

# USO DE SOFTWARE ACADÊMICO MECH-GCOMP PARA O ENSINO DE COMPÓSITOS PARTICULADOS

## USE OF MECH-GCOMP ACADEMIC SOFTWARE FOR THE TEACHING OF PARTICULAR COMPOSITES

Clarissa Coussirat Angrizani,<sup>1</sup> Eduardo Antonio Wink de Menezes,<sup>2</sup> Felipe Ferreira Luz,<sup>3</sup> Alisson Aguiar Muller,<sup>4</sup> Sandro Campos Amico<sup>5</sup>

DOI: 10.5935/2236-0158.20170002

### RESUMO

A micromecânica de materiais compósitos consiste na observação das características do par reforço/matriz, de modo a compreender e prever seu comportamento. Os *softwares* de micromecânica disponíveis não apresentam modelos para particulados em geral, o que leva a um dispêndio de tempo e recurso para se produzir e avaliar diferentes combinações de materiais. Nesse contexto, este trabalho apresenta um aplicativo (versão web) denominado MECH-Gcomp, cujo objetivo consiste no enriquecimento do ensino e da pesquisa de materiais compósitos, incluindo diversos tipos de reforços e muitos modelos analíticos que levam em consideração características específicas dos materiais, como tipo/forma do reforço. Como estudo de caso, analisou-se as propriedades de um compósito particulado CaCO<sub>3</sub>/poliéster, comparando resultados analíticos de modelos de micromecânica disponíveis na literatura e obtidos pelo referido aplicativo com resultados experimentais. Conclui-se que esse *software* facilita a realização de estimativas de propriedades de compósitos particulados, permitindo análises rápidas e confiáveis, mostrando-se aplicável no segmento acadêmico e industrial como uma ferramenta de análise preliminar.

**Palavras-chave:** Materiais compósitos; particulados; micromecânica; *software* acadêmico; modelos analíticos; ensino/pesquisa.

### ABSTRACT

The micromechanics of composite materials consists in the observation of the characteristics of the reinforcement/matrix pair in order to predict its behavior. The various micromechanics software available do not present models for particulate composites, leading to costly and time-consuming techniques to produce and evaluate distinct combinations of materials. In this context, this work presents a software (web-based) called MECH-Gcomp, devoted to research and teaching on composite materials, that include different types of reinforcements and many analytical models, which take into account specific characteristics of the materials, such as type/shape of the reinforcement. As a case study, the properties of a particulate CaCO<sub>3</sub>/polyester composite was analyzed comparing analytical results from the models available in the software with those from experimental results. The software made easy to estimate the properties of particulate composites allowing quick and reliable analysis, which may be useful in the academic/industrial sectors as a preliminary analysis tool.

**Keywords:** Polymeric composites, particulates, micromechanics, academic software, analytical models, education/research.

1 Doutoranda, UFRGS; cangrizani@hotmail.com

2 Mestre, UFRGS; eduardo.menezes@ufrgs.br

3 Doutorando, UFRGS; felipe.ferreira.luz@gmail.com

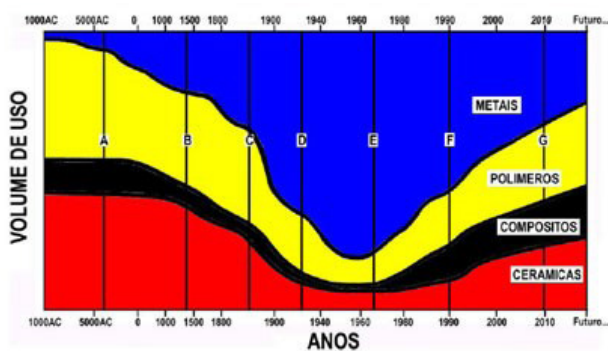
4 Graduando, UFRGS; alissonmiller@gmail.com

5 Graduando, UFRGS; alissonmiller@gmail.com

## INTRODUÇÃO

Segundo Daniel e Ishai (1994), materiais compósitos podem ser definidos como um sistema material que consiste de duas ou mais fases macroscópicas, cuja performance mecânica e propriedades são projetadas para serem superiores àquelas dos materiais constituintes, agindo isoladamente. Essa classe de material vem conquistando, ao longo das últimas décadas, cada vez mais espaço nos processos produtivos, como mostra o Figura 1, a seguir.

Figura 1 – Uso das quatro principais classes de materiais ao longo dos anos.



Devido à sua crescente aplicação, principalmente na indústria automotiva e aeroespacial, algumas das principais universidades brasileiras já possuem, em sua grade curricular de graduação, disciplina obrigatória específica sobre materiais compósitos, principalmente nos cursos de engenharia de materiais, mecânica e aeronáutica.

Diferentemente dos materiais tradicionais, as propriedades de materiais compósitos não são facilmente encontradas em tabelas, pois dependem de muitos fatores como orientação, geometria, tipo e teor do reforço. Diante disso, há um esforço em adaptar teorias da mecânica clássica para materiais compósitos, com o intuito de prever suas propriedades finais, reduzindo a necessidade de realizar estudos empíricos (MURARI e UPADHYAY, 2012).

