



ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA CONSIDERANDO PROCESSOS DE PLASTICIDADE E DESCOLAMENTO DA INTERFACE

Wanderson Ferreira dos Santos

Gabriela Rezende Fernandes

José Julio de Cerqueira Pituba

wanderson.ufgengcivil@gmail.com

gabrielar.fernandes@ufg.br

julio_pituba@ufg.br

Universidade Federal de Goiás

Laboratório de Modelagem Computacional, CEP 75704-020, Catalão, Goiás, Brasil

Resumo. *O presente trabalho aborda sobre o comportamento mecânico de microestruturas de Compósitos com Matriz Metálica (CMMs) utilizando uma proposta de modelo de homogeneização computacional baseada numa abordagem multi-escala e no Método dos Elementos Finitos. Na microestrutura do compósito, as inclusões são consideradas elásticas e o comportamento da matriz é governado pelo modelo de von Mises com endurecimento isotrópico. Um modelo de fratura coesiva é desenvolvido para simular a fase de descolamento da interface matriz/inclusão. Todo o estudo é baseado no conceito de Elemento de Volume Representativo (EVR), onde EVRs com diferentes composições de inclusões foram analisados. De modo geral, os resultados encontrados contribuem para a discussão acerca do emprego de modelos simples, em termos de formulação e identificação paramétrica, na modelagem da microestrutura de materiais heterogêneos, refletindo assim na acurácia de resultados qualitativos quanto ao seu comportamento macroscópico e balizando um futuro emprego numa modelagem totalmente acoplada em várias escalas.*

Palavras-chave: *Modelagem Multi-escala, Plasticidade, Fratura, Materiais Heterogêneos*

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas surgiram as teorias multi-escala, as quais relacionam conhecimentos de diferentes escalas na obtenção de respostas sobre o comportamento do material. Neste tipo de abordagem, as escalas inferiores fornecem informações importantes no estudo das escalas superiores, o que permite uma definição detalhada da microestrutura do material e, conseqüentemente, uma análise mais minuciosa de seu comportamento mecânico. Conforme apresenta Giustte (2009), o processo de ligação entre as diferentes escalas envolvidas é chamado de homogeneização, permitindo, por exemplo, a transição entre a microescala e a macroescala. Por sua vez, a microestrutura do material é modelada num Elemento de Volume Representativo (EVR), o qual deve possuir uma dimensão capaz de incluir o maior número de heterogeneidades (LOPES, 2013).

A modelagem multi-escala vem ganhando espaço na análise do comportamento constitutivo de diversos materiais, principalmente aqueles caracterizados por uma estrutura heterogênea. Isso ocorre porque ao nível de sua microestrutura existem inclusões, diferentes fases e até mesmo vazios, características estas responsáveis por afetar diretamente os resultados obtidos a partir de modelos macroscópicos.

Neste trabalho é realizada uma abordagem específica sobre os CMMs, materiais com potencial aplicação em diversas situações devido à suas excelentes propriedades mecânicas. Azizi (2012) afirma que a aplicação de CMMs está em franco crescimento e isso ocorre devido à melhora nas propriedades mecânicas do material com a inclusão de reforços, proporcionando significativos ganhos em rigidez, resistência, resistência à deformação lenta, resistência ao desgaste, o que resulta em materiais com baixa densidade e com uma capacidade de amortecimento maior. Por outro lado, estes compósitos apresentam como característica uma estrutura mais complexa, diferente de diversos materiais convencionais com uma estrutura simplificada, geralmente isotrópica e homogênea. Portanto, justifica-se a utilização de uma modelagem da microestrutura de CMMs baseada em processo de homogeneização computacional segundo uma abordagem multi-escala. Para tanto, são utilizados modelos constitutivos simples, cuja formulação incorpora os conceitos referentes à plasticidade e à fratura, visando modelar de forma mais consistente o comportamento desta classe de materiais. Cabe destacar que o foco deste trabalho são análises realizadas em uma única escala, no caso a micro-escala representada pelo EVR.

2 ABORDAGEM MULTI-ESCALA

Os modelos multi-escala utilizam informações provenientes da microestrutura do material, objetivando a obtenção de previsões mais realísticas e consistentes sobre o seu comportamento global. Para cada ponto do problema global (EVR) realiza-se uma análise local considerando aspectos relacionados à heterogeneidade do material, ao desenvolvimento e propagação de microfissuras e outros mecanismos de dissipação e/ou ganho de energia. Posteriormente à análise local, o comportamento global é obtido pela média dos campos mecânicos através do processo de homogeneização.

