

# ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DA INCLUSÃO NO COMPORTAMENTO ELÁSTICO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM COMPÓSITO DE INCLUSÃO ESFÉRICA POR MEIO DO SWIFTCOMP ACOPLADO A UM SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS

Raul Bernardo de Pontes Pires<sup>1</sup>, Marcelo Cavalcanti Rodrigues<sup>2</sup>, José Antônio França de Araujo<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Dept. de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba  
Endereço, 58051900, Paraíba/João Pessoa, Brasil  
raul.pires@estudantes.ufpb.br, celocr@ct.ufpb.br

<sup>3</sup>Dept. de Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas  
Endereço, 57020-600, Alagoas/Maceió, Brasil  
jose.antonio.araujo@ifal.edu.br

**Resumo.** Análises multiescala foram realizadas com o auxílio do ANSYS e do SwiftComp, este último trabalha com o conceito de Mecânica das Estruturas Genoma (MEG), proposta por Wenbin Yu e trata-se de uma abordagem unificada para determinação de modelos constitutivos para estruturas 3D, vigas, placas e cascas, em diversos níveis de escala. Esta técnica é baseada no conceito de genoma da estrutura (SG) e possibilita a união da análise micromecânica de uma determinada microestrutura à análise estrutural de uma estrutura macroscópica. Almeida e Lourenço (2019) publicaram o primeiro artigo sobre a técnica da Mecânica das Estruturas Genoma (MEG) em língua portuguesa onde os mesmos utilizaram a MEG para homogeneização elástica de alvenaria. Definimos um SG de um compósito com inclusão esférica de Carbetto de silício e matriz de alumínio. Houve variação da fração volumétrica da inclusão, em um intervalo de 0% a 20%, a fim de verificar o comportamento elástico das propriedades mecânicas. Frações volumétricas maiores tornaram o material mais rígido, ou seja, com o aumento da fração volumétrica ocorria também um aumento no Módulo de Young. O módulo de elasticidade transversal também apresentou comportamento crescente com a elevação dos níveis de fração volumétrica da inclusão. Com relação ao coeficiente de Poisson, o aumento dessa fração volumétrica gerava um decréscimo nesta propriedade. Os resultados obtidos com a simulação numérica foram comparados com outros adquiridos através da micromecânica dos campos médios, apresentando conformidade entre ambas as técnicas.

**Palavras chave:** Análise numérica, compósitos, micromecânica, Mecânica das Estruturas Genoma, SwiftComp.

## 1 Introdução

Existem diversas definições com relação a classe de materiais compósitos e uma das mais aceitas é a de que esses são definidos como um sistema de materiais formado de duas ou mais fases em uma escala macroscópica, sendo as propriedades e desempenho mecânico superiores aos dos constituintes quando atuando de forma independente. (DANIEL E ISHAI, 1994 Apud SILVA, 2011) [1]. Estes materiais apresentam duas fases que são: A matriz, ou fase contínua, que é responsável por atribuir forma a estrutura, transferir os esforços para a fase dispersa (reforço) e proteger o reforço contra umidade, radiação UV e corrosão química. Além disso comporta-se também como uma barreira à propagação de trincas. Esta fase apresenta menor rigidez (VASILIEV E MOROZOV, 2001 Apud LOPES, 2017) [2]. As matrizes podem ser poliméricas, cerâmicas e metálicas. A escolha do tipo de matriz estará condicionada inicialmente à aplicação que o compósito se destina (NETO; PARDINI, 2018) [3]. A

outra fase é a dispersa (reforço), que é descontínua e tem como papel conceder as propriedades mecânicas ao compósito. Ela pode imprimir rigidez bem como elevar a resistência ao calor, corrosão e condutividade. Para que seja justificável o uso do reforço no compósito, ele precisa ser mais forte e rígido que a matriz. Dessa maneira, a boa interação entre a matriz e o reforço pode ser garantida através da criação de uma interface entre ambos de modo que seja possível adequar a rigidez do reforço com a ductilidade da matriz. É interessante que a ductilidade da matriz seja mínima ou até mesmo nula, para que o compósito possua um comportamento relevante. (VENTURA, 2009) [4].

