

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE APLICADO AO ENSINO/PESQUISA DE MICROMECAÂNICA DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Clarissa Coussirat Angrizani*, Felipe Ferreira Luz, Matheus dos Santos Gonzaga, Sandro Campos Amico

*Grupo de Materiais Compósitos e Nanocompósitos – Laboratório de Materiais Poliméricos - UFRGS – RS
(cangrizani@hotmail.com)*

O estudo da micromecânica de materiais compósitos consiste na observação da interação dos materiais a nível microscópico (estudo reforço/matriz) de modo a entender e prever seu comportamento. A importância do estudo teórico pode ser justificada pela indisponibilidade de tempo e recurso para se construir fisicamente e avaliar todas as possibilidades de combinações de compósitos. Neste trabalho, apresenta-se um aplicativo (*software*) desenvolvido para possibilitar a pesquisa e o enriquecimento do ensino de materiais compósitos. O *software*, denominado de *Mech-Gcomp*, inclui diferentes tipos de reforços (contínuo, descontínuo e particulado) e diversos modelos analíticos disponíveis na literatura, que levam em consideração as propriedades mecânicas específicas de cada tipo de reforço, incluindo características de forma e orientação, possibilitando também o estudo de propriedades higroscópicas e térmicas desses materiais. Neste trabalho, o aplicativo foi comparado a outros existentes no mercado e pode-se concluir que este *software* pode ser competitivo tanto no segmento acadêmico quanto comercial aos demais disponíveis.

Palavras-chave: *Compósitos Poliméricos, Micromecânica, Software Acadêmico, Modelos Analíticos.*

Introdução

O desenvolvimento de compósitos poliméricos continua crescendo acentuadamente no Brasil e no mundo. Para se projetar estas peças é necessário conhecer o comportamento mecânico dos materiais envolvidos e os limites de diversas propriedades a fim de se determinar o melhor meio de empregá-los. A caracterização mecânica de materiais compósitos através de ensaios experimentais é cara e de difícil realização, pois requer moldagens às vezes complexas, seguindo normas específicas. Assim, utiliza-se teorias da mecânica clássica adaptadas ao estudo dos materiais compósitos a fim de se prever as propriedades finais destes materiais diminuindo a necessidade de realização de estudos empíricos [1].

A micromecânica calcula as propriedades de um compósito baseado nas propriedades dos seus constituintes (reforço/matriz) e foi abordada por modelos criados desde o início dos anos 1950 [2], que vão desde abordagens bastante simplificadas, como a Lei das Misturas, até modelos mais complexos e atuais. Entretanto, não há consenso sobre o uso de um modelo específico e muitas vezes utilizam-se diferentes abordagens levando a uma rotina de cálculos exaustiva para comparação de resultados. Assim, o uso de softwares de apoio no 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.

Diversos softwares comerciais estão disponíveis no mercado para o estudo específico da mecânica de compósitos, sendo que muitos abordam a micromecânica, a macromecânica de lâminas e de laminados. Entre estes, pode-se citar: o CompositePRO da empresa americana Firehole Composites (recentemente comprada pelo grupo Autodesk), o ESAComp da empresa finlandesa Compoengineering, o Composite da empresa inglesa LUSAS, o Composite Star da empresa australiana Etamax Engineering, o PROMAL (Program for Micromechanical and Macromechanical Analysis of Laminates) desenvolvido pela University of South Florida (EUA) e o The Laminator desenvolvido independentemente. Não há atualmente nenhum software nacional disponível e alguns internacionais chegam a custar R\$ 9200,00 por licença acadêmica. Além disso, como não estão na língua portuguesa, dificultam o entendimento especialmente para alunos de graduação ou usuários não familiarizados com os termos técnicos envolvidos, mesmo porque há poucos livros disponíveis em português.

De fato, o ensino de mecânica dos compósitos ainda é raro no Brasil e há poucas instituições que abordam este tema em sua grade curricular, tanto a nível de graduação como em pós-graduação.

O objetivo deste trabalho é apresentar um software brasileiro para o estudo de mecânica de compósitos, chamado MECH-Gcomp, desenvolvido pelo GCOMP/LAPOL/UFRGS. Mais especificamente, será apresentado apenas o módulo dedicado à resolução de cálculos de micromecânica, com funções similares e ainda mais abrangentes que os softwares comerciais hoje disponíveis a nível mundial. Um estudo de caso foi escolhido para aferir os resultados gerados com diversos modelos e três softwares comerciais.