Fernandes et al. (2015) explana de maneira detalhada sobre os procedimentos envolvendo a modelagem multi-escala, sendo que apresentam como princípios básicos: (1) Equilíbrio do

EVR; (2) Princípio da Macro-Homogeneidade de Hill Mandel; (3) Média volumétrica dos tensores de deformação e tensão; e (4) Pressuposto de que o espaço das flutuações de deslocamento cinematicamente admissíveis do EVR é um subespaço do espaço da mínima restrição cinemática sobre as flutuações de deslocamento compatíveis com a proposição da média volumétrica da deformação. No que segue, está uma descrição sobre alguns aspectos relevantes desta modelagem. Maiores detalhes da formulação multi-escala empregada neste trabalho podem ser encontrados em Santos et al. (2016).

2.1 Processo de Homogeneização

No âmbito da modelagem multi-escala, para cada ponto x do macro-contínuo, representado por Ω , existe associado um EVR, representado por Ω_μ . O EVR é caracterizado pela coordenada y e apresenta fronteira definida por $\partial\Omega_\mu$, cujo símbolo de derivada parcial ∂ indica o contorno do domínio analisado. De modo geral, considera-se que o EVR é constituído pela parcela referente à matriz, representada por Ω_μ^m , e pela parcela referente às inclusões, representadas por Ω_μ^i . Ademais, o comprimento na microescala (l_μ) deve ser muito inferior ao comprimento da macroescala (l). A Fig. 1 apresenta de forma ilustrativa a relação entre o macroescala e a microescala.

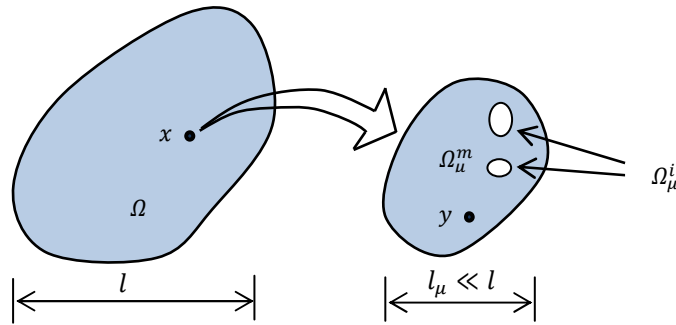


Figura 1. Representação da macroescala e da microescala. Adaptado (GIUSTTI, 2009).

O processo de homogeneização consiste em uma média variável ao longo do volume do EVR. Dessa forma, os campos macroscópicos associados ao ponto x são obtidos como a média volumétrica dos campos relacionados ao EVR.

A deformação na macroescala ε é dada pela média das deformações na microescala:

$$\varepsilon = \frac{1}{V_\mu} \int_{\Omega_\mu} \varepsilon_\mu dV_\mu \quad (1)$$

Analogamente, as tensões macroscópicas σ são obtidas por:

$$\sigma = \frac{1}{V_\mu} \int_{\Omega_\mu} \sigma_\mu dV_\mu \quad (2)$$

As tensões e deformações na macroescala são relacionadas pelo tensor constitutivo D , que também passa pelo processo de homogeneização:

$$D = \frac{1}{V_\mu} \int_{\Omega_\mu} D_\mu dV_\mu \quad (3)$$

Por sua vez, o problema em estudo apresenta caráter elástico linear e, portanto, é válida a utilização da Lei de Hooke, que em sua forma generalizada é dada por:

$$\sigma_{6 \times 1} = D_{6 \times 6} \varepsilon_{6 \times 1} \quad (4)$$

em que: $\sigma_{6 \times 1}$ é o tensor das tensões; $\varepsilon_{6 \times 1}$ é o tensor das deformações; $D_{6 \times 6}$ representa o tensor constitutivo do material, onde D_{ij} são as componentes do tensor.

Como as formulações envolvem o estado plano de tensão, isto é, o sólido é caracterizado por apresentar uma espessura pequena média de referencial xy , a Eq. (4) resume-se em:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

2.2 Princípio de Hill Mandel

A utilização do princípio de Hill Mandel propicia estabelecer a associação entre dois domínios. Nessa conjuntura, pode-se estabelecer que a potência dos tensores no macro-contínuo é igual à potência dos tensores homogeneizados microscópicos no EVR:

$$\sigma : \varepsilon = \frac{1}{V_\mu} \int_{\Omega_\mu} \sigma_\mu : \varepsilon_\mu dV_\mu \quad (6)$$

A Equação (6) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\sigma : \varepsilon = \bar{\sigma}_\mu : \bar{\varepsilon}_\mu \quad (7)$$

em que: $\bar{\sigma}_\mu$ e $\bar{\varepsilon}_\mu$ representam os tensores de tensão e deformação homogeneizados na microescala, respectivamente.