A mecânica de materiais compósitos, basicamente, é dividida em duas grandes áreas, a micromecânica e a macromecânica. O foco desse trabalho é a micromecânica, que estima as propriedades de um compósito baseado nas propriedades dos seus constituintes (reforço/matriz) e no teor das fases (HERAKOVICH, 2012). Os primeiros modelos propostos datam dos anos 1950 (MIRAOUI e HASSIS, 2012), e, atualmente, compreendem desde abordagens bastante simplificadas até modelos complexos e precisos.

Não há consenso sobre o uso de um modelo específico, sendo muitas vezes utilizadas diferentes abordagens, levando a uma rotina de cálculos exaustiva. Assim, o uso de *software* de apoio ao entendimento da mecânica de compósitos é uma solução cada vez mais utilizada, tanto no meio acadêmico quanto industrial, possibilitando uma solução analítica rápida e confiável, especialmente para uma estimativa inicial que possibilite a seleção de materiais.

Dentre os principais programas disponíveis para cálculo da micromecânica de materiais compósitos pode-se citar: Simulation Composite Design, The Laminator, SwiftComp Micromechanics, ESAComp e Composite Star. No entanto, nenhum deles está em português, o que dificulta a compreensão especialmente dos alunos de graduação; alguns são caros, mesmo para licença acadêmica, e não possuem interface gráfica. Além disso, nenhum deles apresenta modelos para compósitos reforçados com fibras curtas ou partículas.

O estudo de materiais compósitos particulados é relativamente recente (DANIEL e ISHAI, 1994) e o avanço na pesquisa dessa área nos últimos anos se deve ao fato de que, quando cargas minerais (ou inorgânicas) são incorporadas em outros materiais, estes tornam-se economicamente viáveis e adquirem um conjunto de propriedades mais interessante para uma determinada aplicação. No caso

da incorporação em polímeros, por exemplo, reduzem a quantidade de polímero utilizada, reduzem o custo e promovem um aumento de propriedades mecânicas (por exemplo, rigidez) em relação ao polímero puro. Quando estudos teóricos não são utilizados, ocorre um dispêndio de tempo e recurso para se produzir e avaliar experimentalmente muitas combinações de materiais.

Neste trabalho, foi utilizado o *software web* desenvolvido pelo GCOMP/LAPOL/UFRGS, denominado MECH-Gcomp, para o estudo de mecânica de compósitos particulados. Este é o primeiro *software* em português nessa área e visa a oferecer uma forma simples e didática para auxiliar no ensino de materiais compósitos, por isso, cada módulo do programa é feito de forma a tornar sua interface amigável e seu uso intuitivo. Esse programa já vem sendo usado nas disciplinas de materiais compósitos e mecânica dos materiais compósitos na UFRGS, de modo a torná-las mais atrativas e dinâmicas.

Neste artigo em específico, será detalhado o módulo dedicado à micromecânica de

compósitos reforçados por partículas, realizando uma análise comparativa dos resultados obtidos com os modelos disponíveis no *software* para um compósito poliéster/ $\text{CaCO}_3$  com resultados experimentais.