Metodologia

Realizou-se primeiramente uma vasta pesquisa bibliográfica a fim de identificar os modelos de micromecânica principais e mais utilizados atualmente. Alguns exemplos de referências utilizadas estão em [3,4]. Os modelos encontrados foram separados em diferentes categorias com base no tipo de reforço. A Fig. 1 mostra de forma esquemática esta classificação, onde cada modelo recebeu um ícone para ilustrar o tipo de reforço abordado, apresentando um caráter mais didático.

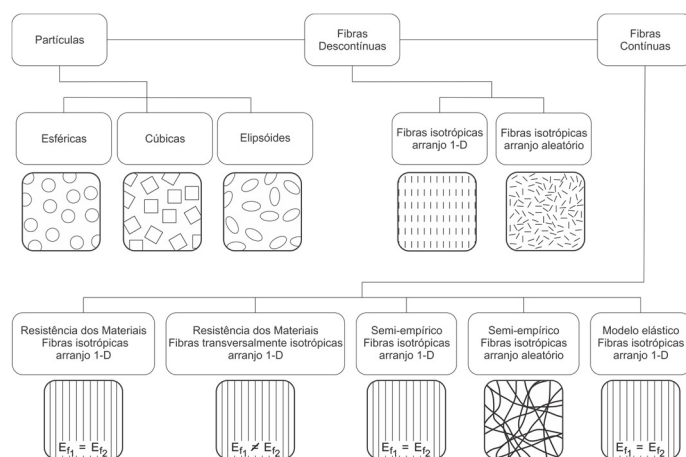


Figura 1 – Classificação dos principais modelos de micromecânica organizados pelo tipo de reforço.

A nomenclatura dos modelos de *Fibras Descontínuas* e *Fibras Contínuas* baseou-se nas propriedades das fibras em relação aos seus eixos (1 e 2) e ao seu arranjo na matriz (aleatório ou unidirecional). Para os modelos de *Partículas*, utilizou-se a geometria/tipo de reforço acompanhada do autor do modelo. É importante mencionar que a maioria dos *softwares* comerciais de micromecânica utiliza apenas um modelo, sendo normalmente baseado na Lei das Misturas, como o Promal, ou Halpin-Tsai, como o The Laminator. Porém o MECH-Gcomp inclui equações obtidas por várias abordagens distintas, como Chamis, Villoria, Hui, entre outros, sendo o mais completo neste quesito. Além disso, apresenta uma variante para fibras não isotrópicas e para fibras curtas em arranjo aleatório, que é muito utilizado no Brasil e não está disponível na grande maioria dos softwares comerciais.

O MECH-Gcomp foi desenvolvido utilizando a linguagem Python v2.7. e as bibliotecas Matplotlib, wxPython e Numpy (tela de inicialização na Fig. 2). Desenvolveu-se uma interface amigável, onde todo o conteúdo foi organizado em um sistema de abas. A primeira aba é a *Materiais* (Fig. 3a), onde o usuário insere as propriedades dos materiais constituintes (fase dispersa e fase contínua), podendo também carregar estas propriedades de um banco de dados integrado com diferentes fibras, incluindo fibras vegetais, e matrizes, com a possibilidade de inserção de novos constituintes de interesse específico do usuário. Na abas *Partículas* (Fig. 3b), *Fibras Descontínuas* (Fig. 3c) e *Fibras Contínuas* (Fig. 3d) estão os respectivos modelos, organizados como apresentado na Fig. 1. Para a realização dos cálculos, em geral, o usuário seleciona as fases do compósito e o teor volumétrico, clica no botão *Calcular* e os resultados são apresentados na coluna à direita. Com os resultados calculados, é possível salvá-los para posterior consulta ou exportá-los para um arquivo para ser lido por outros aplicativos, como o Excel. Para alguns modelos (os não-aleatórios), é possível calcular as propriedades (E_{θ} , G_{θ} e ν_{θ}) para diferentes ângulos preferências de disposição do reforço ou diferentes frações

volumétricas de reforço. Além disso, é possível gerar gráficos com os resultados, podendo comparar diferentes propriedades em uma mesma tela, como mostrado na Fig. 3e.