Logo, o processo envolvido engloba considerações energéticas, o que impõe na existência de um fluxo com a mesma quantidade de energia em ambas as escalas.

2.3 Campo de Deslocamento e Flutuação dos Deslocamentos

O campo de deslocamento microscópico u_μ , em função de y , pode ser decomposto de forma aditiva pelas seguintes parcelas: deslocamento de corpo rígido $u(x)$; deformação homogênea Ey ; e um campo de flutuação de deslocamento $\tilde{u}_\mu(y)$. Logo, o deslocamento microscópico é dado por:

$$u_\mu(y) = u(x) + Ey + \tilde{u}_\mu(y) \quad (8)$$

Um melhor entendimento sobre tal decomposição pode ser verificado a partir da análise de sua representação geométrica, apresentada na Fig. 2.

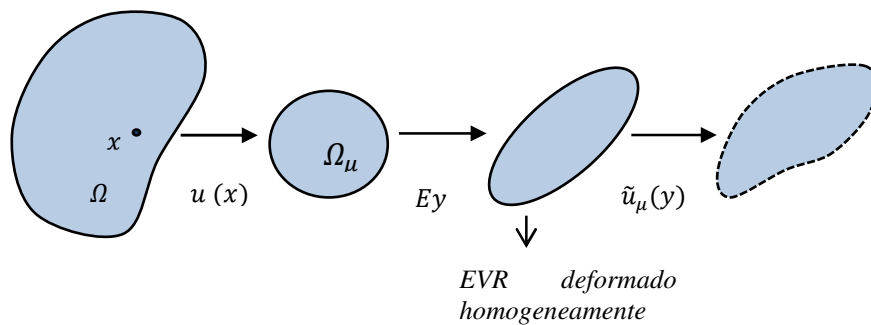
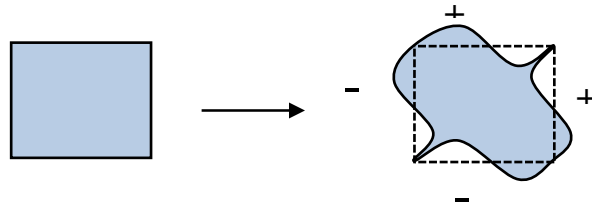


Figura 2. Decomposição dos campos de deslocamento microscópico. Adaptado (GIUSTTI, 2009).

Os conceitos de homogeneização e a decomposição aditiva dos campos microscópicos estabelecem restrições de deslocamento no contorno do EVR. Assim, a modelagem deste processo pode ser realizada utilizando diferentes modelos constitutivos multi-escala. Neste trabalho é empregado o modelo de Flutuação Periódica no contorno do EVR, em que a flutuação de um ponto y no contorno do EVR ocorre de maneira periódica, isto é:

$$\tilde{u}_\mu(y^+) = \tilde{u}_\mu(y^-) \quad \forall y \in \partial\Omega_\mu \quad (9)$$

É importante ressaltar que nos cantos as flutuações são nulas. Uma representação ilustrativa do modelo em questão está apresentada na Fig. 3.

**Figura 3. Modelo de Flutuação Periódica no contorno do EVR.**

3 MODELAGEM CONSTITUTIVA DO MATERIAL

Neste trabalho, a metodologia utilizada para a simulação do comportamento mecânico dos CMMs consiste no procedimento de discretização em elementos finitos. Dessa forma, as inclusões são constituídas por elementos triangulares elásticos, em que é válida a utilização da Lei de Hooke. Por sua vez, a matriz é formada com elementos triangulares, cujo comportamento é descrito pelo modelo de von Mises com endurecimento isotrópico. Por fim, a interface matriz-inclusão é modelada através elementos de fratura e contato que abarcam um modelo de Contato e Fratura Coesiva desenvolvido em Pituba et al. (2016).

O critério de plasticidade de von Mises é comumente utilizado para descrever o processo de evolução das deformações plásticas em metais. Por se tratar de um modelo bastante difundido na literatura, aqui não são realizadas considerações em relação à sua formulação.