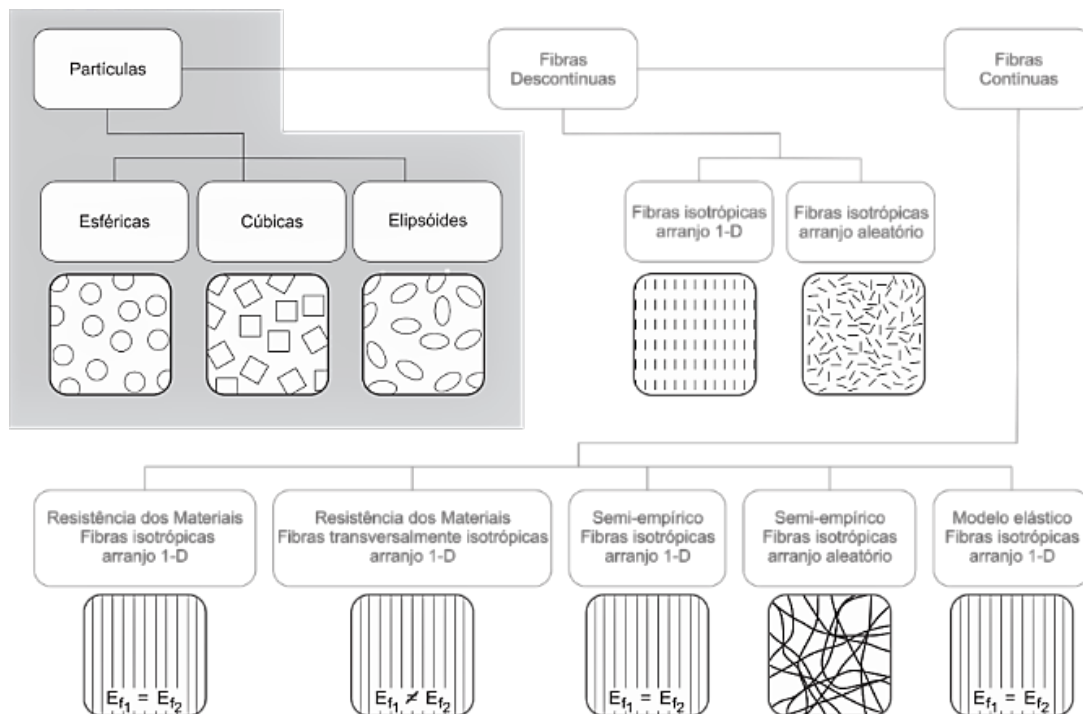
## EXPERIMENTAL

Os materiais utilizados para se obter o compósito particulado foram: carbonato de cálcio natural ITAP C325, resina poliéster ortoftálica UCEFLEX 5530M e peróxido de metil-etil-cetona. A resina foi misturada manualmente ao  $\text{CaCO}_3$  (10%, 20% e 30% em massa) e vazada (*casting*) em molde de silicone. Após 12 horas, as amostras foram extraídas do molde e pós-curadas em estufa a 80 °C por 4 h. Posteriormente, foram caracterizadas por (i) ensaio de tração (ASTM D638) em uma máquina de ensaio universal Instron 3382 com o uso de extensômetros, e (ii) por ensaio *não-destrutivo* (ASTM E1876) utilizado o equipamento *sonelastic da ATCP*.

## ANALÍTICO

Realizou-se inicialmente uma vasta pesquisa bibliográfica para identificar os principais

Figura 2 - Classificação dos principais modelos/abordagens de micromecânica baseada nas características do reforço.



modelos de micromecânica, como em Villoria e Miravete (2007), e Kaw (2006), separando-os em categorias com base no tipo do reforço. A Figura 2 mostra de forma esquemática essa classificação, com ícones para ilustrar o tipo de reforço abordado, e, em destaque, os compósitos particulados, abordados neste trabalho.

O MECH-Gcomp web foi desenvolvido utilizando a linguagem Python v. 2.7 e as bibliotecas Matplotlib, wxPython e Numpy. No primeiro menu, mostrado na Figura 3, o usuário deve definir o tipo de reforço do compósito de

interesse (partícula ou fibra), em seguida, selecionando o submenu “Materiais”, o usuário poderá inserir um novo material ou selecionar um já existente no banco de dados do *software*, conforme ilustrado na Figura 4.

Já os resultados são gerados numa terceira tela, mostrada na Figura 5, na qual é necessário informar a fração mássica ou volumétrica do material que irá reforçar a matriz do compósito. Após estimadas as propriedades do compósito, é possível gerar gráficos dessas propriedades em função da fração volumétrica do reforço, como mostra a Figura 6.

Figura 3 – Tela inicial do programa, onde se define se o material será reforçado por nanocargas, partículas ou fibras.

The screenshot shows the initial interface of the MECH-GCOMP web application. At the top, there are logos for MECH-GCOMP and UFRGS Apolo, along with 'Entrar' and 'Cadastre-se' buttons. Below is a horizontal navigation menu with items: 'Início', 'Nano', 'Micro - Partículas', 'Micro - Fibras', 'Macro - Lâminas', 'Macro - Laminados', and 'Sobre'. The main content area is divided into three columns:

- MECH-Gcomp:** A text block describing the software as developed by the Group of Composite and Nanocomposites (GCOMP) at LAPOL/UFRGS, with a 'Detalhes' button.
- Grupo de pesquisa:** A logo for the 'GRUPO DE MATERIAIS COMPÓSITOS E NANOCOMPÓSITOS'.
- Publicações relacionadas:** A list of publications including 'Pedido de Registro INPI - 2014', '21º CBECIMat - 2014', 'BCCM2 - 2014', and 'XLI COBENGE - 2013', with a 'Detalhes' button.

At the bottom, there is contact information: 'Email para contato: mech-gcomp@ufrgs.br' and '© GCOMP / LAPOL / UFRGS 2015'. A large INPI logo and a registration certificate image are also visible.

Figura 4 – Página na qual as propriedades da matriz e partícula são obtidas/definidas (acesso pelo submenu Materiais).

**MECH-GCOMP** Eduardo Antonio Wink de Menezes Sair

Início Nano **Micro - Partículas** Micro - Fibras Macro - Lâminas Macro - Laminados Sobre

Micro - Partículas / Materiais **Materiais** Partículas

**Partícula**

Carbonato de cálcio

Nome	Carbonato de cálcio
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	2.71e+3
E [Pa]	6.99e+10
G [Pa]	3.5e+10
$\nu$	0.250
$\sigma^T$ [Pa]	
$\sigma^C$ [Pa]	
$\alpha$ [m/m/°C]	1.75e-4
$\beta$ [m/m/%m]	0
K [W/m/K]	2.7e+0
c [J/kg/K]	1.8e+2

Salvar Deletar

Limpar dados

**Matriz**

Poliéster GCOMP

Nome	Poliéster GCOMP
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	1.16e+3
E [Pa]	4.04e+9
G [Pa]	1.44e+9
$\nu$	0.360
$\sigma^T$ [Pa]	7.17055e+7
$\sigma^C$ [Pa]	3.52184e+8
$\tau$ [Pa]	1.47548e+8
$\alpha$ [m/m/°C]	2.7e-4
$\beta$ [m/m/%m]	7.7e-6
K [W/m/K]	1.19e+0
c [J/kg/K]	1.2e+3

Salvar Deletar

Limpar dados

Figura 5 – Página para seleção da fração mássica/volumétrica e da geometria da partícula.