Figura 2 – Tela de inicialização do software MECH-GComp MICRO.

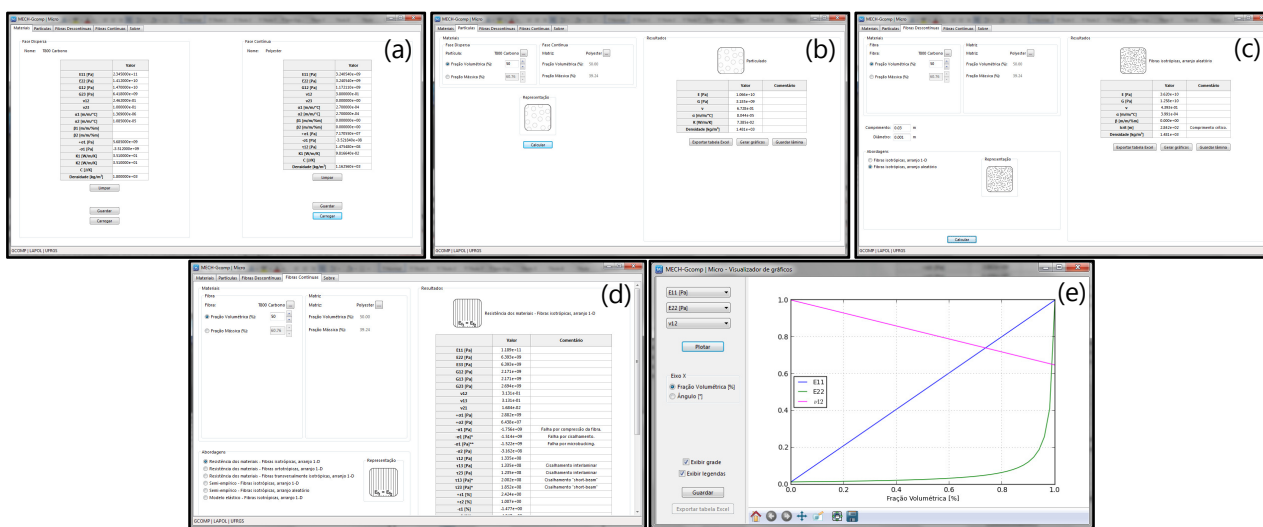


Figura 3 – Layout do software MECH-GComp com as abas (a) *Materiais*, (b) *Partículas*, (c) *Fibras descontínuas*, (d) *Fibras contínuas* e (e) módulo de geração de gráficos.

Resultados e Discussão

Para verificar os resultados gerados com o MECH-GComp, fez-se um estudo de caso (fibra de carbono T800, resina epóxi LY556, $\%V_f = 35\%$, arranjo 1-D) comparando os resultados obtidos com os softwares: (i) Promal, que utiliza a Lei das Misturas; (ii) The Laminator, que utiliza a Lei das Misturas, Halpin-Tsai e Chamis; (iii) Composite Star, que utiliza Lei das Misturas e Chamis; e (iv) CompositePRO, que utiliza uma Solução Exata, onde assume-se um empacotamento hexagonal uniforme e unidirecional e calcula-se utilizando elementos finitos. A Tabela 1 apresenta as propriedades dos materiais constituintes e a Tabela 2 apresenta os resultados obtidos nos diferentes softwares. Os modelos Semi-Empírico (fibras isotrópicas) e Modelo Elástico (fibras isotrópicas) apresentaram resultados diferentes para E_{22} pois o primeiro modelo considera o Bulk Modulus e o segundo considera nas equações de Halpin-Tsai [5] um fator de reforço que depende da geometria da fibra, que é desconsiderado para os demais.

Na Tabela 3 apresenta-se alguns fatores que podem ser decisivos na escolha de um *software* para estudo de micromecânica. Estas avaliações foram realizadas analisando os recursos disponíveis em cada um dos *softwares*, e o item mais subjetivo, *Interface amigável*, foi avaliado com base nas impressões de usuários. Observa-se que o MECH-Gcomp é o aplicativo mais completo, sendo o único (entre os analisados) a apresentar modelos para fibras curtas, arranjo aleatório e para fibras não-isotrópicas, além de ser o que apresenta o maior número de modelos disponíveis. Entre os demais aplicativos, o CompositePRO foi o que apresentou o melhor conjunto de recursos.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais constituintes.