Como o objetivo principal das análises é modelar o descolamento da interface matriz-inclusão de CMMs, no que segue são apresentados os conceitos gerais da formulação do modelo de Contato e Fratura Coesiva empregado na simulação dos EVRs. Este modelo descreve a lei coesiva de deformação finita irreversível. Nesse contexto, a aplicação de determinado carregamento na estrutura acarreta deslocamentos e a energia coesiva liberada φ pode ser escrita como:

$$\varphi = \varphi(\delta_n, \delta_s, q) \quad (10)$$

em que: δ_n corresponde ao deslocamento de abertura normal das faces fissura, δ_s representa o deslocamento de abertura por deslizamento das faces da fissura e q consiste em uma variável responsável pelos processos inelásticos de decoesão.

Por simplicidade, pode-se considerar que a parcela referente ao deslizamento na abertura independe da direção da superfície da fissura, ou seja:

$$\delta_s = |\delta_s| \quad (11)$$

No que diz respeito à formulação da lei coesiva dos modos mistos, é introduzido um deslocamento de abertura efetivo δ , dado por:

$$\delta = \sqrt{\beta^2 \delta_s^2 + \delta_n^2} \quad (12)$$

em que, β varia de 0 a 1 e assume valores diferentes conforme os valores das deformações normal e por deslizamento.

Assumindo o fato de que φ depende de δ , a lei coesiva pode ser escrita na forma:

$$\mathbf{t} = \frac{t}{\delta} (\beta^2 \delta_s + \delta_n \mathbf{n}) \quad (13)$$

onde: $\mathbf{n}$ é o vetor normal à fissura, δ_s é o vetor de abertura deslizante na fissura e $\mathbf{t}$ é denominado vetor de tensão coesiva ao longo da fissura.

Por sua vez, t é um escalar de tração efetiva dado por:

$$t = \sqrt{\beta^{-2} |t_s|^2 + t_n^2} \quad (14)$$

Para simular um comportamento de fratura em materiais dúcteis, Pituba et al. (2016) apresenta as seguintes relações:

$$t = \sigma_c e^{-\delta/\delta_c} \quad \text{se} \quad \delta = \delta_{max} \text{ e } \dot{\delta} \geq 0 \quad (15)$$

$$t = \frac{t_{max}}{\delta_{max}} \delta \quad \text{se} \quad \delta < \delta_{max} \text{ ou } \dot{\delta} < 0 \quad (16)$$

em que, σ_c é a máxima tensão coesiva e δ_c representa a abertura crítica.

Outro aspecto de suma importância para a simulação do descolamento na interface matriz-inclusão compreende a modelagem de como se desenvolve o contato nesta região. Uma alternativa consiste na utilização do fator de penalidade λ_p , um parâmetro utilizado para criar uma rigidez suficiente entre os elementos, a fim de evitar que uma face adentre outra, o que é fisicamente impossível. Nos regimes de tração, o fator de penalidade substitui a porção rígida inicial da lei coesa por uma resposta linear rígida na forma:

$$t = \lambda_p \delta \quad \text{se} \quad \lambda_p \delta \leq \sigma_c \quad (17)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No que segue, estão os resultados obtidos quanto ao emprego de modelos constitutivos utilizados dentro de uma abordagem multi-escala para análise do comportamento de CMMs ao nível de sua microestrutura. As análises visaram avaliar o comportamento em relação ao gráfico tensão $\times$ deformação de EVRs compostos por quatro (4) inclusões (12% de seu volume em inclusões) e oito (8) inclusões (14% de seu volume em inclusões). Inicialmente, foram obtidos resultados considerando apenas a modelagem referente à Teoria Plasticidade, assumindo assim a existência de uma coesão perfeita entre a matriz e o reforço. Posteriormente, a modelagem utilizada incorporou a Teoria da Plasticidade em conjunto com a Teoria da Fratura e do Contato para avaliar também o descolamento da interface matriz-inclusão. Inclusive, na modelagem da interface considerou-se a variação da máxima tensão coesiva σ_c , parâmetro responsável descrever a interação entre as faces da matriz e da inclusão.