**MECH-GCOMP** Eduardo Antonio Wink de Menezes Sair

Início Nano **Micro - Partículas** Micro - Fibras Macro - Lâminas Macro - Laminados Sobre

Micro - Partículas / Partículas

**Partícula**

Carbonato de cálcio

Fração volumétrica [%] 4.54

Fração mássica [%] 10.00

**Matriz**

Poliéster GCOMP

Fração volumétrica [%] 95.46

Fração mássica [%] 90.00

**Resultados**

	Valor	Comentário
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	1.230e+03	Lei das misturas
$\bar{E}_{sup}$ [Pa]	7.020e+09	Limite superior, segundo Broutman e Krock
$\bar{E}_{inf}$ [Pa]	4.221e+09	Limite inferior, segundo Broutman e Krock
$\bar{E}$ [Pa]	4.302e+09	Segundo Mital
$\bar{E}$ [Pa]	4.616e+09	Segundo Guth
$\bar{E}$ [Pa]	4.408e+09	Segundo Kerner
$\bar{E}$ [Pa]	4.287e+09	Segundo Christensen
G [Pa]	1.536e+09	Segundo Mital
G [Pa]	1.625e+09	Segundo Mooney, para $V_f < 60\%$
G [Pa]	1.645e+09	Segundo Guth
G [Pa]	1.589e+09	Segundo Kerner, para G maior na partícula em relação à matriz
G [Pa]	1.603e+09	Segundo Einstein
G [Pa]	1.577e+09	Segundo Christensen
$\nu$	0.400	Segundo Mital
$\sigma^T$ [Pa]	6.066e+07	Segundo Nicolais e Narkis
$\alpha$ [m/m/°C]	2.639e-04	Segundo Mital
K [W/m/K]	1.228e+00	Segundo Mital
c [J/kg/K]	1.098e+03	Segundo Mital

Exportar tabela Guardar lâmina

**Abordagens**

Partículas esféricas

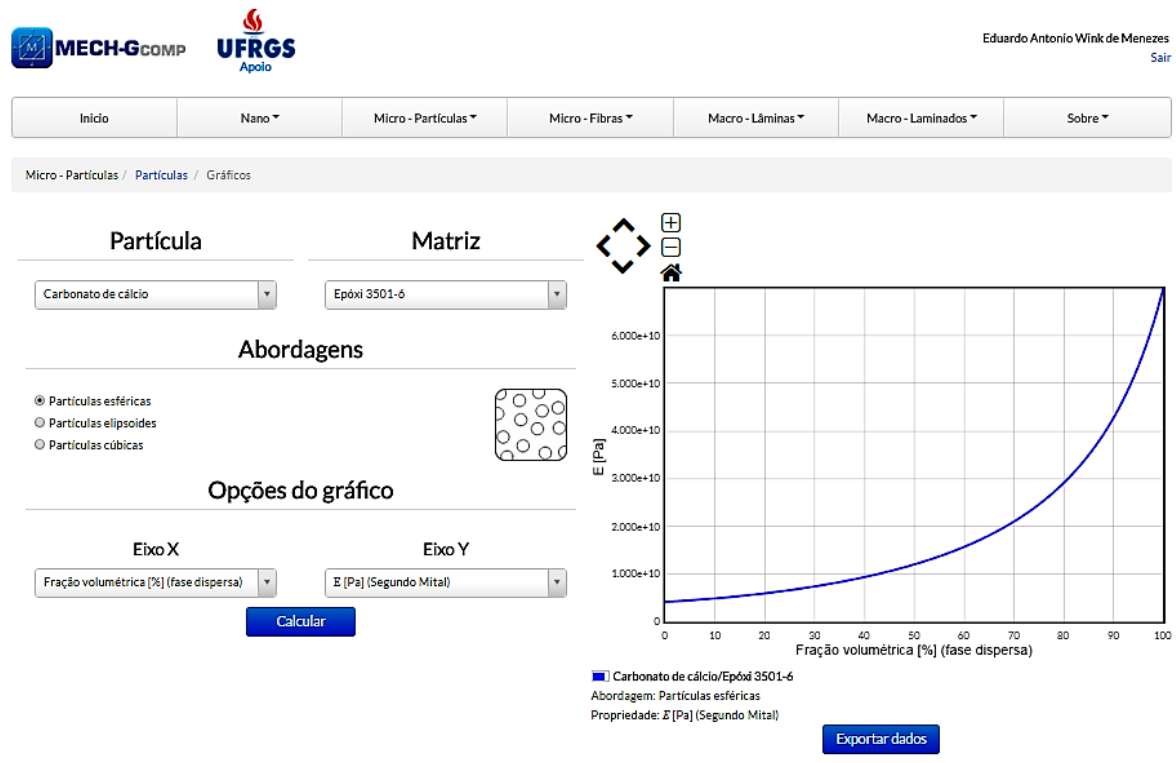
Partículas elipsoides

Partículas cúbicas

Calcular

Gerar gráficos

Figura 6 – Gráfico apresentando a variação do módulo de elasticidade do compósito estudado em função do volume de partículas.



