

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA POROSIDADE NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA COM REFORÇO

INFLUENCE OF VOID ON THE MECHANICAL STRENGTH OF REINFORCED METAL MATRIX COMPOSITES

José Julio de Cerqueira Pituba¹

Geovana Alves Ribeiro²

Resumo: Os materiais compósitos de matriz metálica são aplicados em diversos ramos da indústria devido as suas propriedades mecânicas, como alta resistência e leveza. O material pode ser composto por inclusões rígidas e a matriz pode ser metálica porosa com o intuito de tornar o material mais leve ou devido à não-linearidade física decorrente do processo de fabricação. Apesar dessa composição proporcionar um material resistente, a consideração de poros na matriz pode levar à formação de falhas no material. A partir disso, nota-se a importância do estudo de se considerar a porosidade. Portanto, o presente trabalho tem o objetivo de aproximar o modelo proposto e a realidade do material, contribuindo assim para o entendimento do comportamento mecânico de materiais com forte heterogeneidade. Para tanto, uma modelagem multi-escala que consiste na representação de um ponto do macrocontínuo por um Elemento de Volume Representativo (EVR) é utilizada. Por meio de análises numéricas avalia-se a efetividade da inserção de uma inclusão em uma matriz porosa mostrando as potencialidades da modelagem proposta. De uma maneira geral, evidencia-se que a consideração de inclusão na matriz aumenta a resistência do material até um nível de 7,5% de porosidade, a partir do qual a porosidade comanda o regime de colapso da microestrutura. Além disso, a aleatoriedade da dispersão de vazios rende ao material maior resistência.

Palavras-chaves: Compósito de Matriz Metálica Porosa, Multi-escala, Elementos de Volume Representativo, Análise Numérica.

Abstract: *The metal matrix composites have been used in several applications as structural solutions due to mechanical properties such as low density and high mechanical strength. The material can be composed by stiffened inclusions and the matrix can be porous ductile leading to a low lightweight. Despite the good mechanical properties obtained with several associations of materials, the consideration of porous in matrix region can lead to collapse of the composite. Therefore, it is important to analyse the ductility of metal matrix composites in presence of porous/voids. The goal of this work is to analyse this kind of material in more realistic way as possible. For this reason, a multiscale approach based on the concept of the Representative Volume Element (RVE) is used to simulate the mechanical behaviour of this kind of material. Also, the effectivity of an insertion of reinforced materials in the composites is investigated. The numerical analyses performed in this paper show good description of the mechanical behaviour of the composite material. In general way, the strength of the material is increased by rigid inclusions if the porosity is taking into account up to 7.5% in the matrix.*

Keywords: RVE, Homogenization, Metal Matrix Composites.

¹ Universidade Federal de Goiás - Faculdade de Engenharia (FENG/UFG), e-mail : jjpituba@yahoo.com.br

² Universidade Federal de Goiás - Faculdade de Engenharia (FENG/UFG), e-mail : geovana.al54@gmail.com

1 Introdução

O avanço das civilizações foi marcado por técnicas de produção e surgimento de novos materiais que facilitassem o seu cotidiano, como, por exemplo, a era do ferro, o surgimento da roda e o controle do fogo. Devido a tal desenvolvimento, os recursos naturais passaram a ser largamente empregados. Nas edificações de moradias eram utilizados feixes de palha nas paredes como uma forma de reforço para tornar o material mais resistente. Desse modo, a partir desse tipo de composição surgiram os materiais compósitos. (VENTURA, 2009)

Entretanto, tais materiais permaneceram em desuso durante séculos. De acordo com Ventura (2009), os compósitos voltaram a ser empregados no século XX para a obtenção de estruturas leves. E, no fim do século XX o seu uso expandiu para a indústria aeroespacial, com o intuito de melhorar as aeronaves.

No entanto, os avanços tecnológicos possibilitaram a expansão das aplicações dos compósitos. Atualmente esses materiais são utilizados em diversos ramos, como as indústrias automobilística, aeroespacial e eletrônica. Tal fato se deve às boas propriedades mecânicas do material, como: leveza, alta resistência à corrosão e ao desgaste, baixa expansão térmica e alta rigidez. (WEI *et al.*, 2019). Tais propriedades mecânicas são obtidas pela união da matriz e do reforço. A matriz é o material com menor densidade da composição e é denominada de fase contínua, com a função de interligar os reforços e transmitir os esforços para o material mais rígido. Já o reforço é denominado de fase dispersa sendo um material rígido bastante resistente e de maior densidade.