Os valores iniciais dos parâmetros referentes às propriedades dos materiais foram definidos a partir do trabalho de Azizi (2012). Para a matriz adotou-se um coeficiente de Poisson $\nu_m = 0.3$ e um módulo de elasticidade E_m , para o qual é atribuído valor de acordo com o tipo de material. No que tange as inclusões, utilizou-se um coeficiente de Poisson $\nu_i = 0.17$ e a seguinte relação para o módulo de elasticidade $E_i = 5.7 E_m$. Cabe ressaltar ainda que todas as análises foram realizadas utilizando o modelo de von Mises com endurecimento isótropo.

Para a matriz, utilizou-se como material constituinte o alumínio com módulo de elasticidade $E_m = 69000 \text{ MPa}$, resultando assim em um módulo de elasticidade para as inclusões de $E_i = 393300 \text{ MPa}$. Para as deformações, considerou-se nas direções x e y as seguintes deformações $\varepsilon_x = 0.0009$ e $\varepsilon_y = -0.00003$, respectivamente. Por sua vez, a deformação distorcional correspondeu à $\gamma_{xy} = 0.000004$. Outros valores correspondem às características dos elementos de fratura, tais como: $\beta = 0.7$, $\lambda_p = 200000$, $\delta_c = 0.0568 \text{ mm}$. Por fim, a tensão de escoamento utilizada correspondeu a $\sigma_y = 50 \text{ MPa}$.

4.1 EVR composto por quatro (4) inclusões

Os resultados obtidos para o EVR com quatro inclusões considerando a modelagem sem fratura e também a modelagem com fratura para diferentes valores de σ_c estão apresentados a seguir. Na Fig. 4-A estão os resultados encontrados para a tensão homogeneizada de cisalhamento. Por outro lado, na Fig. 4-B estão os resultados obtidos para a tensão homogeneizada normal. A Fig. 5 apresenta o EVR deformado para cada valor de σ_c .

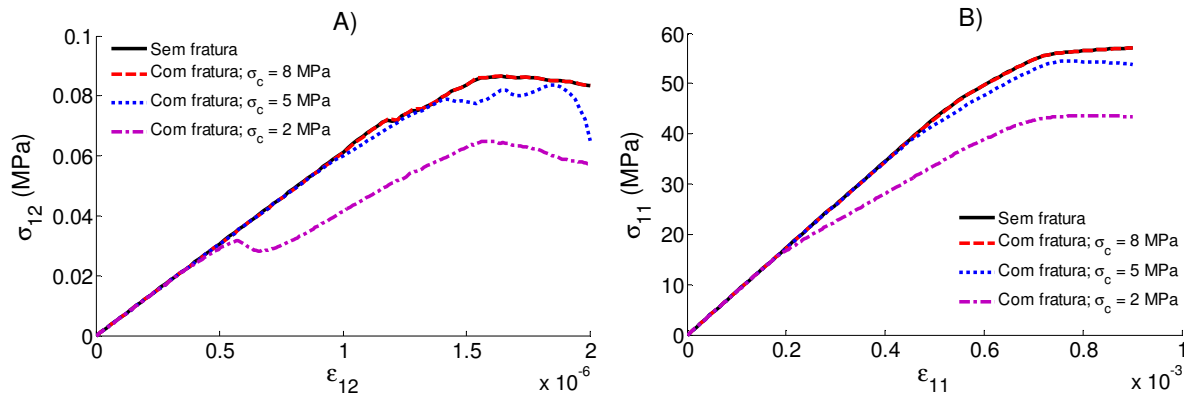


Figura 4. A) Tensão de cisalhamento (σ_{12}) x Deformação distorcional (ε_{12}); B) Tensão normal (σ_{11}) x Deformação normal (ε_{11}).

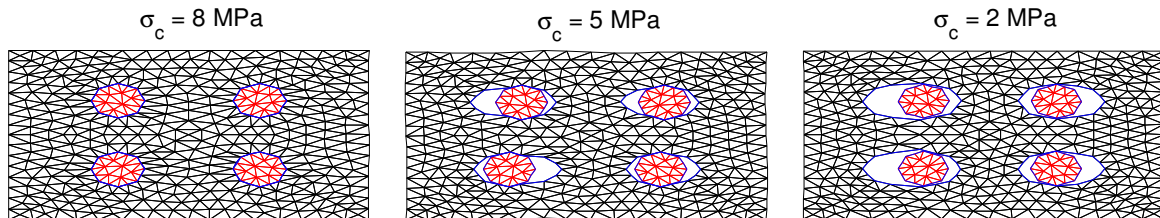


Figura 5. EVR com quatro inclusões deformado.