Para os modelos de “Partículas” do MECH-Gcomp, utilizou-se como nomenclatura a geometria/tipo de reforço (esféricas, cúbicas ou elipsóides). Nessa seção, os modelos utilizados apresentam abordagem semiempírica e abrangem propriedades mecânicas e térmicas. Esses modelos foram obtidos dos trabalhos de Dorigato *et al.* (2013), Mital *et al.* (1997), Ahmed e Jones (1990) e Chow (1990).

As equações utilizadas no Mech-Gcomp para obtenção das propriedades mecânicas do compósito particulado estão descritas a seguir, sendo identificadas pela geometria/tipo de reforço e abordagem.

As Equações (1) e (2) referem-se aos limites superior e inferior do módulo de elasticidade e podem ser aplicadas às três geometrias de partícula citadas. As Equações (3-13) são utilizadas especificamente para se obter as propriedades elásticas ( $E$ : módulo de elasticidade;  $G$ : módulo de cisalhamento;  $\nu$  coeficiente de Poisson) quando se utiliza partículas esféricas.

▪ **Broutman e Krock:**

$$E_{c(u)} = E_p V_p + E_m V_m \quad (1)$$

$$E_{c(l)} = \frac{E_p E_m}{E_p V_m + E_m V_p} \quad (2)$$

▪ **Mital:**

$$E_{cp} = \frac{V_p^{0,67} E_m}{1 - V_p^{0,33} \left(1 - \frac{E_m}{E_p}\right)} + (1 - V_p^{0,67}) E_m \quad (3)$$

$$G_{cp} = \frac{V_f^{0,67} G_m}{1 - V_f^{0,33} \left(1 - \frac{G_m}{G_p}\right)} + (1 - V_f^{0,67}) G_m \quad (4)$$

$$\nu_{cp} = \frac{E_{pc} - 2G_{pc}}{2G_{pc}} \quad (5)$$

▪ **Einstein:**

$$G_{cp} = G_m (1 + 2,5V_p) \quad (6)$$

- **Mooney:**

$$G_{cp} = G_m \exp\left(\frac{2,5V_p}{1 - 1,35V_p}\right) \quad (7)$$

- **Guth:**

$$E_{cp} = E_m(1 + 2,5V_p + 14,1V_p^2) \quad (8)$$

$$G_{cp} = G_m(1 + 2,5V_p + 14,1V_p^2) \quad (9)$$

- **Kerner:**

$$E_{cp} = E_m \frac{1 + \left(\frac{7-5\nu_m}{8-10\nu_m}\right) \left(\frac{\frac{E_p}{E_m} - 1}{\frac{E_p}{E_m} + \left(\frac{7-5\nu_m}{8-10\nu_m}\right)}\right) (V_p)}{1 - \left(\frac{\frac{E_p}{E_m} - 1}{\frac{E_p}{E_m} + \left(\frac{7-5\nu_m}{8-10\nu_m}\right)}\right) (V_p)} \quad (10)$$

$$G_{cp} = G_m \left(1 + \frac{V_p}{V_m} \frac{15(1 - \nu_m)}{(8 - 10\nu_m)}\right) \quad (11)$$

- **Christensen:**

$$E_{cp} = \frac{9K_{cp}G_{cp}}{3K_{cp} + G_{cp}} \quad (12)$$

onde  $V$  é a fração volumétrica de partículas ou matriz no compósito. Os sobrescritos  $cp$ ,  $p$ ,  $m$ ,  $u$  e  $l$  referem-se, respectivamente, ao compósito, à partícula, à matriz, ao limite superior e ao inferior, em todas as equações.

Para resolver a Equação (12), é necessário conhecer os termos  $K$  (módulo volumétrico) e  $G_{cp}$  (Equação (13)), que podem ser obtidos pelas Equações (14)-(21).

$$G_{cp} = G_m \left(\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - AC}}{A}\right) \quad (13)$$

$$G_p = \frac{E_p}{2 + 2\nu_p} \text{ e } G_m = \frac{E_m}{2 + 2\nu_m} \quad (14)$$

$$K_p = \frac{E_p}{3 - 6\nu_p} \text{ e } K_m = \frac{E_m}{3 - 6\nu_m} \quad (15)$$

$$K_{cp} = K_m + \frac{V_p(K_p - K_m)}{1 + \left[\frac{(1 - V_p)(K_p - K_m)}{K_m + \frac{4}{3}G_m}\right]} \quad (16)$$

$$A = 8 \left(\frac{G_p}{G_m} - 1\right) (4 - 5\nu_m) \eta_1 (V_p)^{\frac{10}{3}} - 2 \left[63 \left(\frac{G_p}{G_m} - 1\right) \eta_2 + 2\eta_1 \eta_3\right] (V_p)^{\frac{7}{3}} + 252 \left(\frac{G_p}{G_m} - 1\right) \eta_2 (V_p)^{\frac{5}{3}} - 50 \left(\frac{G_p}{G_m} - 1\right) (7 - 12\nu_m + 8\nu_m^2) \eta_2 (V_p) + 4(7 - 10\nu_m) \eta_2 \eta_3 \quad (17)$$

