMAN, S. A variational Approach to the Theory of the Elastic Behavior of Multiphase Materials. **J. Mech. Phys. Solids**, vol 11; 1963, pp. 127 - 139.
- 8 KELLY, E. G., SPOTTISWOOD, D. J. **Introduction to mineral processing**. Canada, 1982.
- 9 PANDOLFELLI, V. C. et al. **Dispersão e empacotamento de partículas**. São Paulo, SP, 2000.
- 10 RAWLE, A. **The basic principles of particle size analysis**. Malvern Instruments, Spring Lane South, U.K., 2000.
- 11 RIBEIRO, F. M. M. **Técnicas de projeto para aplicação de granito sintético em estrutura de microscópio óptico**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Paulo, SP, 1998.
- 12 ROTHON, R. **Particulate-filled polymer composites**. Polymer Science and Technology Series, Longman Scientific & Technical, England, 1995.
- 13 STELLBRINK, K. K. U., **Micromechanics of composites**. Carl Hanser Verlag, Munich Vienna New York, 1996.

*Túlio Hallak Panzera*<sup>(2)</sup>  
*Juan C. Campos Rubio*<sup>(3)</sup>

## **Abstract**

Many of the modern technologies require materials with unusual combinations of properties that cannot be met by conventional materials. This is especially true for materials that are needed for good stability and complex geometry, such as those employed in machine tools. Therefore, the application of composites in structures of precision machines is growing. The material studied in this work is a particulate composite formed by silica particles involved by a polymeric matrix. The particles were classified in a trimodal system considering Furna's model to reach the optimization of packing. Micromechanical models were used to determine the effective mechanical properties of the composite and than compared with experimental and finite element results in order to confirm the behaviour of the material. Finally, composite #4, which presented the best result, was used to manufacture the structure of a bench milling machine.

**Key-word:** polymeric particulate composite (silica/epoxy); Micromechanical models; Mineral treatment; Packing of particles; Finite elements.