No que tange à tensão de cisalhamento, verifica-se que modelagem sem a presença de elementos de fratura e contato apresenta uma resposta mais rígida. Já a utilização do modelo de contato e fratura coesiva acarreta na perda de rigidez e resistência, principalmente, para

valores baixos da tensão máxima coesiva σ_c . Para o caso com $\sigma_c = 2 \text{ MPa}$, em determinada momento ocorreu uma perda de rigidez e resistência significativa, entretanto o fato das inclusões serem elásticas contribuiu para que ainda ocorresse um ganho nestas propriedades, o que está de acordo com os resultados apresentados por Azizi (2012). No gráfico da tensão normal, os resultados são próximos tanto na resposta sem fratura quanto na resposta com fratura para valores de σ_c maiores. No entanto, à medida que a máxima tensão coesiva diminui ocorre uma perda significativa de rigidez e resistência do material. Em ambos os gráficos, observa-se, inclusive, uma tendência de *softening* (amolecimento) da curva tensão $\times$ deformação para valores inferiores de σ_c . Assim, conforme os resultados de Segurado e Llorca (2005), reforços fortemente ligados à matriz são capazes de produzir elevada rigidez e resistência, enquanto uma interface fraca resulta em baixa rigidez e resistência.

4.2 EVR composto por oito (8) inclusões

Para o EVR com oito inclusões também foram obtidos resultados considerando a modelagem sem fratura e a modelagem com fratura para diferentes valores de σ_c . Os resultados para a tensão homogeneizada de cisalhamento e para a tensão homogeneizada normal estão indicados na Fig. 6-A e na Fig. 6-B, respectivamente. A Fig. 7 apresenta o EVR deformado para cada valor de σ_c .

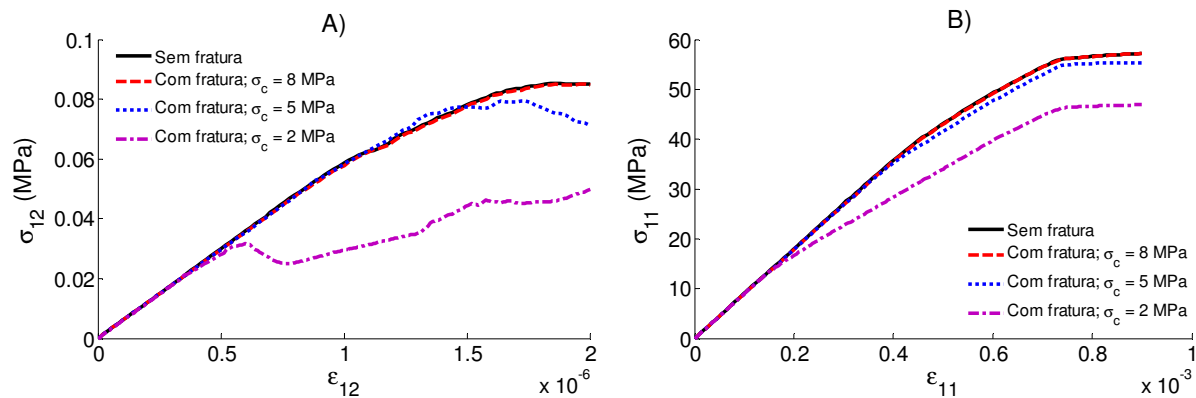


Figura 6. A) Tensão de cisalhamento (σ_{12}) $\times$ Deformação distorcional (ϵ_{12});
B) Tensão normal (σ_{11}) $\times$ Deformação normal (ϵ_{11}).

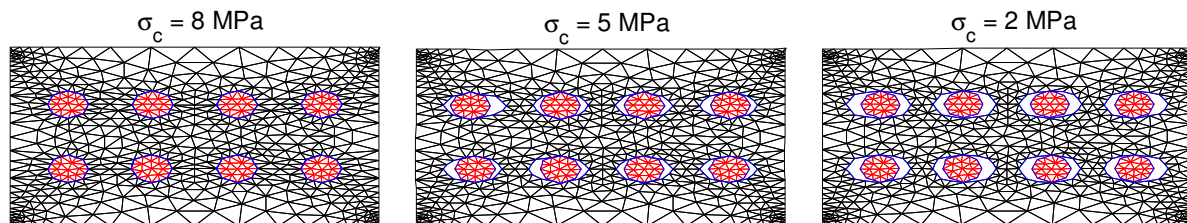


Figura 7. EVR com oito inclusões deformado.