A classe dos materiais compósitos está classificada em 4 grupos principais que são: compósitos reforçados com partículas, reforçados com fibras, compósitos estruturais e nano compósitos (CALLISTER, 2016) [5].

Os compósitos reforçados com partículas estão subdivididos em compósitos com partículas grandes e compósitos reforçados por dispersão. A diferença entre ambas reside no mecanismo de reforço ou de aumento de resistência. Quando nos referimos ao termo grande, assinalamos que as interações partícula-matriz não devem ser analisadas a um nível atômico ou molecular, sendo necessário neste caso utilizar a mecânica do contínuo. As partículas possuem a tendência de limitar o movimento da matriz na sua vizinhança. Nos compósitos reforçados por dispersão, as partículas de reforço são menores, apresentando diâmetros entre 0,01 e 0,1  $\mu\text{m}$ . Para este caso as interações partícula-matriz acontecem a um nível microscópico. A elevação da resistência se dá por meio de um mecanismo que se assemelha ao endurecimento por precipitação (CALLISTER, 2016) [5].

Nota-se um crescente uso desta classe de material, onde as razões de aumento da aplicação deste tipo de material residem no fato dos mesmos serem dotados da capacidade de adaptabilidade para funções desejáveis de projeto, ou seja, são materiais que possuem o potencial de terem suas características mecânicas projetadas, como a alta rigidez específica, alta resistência específica, vida longa à fadiga e baixa densidade. Logo a principal característica de um compósito é a combinação de propriedades que dificilmente seriam obtidas com materiais convencionais (GUAMÁ, 2012) [6].

Por estes motivos e devido aos avanços tecnológicos no campo computacional, técnicas sofisticadas como a análise multiescala do comportamento mecânico dos compósitos vem ganhando espaço entre os pesquisadores (MORAES, 2014) [7].

Esta abordagem multiescala, refere-se à simulação do comportamento do material em diversos níveis de escala de tempo e tamanho, acarretando resultados mais consistentes, pois possui a capacidade de capturar características físicas em escalas menores, levando também a uma economia de tempo computacional quando comparados a modelos que tratam a análise de todas escalas unicamente. Geralmente estas análises multiescala são feitas através de métodos numéricos, sendo um dos mais conhecidos o método dos elementos finitos (MEF) (MORAES, 2014) [7].

O SwiftComp é um exemplo de software capaz de realizar simulações multiescala, utilizando a técnica Mecânica das Estruturas Genoma (MEG), proposta por Wenbin Yu, que se trata de uma abordagem unificada para determinação de modelos constitutivos para estruturas 3D, vigas, placas e cascas, em diversos níveis de escala. Esta técnica é baseada no conceito de genoma da estrutura (SG). Este conceito possibilita a união da análise micromecânica de uma determinada microestrutura à análise estrutural de uma estrutura macroscópica. Sendo assim o MEG oferece uma abordagem com certa rigorosidade para vincular modelos entre escalas, baseando-se nas técnicas de homogeneização e desomogeneização da micromecânica (YU, 2015) [8].

Por se tratar de uma técnica semi-analítica, o MEG, contribui para a redução do custo computacional, mantendo a precisão de análises 3D, como por exemplo, em elementos finitos (ALMEIDA; LOURENÇO, 2019) [9].

Baseado no conceito biológico de genoma, estrutura que carrega as informações hereditárias de um organismo, o SG (genoma da estrutura) pode ser definido como a menor parte matemática de uma estrutura e que apresentam todas as informações constitutivas necessárias de uma determinada estrutura (YU, 2016) [10].