$$B = -2 \left(\frac{G_p}{G_m} - 1\right) (1 - 5\nu_m) \eta_1 (V_p)^{\frac{10}{3}} + 2 \left[63 \left(\frac{G_p}{G_m} - 1\right) \eta_2 + 2\eta_1 \eta_3\right] (V_p)^{\frac{7}{3}} - 252 \left(\frac{G_p}{G_m} - 1\right) \eta_2 (V_p)^{\frac{5}{3}} + 75 \left(\frac{G_p}{G_m} - 1\right) (3 - \nu_m) \eta_2 \nu_m (V_p) + \frac{3}{2} (15\nu_m - 7) \eta_2 \eta_3 \quad (18)$$

$$252 \left(\frac{G_p}{G_m} - 1\right) \eta_2 (V_p)^{\frac{5}{3}} + 75 \left(\frac{G_p}{G_m} - 1\right) (3 - \nu_m) \eta_2 \nu_m (V_p) + \frac{3}{2} (15\nu_m - 7) \eta_2 \eta_3$$

$$C = 4 \left(\frac{G_p}{G_m} - 1\right) (5\nu_m - 7) \eta_1 (V_p)^{\frac{10}{3}} - 2 \left[63 \left(\frac{G_p}{G_m} - 1\right) \eta_2 + 2\eta_1 \eta_3\right] (V_p)^{\frac{7}{3}} + 252 \left(\frac{G_p}{G_m} - 1\right) \eta_2 (V_p)^{\frac{5}{3}} + 25 \left(\frac{G_p}{G_m} - 1\right) (\nu_m^2 - 7) \eta_2 (V_p) - (7 + 5\nu_m) \eta_2 \eta_3 \quad (19)$$

$$\eta_1 = (49 - 50\nu_p \nu_m) \left(\frac{G_p}{G_m} - 1\right) + 35 \frac{G_p}{G_m} (\nu_p - 2\nu_m) + 35(2\nu_p - \nu_m) \quad (20)$$

$$\eta_2 = 5\nu_p \left(\frac{G_p}{G_m} - 8\right) + 7 \left(\frac{G_p}{G_m} + 4\right) \text{ e } \eta_3 = \frac{G_p}{G_m} (8 - 10\nu_m) + (7 - 5\nu_m) \quad (21)$$

Para partículas elipsoides, o *software* utiliza os modelos de Hashin & Strickman, Guth, Brodnyan e Chow, disponíveis em Ahmed e Jones (1990). Nesse caso, para determinar os módulos, é necessário ter informações referentes à partícula, como a tendência à formação de flocos da carga ( $S$ ), e comprimento ( $l$ ), diâmetro ( $d$ ) e razão de aspecto ( $p = l/d$ ). Para partículas cúbicas, o *software* conta com os modelos de Ishai & Cohen e Paul, também disponíveis em Ahmed e Jones, 1990.

Já que as partículas de carbonato de cálcio são usualmente idealizadas como esferas, conforme feito por Parakhonskiy *et al.* (2014), focou-se nesse tipo de abordagem para prever as propriedades mecânicas dos compósitos.

Além das constantes elásticas citadas acima, o *software* também é capaz de prever coeficiente de expansão térmica, condutividade e capacidade térmica, através de modelos micromecânicos elaborados por Mital (1997).

Para *input* do *software*, utilizou-se propriedades do  $\text{CaCO}_3$  extraídas de Surfacenet (2014), como apresentado na Tabela 1. As propriedades da resina poliéster foram obtidas experimentalmente pela medida de densidade e através do ensaio não destrutivo com o *Sonelastic*.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais constituintes.

	$E$ (GPa)	$G$ (GPa)	$\nu$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Poliéster</b>	4,04	1,44	0,36	$1,16 \times 10^3$
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	69,9 <sup>(10)</sup>	35 <sup>(10)</sup>	0,25 <sup>(11)</sup>	$2,71 \times 10^3$ <sup>(10)</sup>

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para os compósitos estudados. A formulação que obteve o melhor desempenho geral foi a com 20%  $\text{CaCO}_3$ , o que pode ser justificado pela dificuldade na produção do compósito com 30%  $\text{CaCO}_3$ . Nesse caso, houve um aumento considerável na viscosidade da resina,

o que dificultou a dispersão da partícula e aumentou a propensão à precipitação.

A resistência à tração ( $\sigma_u$ ) e o coeficiente de Poisson diminuíram com o aumento do teor de  $\text{CaCO}_3$ . Masouras *et al.*, 2008, também observou um aumento no módulo elástico e um decréscimo no coeficiente de Poisson para maior teor de partículas. Não foi possível obter as propriedades em tração para resina poliéster devido à sua fragilidade, levando à ruptura durante o posicionamento na garra pneumática do equipamento.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos compósitos obtidas experimentalmente.