Em relação ao cisalhamento, os resultados são próximos para a modelagem sem fratura e a modelagem com fratura considerando $\sigma_c = 8 \text{ MPa}$. Contudo, a diminuição da coesão entre a interface matriz-inclusão ($\sigma_c = 5 \text{ MPa}$) acarreta, principalmente, uma diminuição na resistência. Para um valor ainda menor ($\sigma_c = 2 \text{ MPa}$) ocorre a perda de resistência e também a

perda de rigidez. Neste caso, assim como no EVR com quatro inclusões, em determinado momento ocorre uma diminuição bastante acentuada de rigidez e resistência, mas as inclusões elásticas contribuem para que ainda ocorra um ganho em tais propriedades. Para a tensão normal, as respostas obtidas são bastante próximas para o modelo sem fratura e o modelo com fratura considerando σ_c com os valores maiores. No entanto, uma diminuição mais sensível na máxima tensão coesiva ($\sigma_c = 2 \text{ MPa}$) implica na perda considerável de rigidez e resistência.

4.3 Estudo comparativo

Outro objetivo das análises consistiu em realizar a comparação entre os resultados do EVR com quatro inclusões e o EVR com oito inclusões. Nesse sentido, a Fig. 8 apresenta os resultados relativos à tensão homogeneizada de cisalhamento e a Fig. 9 os resultados referentes à tensão homogeneizada normal.

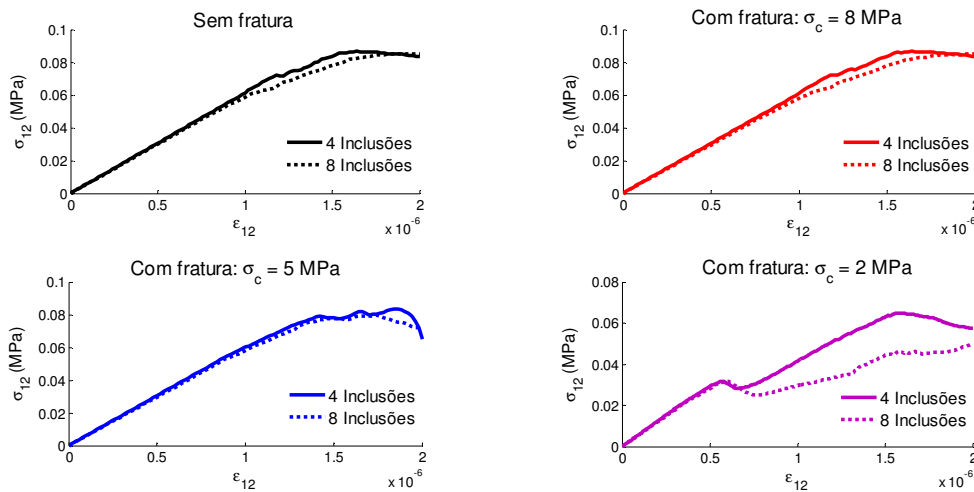


Figura 8. Tensão de cisalhamento (σ_{12}) x Deformação distorcional (ϵ_{12}).

De forma geral, as respostas referentes à tensão de cisalhamento mostram que o percentual em volume das inclusões, aqui modeladas como elásticas, não foi um aspecto determinante, pois o EVR com oito inclusões (volume de inclusões = 14%) apresentou uma diminuição de rigidez e resistência quando comparado com o EVR com quatro inclusões (volume de inclusões = 12%). Dessa forma, o quantitativo de inclusões foi o fator responsável por influenciar nos resultados, sendo que no EVR com a presença de mais inclusões (EVR com oito inclusões) ocorreu um maior faturamento, o qual pode ser justificado pelo processo de descolamento nas interfaces matriz/inclusão.