Em uma estrutura 3D, o SG assemelhasse ao conceito de elemento de volume representativo (EVR) utilizado na micromecânica, porém são consideravelmente diferentes. A depender da heterogeneidade da estrutura 3d, o SG poderá ser 1D, 2D ou 3D. Para um material de heterogeneidade 1D o SG será uma linha reta com dois segmentos representando os referidos constituintes, esta porção contém todas as informações para a modelagem constitutiva. Isto é possível, pois podemos realizar uma repetição matemática desta linha no plano de forma a criar as duas camadas do compósito binário, em seguida repetimos este mesmo composto binário fora do plano, definindo desta maneira a estrutura. Para um material compósito de heterogeneidade 2D, a exemplo de compósito

reforçados com fibra, teremos um SG 2D e para os que apresentam heterogeneidade 3D, como os compósitos reforçados com partículas, utilizaremos um SG 3D. Independente da dimensão do SG as propriedades efetivas precisam estar em 3D. (YU, 2015) [8].

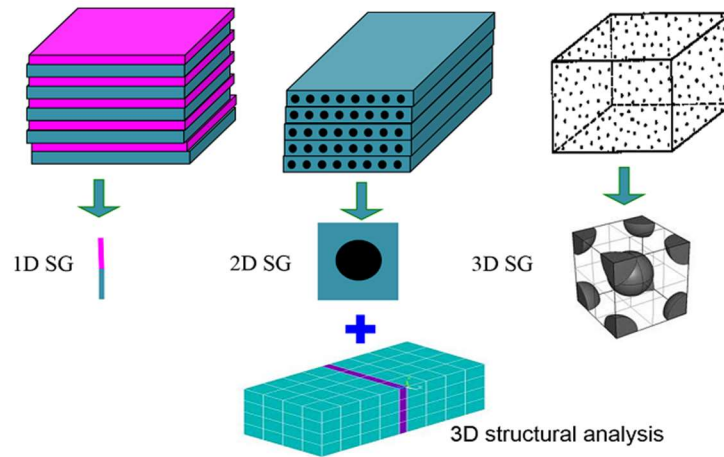


Figura 1: Genoma da estrutura para estruturas 3D. Fonte: YU (2015).

## 2 Procedimentos metodológicos

O estudo da influência da variação de fração volumétrica da inclusão no comportamento mecânico elástico de compósitos reforçados com partículas foi feito através do software SwiftComp, sendo este desenvolvido com base no conceito de Mecânica das Estruturas Genoma (MEG), conceito este, explicado com mais detalhes no tópico anterior.

O seu uso ocorreu por meio de uma extensão desenvolvida para a plataforma de simulação numérica da ANSYS Workbench. A versão utilizada do ANSYS Workbench foi a 19.2 Student. Para facilitar o uso do SwiftComp foi utilizada uma interface gráfica acoplada ao ANSYS, chamada de SwiftComp GUI.

Esta extensão é utilizada para alimentar simulações realizadas com o método de elementos finitos por meio de uma modelagem eficaz de alta fidelidade e em múltiplas escalas para diferentes tipos de compósitos. Sendo capaz de capturar a anisotropia e heterogeneidade de compósitos na escala microscópica ou em qualquer outra.

O fluxo de trabalho do MSG ocorre da seguinte forma: Inicialmente partimos de um modelo contínuo 3D. Em seguida, com base nas características apresentadas pelo modelo contínuo 3D, definimos o SG.

Posteriormente, o MSG usa o princípio da perda mínima de informações (PMIL), com base no poderoso método assintótico variacional (VAM), para dissociar o problema original em uma modelagem constitutiva sobre o SG e uma análise estrutural. A modelagem constitutiva foi implementada em um software de uso geral chamado SwiftComp<sup>TM</sup>, desenvolvido pelo professor Wenbin Yu na Purdue University (ZHAO, 2016) [11].

Por meio da homogeneização realizada pelo SwiftComp obteremos os modelos constitutivos necessários para análise estrutural e por meio da desomogeneização iremos ter campos locais de deslocamento, tensão e deformação. Através do ANSYS é que realizamos a análise estrutural global, fornecendo o comportamento global do SwiftComp para assim realizarmos a desomogeneização. Segue abaixo uma imagem mostrando o fluxo de trabalho para o que foi descrito.