	<b>Poliéster</b>	<b>10% CaCO<sub>3</sub></b>	<b>20% CaCO<sub>3</sub></b>	<b>30% CaCO<sub>3</sub></b>
$E^a$ (GPa)		3,08±0,60	3,72±0,70	2,80±0,60
$\nu^a$		0,34±0,18	0,30±0,06	0,27±0,07
$\sigma_{u,a}$ (MPa)		30±6	29±6	22±6
$G^b$ (GPa)	-	1,14	1,43	1,10
$E_{\text{longitudinal}}^c$ (GPa)	4,04±0,18	4,59±0,15	5,19±0,18	5,95±0,24
$E_{\text{flexional}}^c$ (GPa)	3,91±0,36	4,53±0,17	5,12±0,27	5,86±0,40
$\nu^c$	0,36±0,11	0,36±0,05	0,32±0,06	0,32±0,09
$G^c$ (GPa)	1,44±0,03	1,67±0,01	1,95±0,03	2,22±0,18

<sup>a</sup>obtido em ensaio em tração;

<sup>b</sup>obtido por  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ ;

<sup>c</sup>obtido com o *Sonelastic*:  $E_{\text{longitudinal}}$  é o módulo de elasticidade obtido pelo modo de vibração longitudinal, e  $E_{\text{flexional}}$  é o módulo de elasticidade obtido pelo modo de vibração flexional.

O módulo elástico obtido pelo método de ultrassom dinâmico *Sonelastic* foi ligeiramente superior ao obtido em ensaio destrutivo de tração, o que foi atribuído à diferença na taxa de deformação (MASOURAS; SILIKAS; WATTS, 2008), pois a medida é realizada em altas frequências (no caso do *Sonelastic*) e não há tempo hábil para o material viscoelástico relaxar.

O fato de o módulo de elasticidade em tração longitudinal fornecer o mesmo valor do



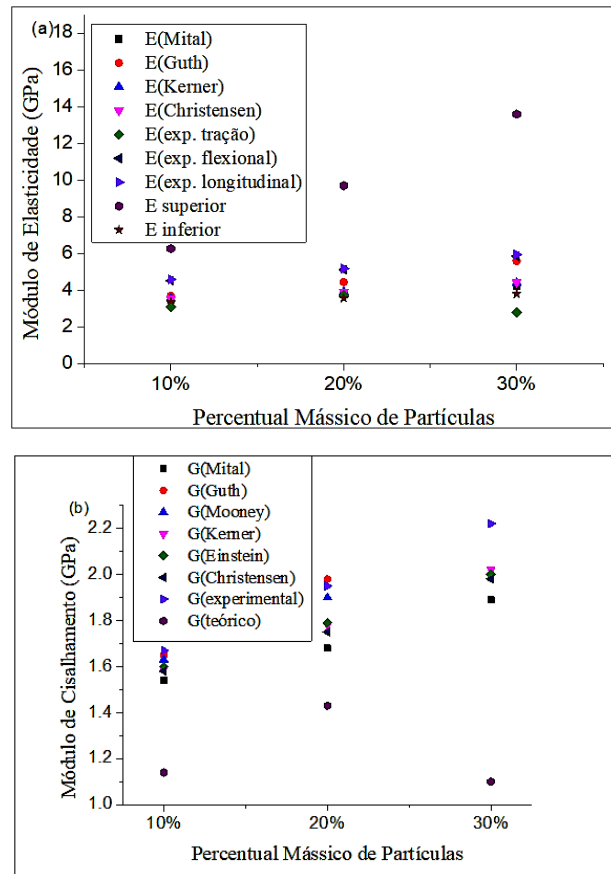
módulo elástico em flexão está coerente com o comportamento de materiais isotrópicos.<sup>6</sup> Para a obtenção de um resultado satisfatório de módulo elástico, a partir do modo vibração longitudinal de barras, é necessária uma seção de geometria prismática regular. Porém, como a resina poliéster apresenta um percentual de contração alto, havendo também decantação de parte do carbonato, foi gerado um gradiente de concentração de  $\text{CaCO}_3$ , e, com isso, algum grau de empenamento das amostras.

A Figura 7 compara os resultados experimentais com os diversos modelos matemáticos implementados no *software* para a predição dos valores das constantes  $E$  e  $G$ , considerando partículas esféricas. No caso do módulo de elasticidade, observa-se que os limites máximo e mínimo propostos por Broutman e Krock foram respeitados, sendo os modelos de Guth e Kerner os mais próximos dos valores experimentais. Já para o módulo de cisalhamento, os modelos de Guth e Mooney mais se destacaram, com menor desvio em relação aos experimentos.

É possível observar que as predições analíticas perdem a precisão com o aumento da fração mássica de partículas, o que se deve a dificuldades na fabricação de compósitos com altos teores de partículas e, principalmente, em razão de as propriedades do carbonato de cálcio, que são dados de entrada do *software*, terem sido obtidas da literatura, e não medidas experimentalmente.

Com relação ao coeficiente de Poisson, os valores obtidos com o Sonelastic foram  $0,34 \pm 0,18$ ,  $0,30 \pm 0,06$  e  $0,27 \pm 0,07$ , para os compósitos com 10%, 20% e 30% de  $\text{CaCO}_3$ , respectivamente, enquanto os valores obtidos com o modelo de Mital (1997) foram 0,40, 0,40 e 0,39. Embora exista uma diferença considerável nos valores do coeficiente de Poisson, ambas as abordagens apresentam a mesma tendência a uma diminuição em seu valor, à medida que se adiciona carbonato de cálcio no material compósito.

Figura 7 – Módulo de elasticidade (a) e de cisalhamento (b) obtido por diferentes modelos teóricos e em experimento.