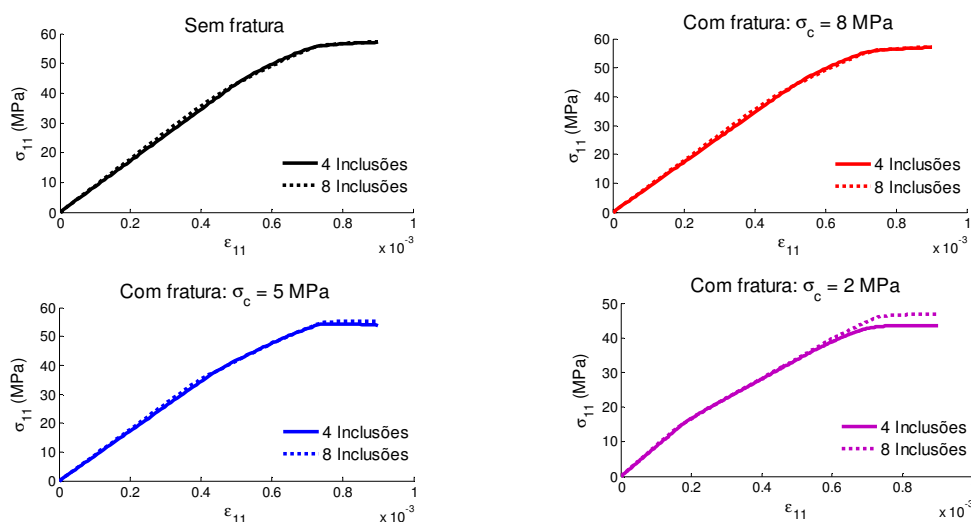


Figura 9. Tensão normal (σ_{II}) x Deformação normal (ε_{II}).

Em relação à tensão normal, os resultados obtidos foram bastante próximos, dificultando assim afirmação sobre qual fator foi preponderante: a quantidade de inclusões ou a sua fração em volume. No entanto, analisando com um olhar mais criterioso percebe-se que o EVR com oito inclusões apresentou uma resposta levemente mais rígida em comparação com o EVR de quatro inclusões. Além disso, também é perceptível o ganho de resistência do EVR com oito inclusões no caso com fratura e $\sigma_c = 2 \text{ MPa}$. Neste caso, a fração em volume de inclusões foi o fator dominante para a obtenção dos resultados, em que o EVR com 14% do volume de inclusões (composto por oito inclusões) promoveu um ganho de rigidez e resistência perante o EVR com 12% do volume de inclusões (composto por quatro inclusões).

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que o entendimento dos mecanismos apresentados nas escalas inferiores configura como uma alternativa para compreender e proporcionar melhorias no desempenho de diversos materiais, principalmente, aqueles caracterizados por apresentarem uma estrutura heterogênea como os CMMs. Desse modo, a utilização da modelagem multi-escala é justificada, pois permite através da utilização de modelos constitutivos simples a obtenção de respostas complexas sobre o comportamento mecânico do material. Por sua vez, a incorporação dos conceitos referentes à Teoria da Plasticidade e Fratura consiste em um aspecto de suma importância neste processo. Isso é evidenciado pelos resultados dos diagramas, sendo que a consideração dos fenômenos dissipativos de energia relacionados ao desenvolvimento de deformações permanentes e ao descolamento na interface matriz-inclusão implicou na perda de rigidez e resistência na resposta dos EVRs. Logo, a abordagem empregada permitiu uma modelagem mais detalhada da microestrutura do material, levando assim a uma análise mais consistente de seu comportamento mecânico.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), pelo suporte financeiro fornecido durante a realização do trabalho.

REFERÊNCIAS

- AZIZI, R. Micromechanical modeling of damage in periodic composites using strain gradient plasticity. *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 92, pp.101-113, 2012.
- FERNANDES, G. R.; PITUBA J. J. C. e SOUZA NETO, E. A. Multi-scale modelling for bending analysis of heterogenous plates by coupling BEM and FEM. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 51, pp. 1-13, 2015.
- GIUSTTI, S. M. *Análise de sensibilidade topológica em modelos constitutivos multi-escalas*. 175 f. Tese (Doutorado/Modelagem Computacional) – Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional, Petrópolis, 2009.
- LOPES, I. A. R. *Análise do dano dúctil baseada em modelos multi-escala*. 113 f. Dissertação (Mestrado/Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- PITUBA, J. J. C.; FERNANDES, G. R. e SOUZA NETO, E. A. Modeling of cohesive fracture and plasticity processes in composite microstructures. *Journal of Engineering Mechanics*. Vol. 142, n.10, 04016069, 2016.
- SANTOS, W. F.; FERNANDES, G. R. e PITUBA, J. J. C. Análise da influência dos processos de plasticidade e fratura no comportamento mecânico de microestruturas de Compósitos de Matriz Metálica. *Matéria (UFRJ)*, vol. 21, n. 3, pp. 577-598, 2016.
- SEGURADO, J. e LLORCA, J. A computational micromechanics study of the effect of interface decohesion on the mechanical behavior of composites. *Acta Materialia*, vol. 53, pp. 4931-4942, 2005.