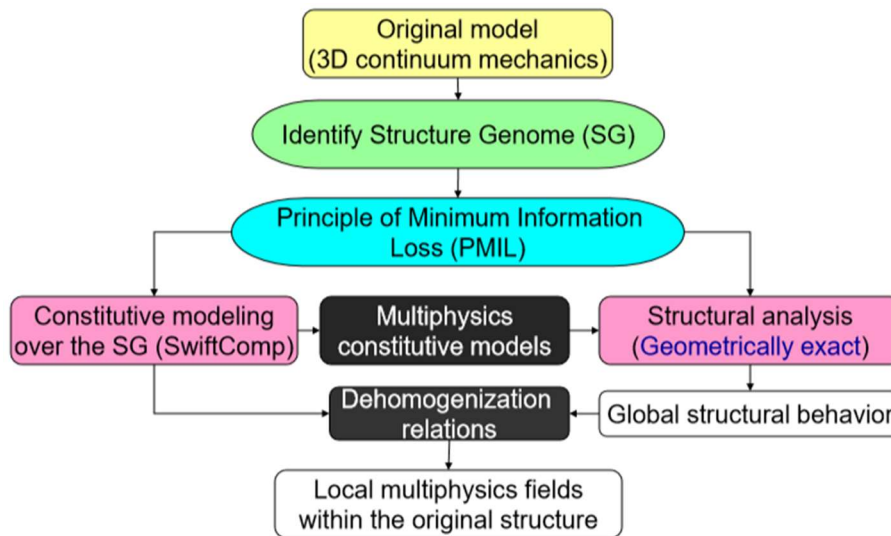


Figura 2: Fluxo de trabalho para a Mecânica das Estruturas Genoma. Fonte: YU (2016).

Para a realização de tal estudo analisamos compósitos reforçados com partículas esféricas, onde variamos a fração volumétrica da inclusão de 0 a 20 % a cada 4%. Levando em consideração que o material estudado é isotrópico, teremos que o Módulo de Young (E), Módulo de Elasticidade Transversal (G) e o Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) da matriz de alumínio serão respectivamente iguais a 71GPa, 26,692GPa e 0,33. Para a partícula esférica de carvão de silício teremos os seguintes valores: E = 400 GPa, G = 175,44GPa e  $\nu = 0,14$ .

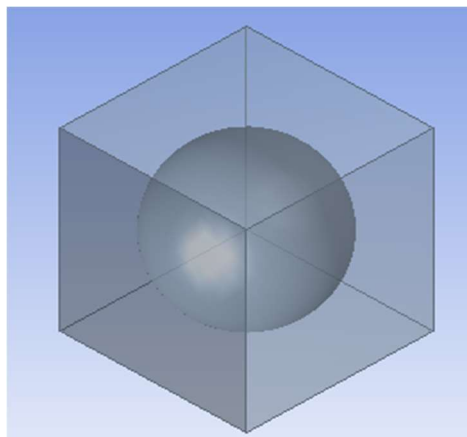


Figura 3: SG para um compósito reforçado com partícula.

Os dados das propriedades homogeneizadas obtidos através dessa metodologia foram comparados aos adquiridos por meio dos métodos utilizados na micromecânica dos campos médios. Ao fim do processo de homogeneização, um arquivo txt é gerado, contendo a matriz de rigidez efetiva, a matriz de conformidade efetiva e as propriedades elásticas homogeneizadas.

### 3 Resultados

Os compósitos particulados, por apresentarem as partículas de reforço com dimensões praticamente iguais em todas as direções, são considerados quase isotrópicos, logo ao realizarmos a homogeneização nas 3 direções, as propriedades homogeneizadas serão aproximadamente iguais nos 3 eixos.

Após a realização do processo de homogeneização, para as frações volumétricas de 0, 4, 8, 12, 16 e 20%, através do SwiftComp, plotamos as curvas da variação do módulo de Young, módulo de elasticidade transversal e coeficiente de Poisson em função da fração volumétrica, para este método e também para o da micromecânica dos campos médios, a fim de comparar os resultados entre ambos.

Analisando o comportamento do módulo de Young, representado no gráfico 1, notamos um comportamento crescente nos valores desta propriedade de acordo com o aumento da fração volumétrica, elevando desta forma a rigidez do material. O Módulo de Elasticidade Transversal, gráfico 2, também apresentou um comportamento semelhante, apresentando aumento à medida que iríamos elevando os níveis de fração volumétrica.