## CONCLUSÕES

Através da comparação com ensaios experimentais, viu-se que o *software* MECH-G-comp foi capaz de reproduzir, com confiabilidade aceitável, as constantes de engenharia analisadas, módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson dos materiais compósitos com reforço particulado.

A obtenção dos resultados de forma pré-programada é muito rápida e simples, tornando esse programa uma ótima ferramenta a ser utilizada pela indústria e no meio acadêmico, para auxiliar na divulgação/desenvolvimento dessa classe de materiais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFRGS pelas bolsas; ao CNPq, à CAPES e à FAPERGS pelo apoio; à Elekeiroz pela resina e à ATCP pelas análises.

6 Cf.: INFORMATIVO Técnico-Científico ITC-ME/ATCP. Disponível em: <<http://www.atcp.com.br/pt/>> acesso em 26/ setembro/2014>. Acesso em 12 jun. 17.

## REFERÊNCIAS

- AHMED, S.; JONES, F. R. A review of particulate reinforcement theories for polymer composites. **Journal of Materials Science**, v. 25, p. 4.933-4.942, 1990.
- BERG, S.; HÄGGBLAD, H-Å.; JONSÉN, P. High-pressure compaction modelling of calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) powder compact. **Powder Technology**, v. 206, p. 259-268, 2011.
- CHOW, T. S. The effect of particle shape on the mechanical properties of filled polymers, **Journal of Material Sciences**, v. 15, p. 1873-1888, 1980.
- DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. Oxford University Press: New York, 1994.
- DORIGATO, A.; DZENIS, Y.; PEGORETTI, A. Filler aggregation as a reinforcement mechanism in polymer nanocomposites. **Mechanics of Materials**, v. 61, p. 79-90, 2013.
- Heliuss: CompositePro™ Version 4.1.
- HERAKOVICH, C. T. J. Mechanics of composites: a historical review. **Mechanics Research Communication**, v. 41, p. 1-20, 2012.
- INFORMATIVO Técnico-Científico ITC-ME/ATCP. Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização, ATCP Engenharia Física. Disponível em: <<http://www.atcp.com.br/pt/>> acesso em 26/ setembro/2014>.
- KAW, A. K. **Mechanics of composite materials**. 2<sup>nd</sup> edition. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006.
- MASOURAS, K.; SILIKAS, N.; WATTS, D. C. Correlation of filler content and elastic properties of resin-composites. **Dental Materials**, v. 24, p. 932-939, 2008.
- MIRAOU, I.; HASSIS, H. Mechanical Model for Vegetal Fibers-Reinforced Composite Materials. **Physics Procedia**, v. 25, p. 130-136, 2012.
- MITAL, S. K.; MURTHY, P. L. N.; GOLDBERG, R. K. Micromechanics for Particulate Reinforced Composites. **Mechanics of Composite Materials and Structures**, v. 4, p. 251-266, 1997.
- MURARI, V.; UPADHYAY, C. S. Micromechanics based diffuse damage model for unidirectional composites. **Composite Structure**, v. 94, p. 419-432, 2012.
- VILLORIA, R. G.; MIRAVETE, A. Mechanical model to evaluate the effect of the dispersion in nanocomposites. **Acta Materialia**, v. 55, p. 3.025-3.031, 2007.
- SURFACENET. <<http://www.surfacenet.de/html/caco3.html>>. Acesso em 12 jun. 2014.
- PARAKHONSKIY, B. V. *et al.* Size controlled hydroxyapatite and calcium carbonate particles: Synthesis and their application as templates for SERS platform, **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 118, p. 243-248, 2014.

---

## DADOS DOS AUTORES



**Clarissa Coussirat Angrizani** – Graduação em Tecnologia em Polímeros, com ênfase em Gestão da Qualidade, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Rio-Grandense, 2008. Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. Atuação profissional na área de Materiais Compósitos Poliméricos.



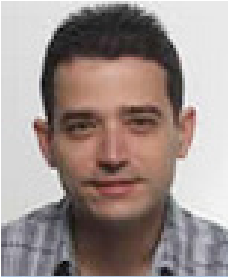
**Eduardo Antonio Wink de Menezes** – Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. Mestrado no Programa de Pós-graduação em Minas, Metalurgia e Materiais da UFRGS, 2015. Pesquisa na área de simulações numéricas em materiais compósitos.



**Felipe Ferreira Luz** – Graduação em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais pela UFRGS em conjunto com a Universidade Federal de Campina Grande, 2011. Pesquisa nos seguintes temas: simulação numérica, RTM, mecânica de compósitos poliméricos, ecodesign e projeto de produto.



**Alisson Aguiar Muller** – Graduando em Ciência da Computação pela UFRGS. Atuação profissional na área de programação e desenvolvimento de software, desenvolvimento web, suporte técnico em informática.



**Sandro Campos Amico** – Graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 1994. Mestrado em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas, 1996. Doutorado pela School of Mechanical and Materials Engineering - University of Surrey/Inglaterra, 2000. Atualmente, é Professor Associado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no Departamento de Engenharia de Materiais. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Materiais Compósitos, atuando principalmente nos seguintes temas: estrutura, processamento e propriedades de compósitos poliméricos. É Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq - Nível I-D (Eng II).