	E_{11} (Pa)	E_{22} (Pa)	G_{12} (Pa)	G_{23} (Pa)	ν_{12}	ν_{13}	$+\sigma_1$ (Pa)	$-\sigma_1$ (Pa)	ρ (kg/m ³)
T800	$2,35 \times 10^{11}$	$1,41 \times 10^{10}$	$1,47 \times 10^{10}$	$6,42 \times 10^9$	0,246	0,1	$5,69 \times 10^9$	$-3,5 \times 10^9$	$1,80 \times 10^3$
LY556	$3,3 \times 10^9$	$3,3 \times 10^9$	$1,24 \times 10^9$	-	0,35	0,35	$8,00 \times 10^7$	$-1,20 \times 10^8$	$1,27 \times 10^3$

Tabela 2 – Comparação entre alguns *softwares* disponíveis no mercado.

Software Método	Promal	The Laminator	Composite Star	CompositePRO	Composite Star	MECH-Gcomp		
	Resistência dos Materiais	Resistência dos Materiais	Resistência dos Materiais	Solução Exata	Chamis	Resistência dos Materiais	Semi-Empírico	Modelo Elástico
E_{11} (GPa)	84,2	84,6	84,2	83,8	84,2	84,2	84,2	84,2
E_{22} (GPa)	5,1	5,6	4,6	5,6	4,6	5,1	5,6	6,6
E_{33} (GPa)	---	5,6	4,6	5,6	4,6	5,1	---	---
G_{12} (GPa)	1,8	2,3	1,8	2,3	2,7	1,8	2,3	2,3
G_{13} (GPa)	---	---	1,8	2,3	2,7	1,8	---	---
G_{23} (GPa)	---	---	2,4	1,9	2,4	2,1	---	2,2
ν_{12}	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
ν_{13}	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	---	---
ν_{23}	0,02	0,02	0,04	0,43	0,04	---	---	0,50

Tabela 3 - Comparação qualitativa entre *softwares* de micromecânica.

	Promal	The Laminator	CompositeStar	CompositePRO	MECH-Gcomp
Interface amigável (<i>subj.</i>)		✓		✓	✓
Banco de dados de fibras e matrizes				✓	✓
Salvar novas fibras e matrizes			✓	✓	✓
Total de modelos	1	1	3	1	7
Modelo para fibras curtas					2
Modelo para arranjo aleatório					2
Opção para fibras não-isotrópicas					✓
Calculo de resistência		✓	✓	✓	✓
Geração de gráficos de resposta	✓		✓		✓
Geração de tabelas de resposta	✓				✓

Conclusão

A concepção do *software* apresentado foi motivada por fatores como necessidade de disponibilizar ferramentas que tornem a pesquisa e o ensino de materiais compósitos mais atraentes, custo de *softwares* comerciais e sua abrangência. A obtenção com o MECH-Gcomp das propriedades elásticas e resistências (não apresentadas aqui) por modelos analíticos é compatível ou até melhor aos *softwares* utilizados comercialmente a nível mundial. Assim, o programa é eficiente em relação às necessidades, embora ainda possa ser expandido com a inclusão de novos modelos. O software foi escrito em português para facilitar o uso nacional, e apresenta variantes de modelos não contemplados na maioria dos *softwares* disponíveis (ex. fibras curtas, fibras aleatórias, fibras não-isotrópicas). Sua versão *Beta* já está sendo utilizada de modo experimental em aulas da graduação e pós-graduação da UFRGS e o pedido de propriedade intelectual já foi feito. O MECH-Gcomp Micromecânica é o primeiro módulo de uma série que o GCOMP/LAPOL/UFRGS pretende desenvolver, abordando a mecânica de materiais compósitos em diferentes níveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UFRGS e ao CNPq.

Referências

1. V. Murari; C.S. Upadhyay. *Comp. Struc.* 2012, 94, 671.
2. C. T. Herakovich. *J. Mech Res Commun.* 2012, 41, 1-20.
3. I. Miraoui; H. Hassis. *Physics Procedia* 2012, 25, 130.
4. R. G. Villoria; A. Miravete. *Acta. Mater.* 2007, 55, 3025.
5. A. K. Kaw. *Mechanics of Composite Materials*, 2006; 2° ed. USA: CRC Press.