O coeficiente de Poisson, gráfico 3, apresentou um comportamento contrário ao das duas propriedades citadas anteriormente, mostrando, portanto, um comportamento decrescente com o aumento da fração volumétrica, pois ao tornar a estrutura do compósito mais rígida, a relação de deformação axial e transversal será menor, ou seja, transversalmente será mais difícil de ocorrer deformação devido à alta rigidez oferecida pelas partículas.

Notamos que a diferença entre ambas as técnicas é mínima, validando desta maneira a metodologia apresentada. As maiores diferenças, em porcentagem, encontradas para as propriedades analisadas entre ambas as técnicas abordadas, foram as seguintes: 0,0223% para o Módulo de Young, 0,0389% para o Módulo de Elasticidade Transversal e 0,0149% para o Coeficiente de Poisson. Isso pode ser visto nos gráficos 1, 2 e 3. Sendo assim essa diferença desprezível entre as técnicas, reforça a validação entre elas, estando em concordância com a literatura, pois, segundo Yu (2016) [11], para um material heterogêneo com EVR 3D e condições de contorno periódicas, tanto a análise utilizando a abordagem de EVR quanto a do MEG, irão apresentar os mesmos resultados para propriedade efetivas e campos locais. De acordo com Zhao (2016) [11], o SG apresenta mais vantagens quando comparado ao elemento de volume representativo (EVR). A seguir elencamos algumas dessas vantagens.

- O SG 1D possui a capacidade de calcular todas as propriedades 3D e os campos locais para estruturas que apresentam heterogeneidade 1D. Já a partir de um EVR 1D não é possível definir todas as propriedades 3D nem os campos locais.
- Com relação a um EVR 2D, eles só possuem a capacidade de definir as propriedades no plano e campos locais. Caso seja necessário obter o conjunto completo das propriedades para uma análise 3D, teremos que definir um EVR 3D. Para a abordagem a partir do SG essa restrição não existe.
- Nos modelos de análise utilizando EVR é preciso que haja a definição de condições de deslocamentos e trações, sendo estas dispensáveis nos modelos baseados em SG
- A análise a partir do MSG apresenta mais vantagem que a EVR, pois não é necessário aplicar condições de deslocamento e tração devido ao fato dos modelos serem baseados em SG.

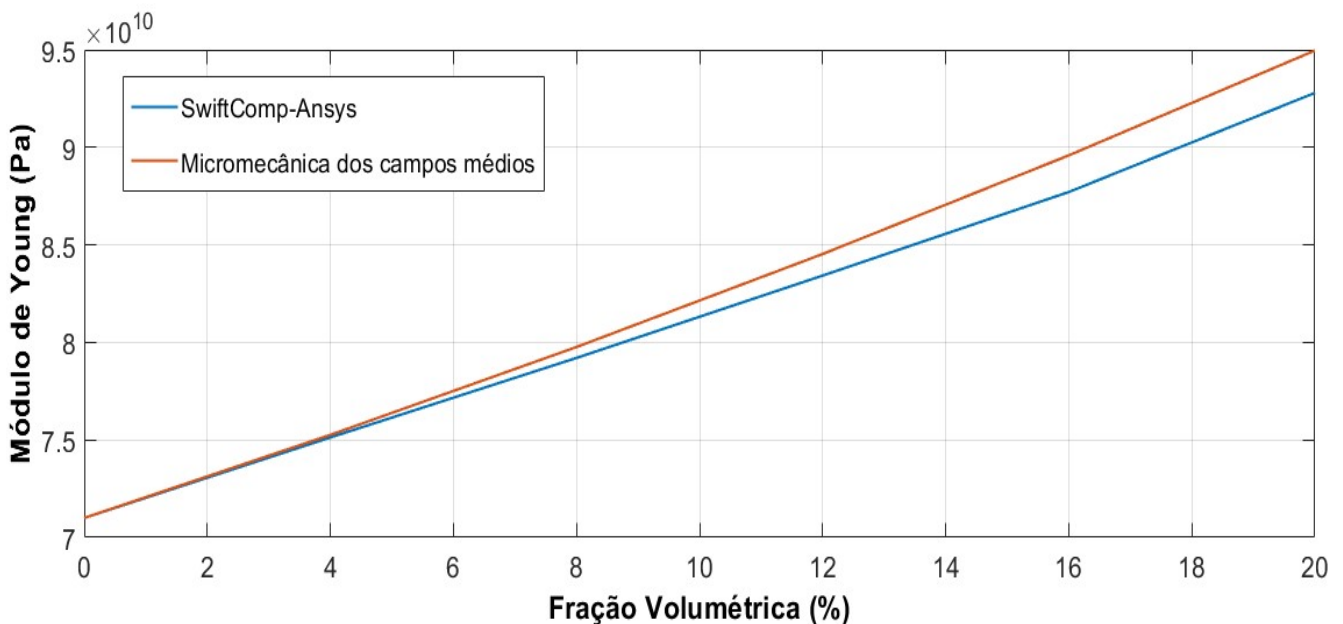


Gráfico 1: Comparação do Módulo de Young obtido pela micromecânica dos campos médios e pelo SwiftComp.

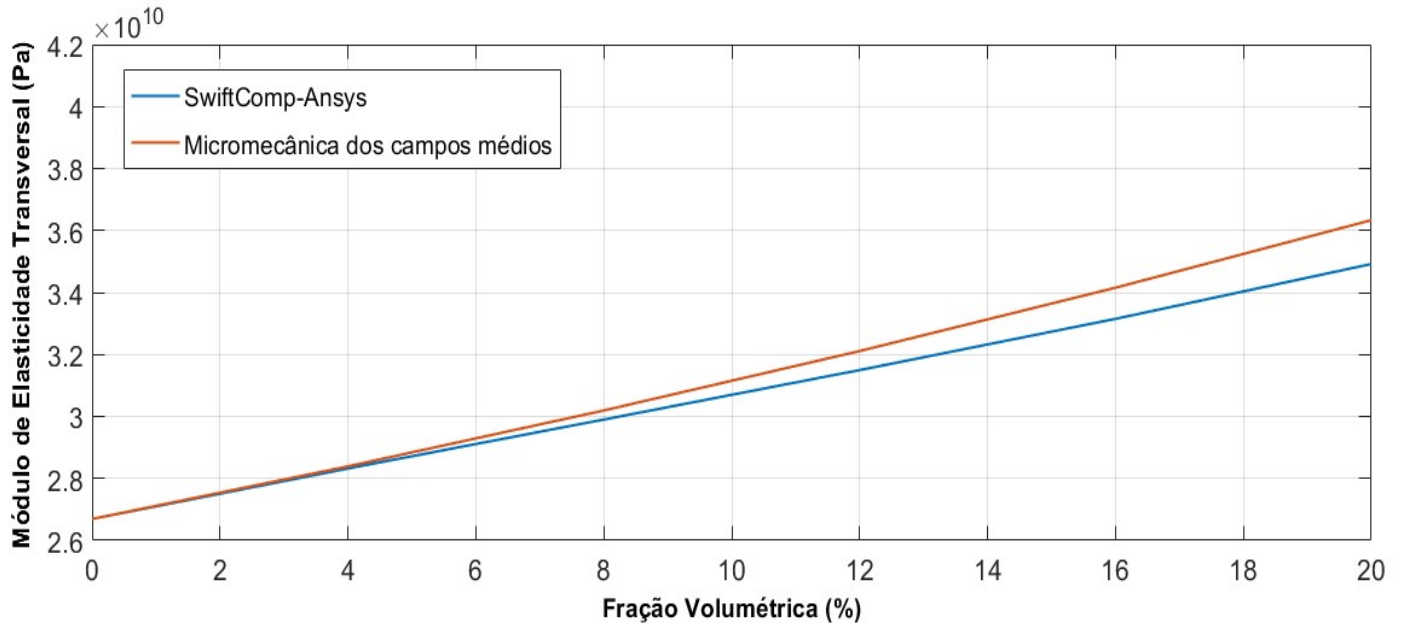


Gráfico 2: Comparação do Módulo de Elasticidade Transversal obtido pela micromecânica dos campos médios e pelo SwiftComp.

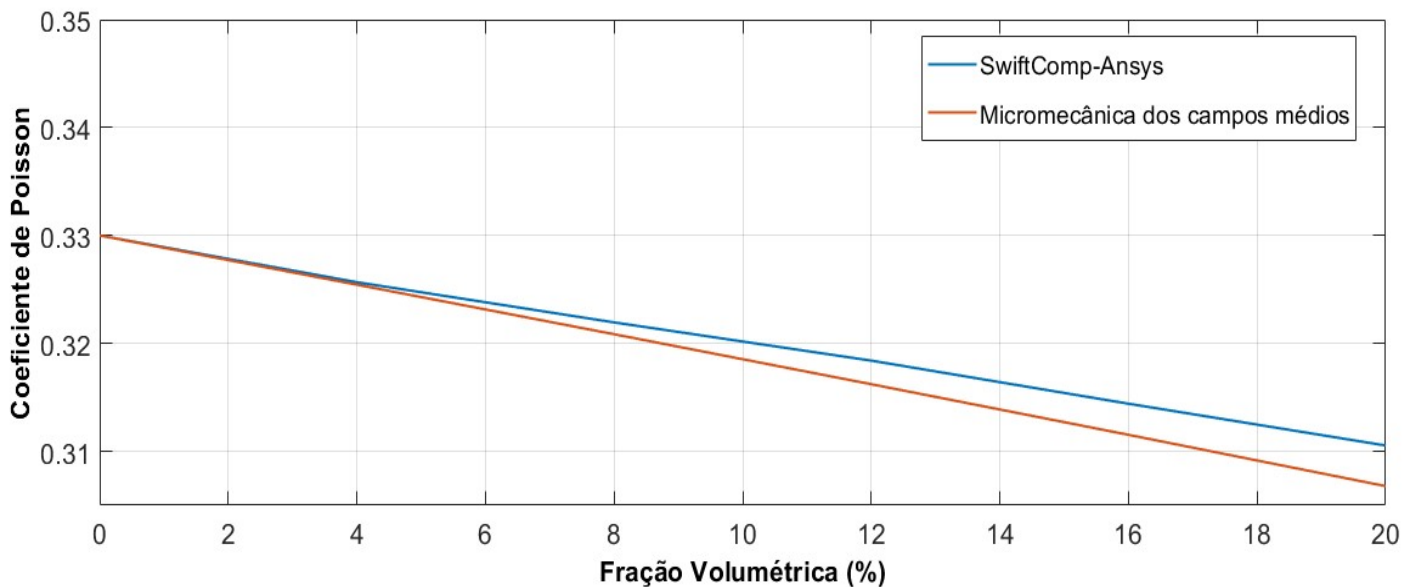


Gráfico 3: Comparação do Coeficiente de Poisson obtido pela micromecânica dos campos médios e pelo SwiftComp.

## 4 Conclusão

A partir do estudo desenvolvido foi verificado que a técnica da Mecânica das Estruturas Genoma, utilizando o SwiftComp acoplado ao ANSYS, mostrou-se promissora para análises em multiescalas, permitindo que engenheiros e pesquisadores simulem materiais compósitos com um maior nível de fidelidade de maneira rápida, sendo possível também definir a melhor composição para o material a depender da aplicação que desejamos. Os módulos de Young e módulo de elasticidade transversal tiveram seus comportamentos acompanhados com a

variação da fração volumétrica do reforço, apresentando uma tendência de crescimento à medida que esta era aumentada, logo tornando-o mais rígido. O coeficiente de Poisson por sua vez, mostrou um comportamento decrescente com o aumento da fração volumétrica da inclusão. Os resultados obtidos neste estudo foram comparados com os adquiridos da micromecânica dos campos médios. A comparação revelou a validação dos dados, havendo uma diferença praticamente desprezível entre ambas as técnicas. Outras pesquisas, a exemplo da de Almeida e Lourenço comprovaram através dos resultados apresentados no estudo de homogeneização elástica de alvenarias utilizando a Mecânica das Estruturas Gene, que esta técnica pode ser utilizada de maneira satisfatória no processo de homogeneização de materiais compósitos, sendo mais vantajosa, com relação a redução de custo computacional e precisão, quando comparada a outros métodos com a mesma finalidade. Os resultados apresentados neste trabalho também podem ser obtidos através da versão mobile do SwiftComp, disponível para iOS e Android.

**Agradecimentos:** Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Iniciação Científica que foi concedida para o desenvolvimento da pesquisa, a AnalySwift por ter concedido uma licença acadêmica do software SwiftComp, para a realização desta pesquisa.

**Declaração de autoria.** Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho, e que todo o material que foi incluído neste documento é propriedade (e autoria) dos autores, ou tem a permissão dos proprietários para ser incluído aqui.

## 5 Referências

- [1] SILVA, Leandro José da. Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos laminados com fibras vegetais. 2011. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei, 2011. Disponível em: [https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/Leandro\\_da\\_Silva\\_1.pdf](https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/Leandro_da_Silva_1.pdf). Acesso em: 16 mar. 2020.
- [2] Sousa, Lopes, Bruno L. Polímeros reforçados por fibras vegetais uma revisão sobre esses compósitos. Editora Blucher, 2017. [Minha Biblioteca].
- [3] Neto, L., Flamínio, Pardini, Claudio, L. Compósitos estruturais 2ª edição. Brasília; Edgard Blücher Ltda, 2016. 9788521210795. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521210795/>. Acesso em: 17 Apr 2020.
- [4] VENTURA, Ana Mafalda F.M.. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. C.Tecn. Mat., Lisboa, v. 21, n. 3-4, p. 10-19, jul. 2009. Disponível em: [http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0870-83122009000200003](http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0870-83122009000200003). acessos em 18 jul. 2020.
- [5] Jr., C., D., W., RETHWISCH, G., D. Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução, 9ª edição. Rio de Janeiro, RJ; Grupo Editorial Nacional, 2016. 9788521632375. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521632375/>. Acesso em: 18 Apr 2020.
- [6] GUAMÁ, Fernando F. M. C. de. ANÁLISE ESTRUTURAL DE CILINDROS REVESTIDOS DE COMPÓSITOS PARA ARMAZENAMENTO DE GNV. 2012. 106 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: [http://www.prh37.org/index\\_arquivos/alunos/Fernando.Guama.GRA.2012.pdf](http://www.prh37.org/index_arquivos/alunos/Fernando.Guama.GRA.2012.pdf). Acesso em: 10 fev. 2020.
- [7] MORAES, Diogo Henrique. Análise Numérica de Falha em Laminados Compósitos Utilizando Modelagem Multiescala. 2014. Disponível em: [http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/265878/1/Moraes\\_DiogoHenrique\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/265878/1/Moraes_DiogoHenrique_M.pdf). Acesso em: 17 abr. 2020.
- [8] W. Yu. Journal Club Theme of October 2015: Mechanics of Structure Genome. <http://imechanica.org/node/18928>.
- [9] ALMEIDA, Francisco P. A.; LOURENÇO, Paulo B. HOMOGENEIZAÇÃO ELÁSTICA DE ALVENARIA UTILIZANDO MECÂNICA DAS ESTRUTURAS GENE. **XI CILAMCE**, Natal - RN, 11 nov. 2019. Disponível em: <https://ideiascloud.duckdns.org/CILAMCE/6260.pdf>. Acesso em: 12 out. 2020.
- [10] YU, Wenbin. **SwiftCompTM User Manual**: Version 1.2. [S. l.: s. n.], 2016. 39 p.
- [11] Zhao, Banghua, "Analysis of composite plates by using mechanics of structure genome and comparison with ANSYS" (2016). Open Access Theses. 914. [https://docs.lib.purdue.edu/open\\_access\\_theses/914](https://docs.lib.purdue.edu/open_access_theses/914).