Cabe ressaltar que as propriedades mecânicas dos materiais que compõem a matriz e o reforço podem ser alteradas pela não linearidade física (NLF). A NLF está relacionada a pequenos defeitos, como dano e fratura, ou devido a problemas no processo produtivo, como, por exemplo, vibração inadequada que pode causar nichos de concretagem (PITUBA, 2015). No entanto, a NLF não está relacionada somente à perda de resistência do material. Utsunomiya e Matsumoto (2014) afirmam que a porosidade em metais pode apresentar diversas vantagens para a aplicação industrial. Desse modo, nota-se a importância do estudo no processo de falha de diversos materiais.

De acordo com Utsunomiya e Matsumoto (2014), os metais porosos podem apresentar as seguintes características: leveza devido à baixa densidade, boa capacidade de absorver impacto, capacidade de controlar vibrações. Segundo Quinet *al.* (2016), esse tipo de material apresenta propriedades mecânicas interessantes, como: boa permeabilidade, estabilidade de forma e resistência a altas temperaturas.

Os metais porosos podem ser classificados em: desordenados e ordenados. A espuma porosa é classificada como desordenada, enquanto o ordenado é composto principalmente por material matricial (QUIN, 2016) podendo esses vazios estarem ou não conectados.

A aplicação desse material se expandiu devido à capacidade de usinagem, apresentando-se como um potencial substituto do material cerâmico, que é frágil, o que dificulta a usinagem. Dessa forma, o material passou a ser utilizado na conservação de energia e proteção ambiental, biológica, médica e na indústria química (QUIN, 2016).

Ainda de acordo com Santos e Pituba (2017), a porosidade pode apresentar vários estágios. A nucleação é o estágio inicial e ocorre, principalmente, em regiões que possuem algum defeito. Os vazios podem aumentar de volume dependendo do estado de deformação do material. E, por último ocorre a coalescência, caracterizada pelo aumento de volume dos poros e interligação dos mesmos. Essa interligação de vazios pode levar o material a falha.

Desse modo, nota-se a importância do estudo dos vazios, bem como, sua forma de distribuição em materiais dúcteis. À medida que se estuda o processo de danificação e falha

do material, é possível melhorar o material aproveitando suas propriedades mecânicas (PITUBA; SOUZA NETO, 2015).

Tendo em vista o exposto, o estudo justifica-se pelo fato de que os compósitos são aplicados em diversas áreas da indústria e da construção civil e possuem grande relevância tecnológica e econômica. Portanto, o objetivo geral do trabalho é analisar a efetividade da inserção de uma inclusão de material rígido em diversas configurações de EVRs com matriz porosa propostas por Santos e Pituba (2017).

No entanto, os materiais heterogêneos possuem a microestrutura mais complexa do que os homogêneos. Assim, nos últimos anos têm sido aplicadas as teorias multi-escala, que por meio de técnicas de homogeneização possibilitam a obtenção de respostas mais realísticas.

Para abordar compósitos de matriz metálica porosa, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é utilizado nas análises numéricas realizadas neste trabalho. Para a modelagem constitutiva dos materiais presentes na microestrutura utiliza-se o Modelo de von Mises para o material da matriz admite-se um comportamento elástico para as inclusões, além de se considerar inclusões perfeitamente aderidas à matriz. As análises utilizam a teoria multi-escala como base considerando a existência de um EVR.

2 Modelagem multi-escala

Para entender a modelagem multi-escala é preciso, primeiramente, definir a modelagem convencional. Na modelagem convencional a aplicação de carga sobre a estrutura gera deslocamentos que permitem calcular deformações e tensões em pontos de interesse. A fim de obter respostas mais precisas pode-se discretizar a estrutura em elementos finitos. (SANTOS *et al.*, 2016)

Por outro lado, na modelagem da multi-escala cada ponto do macrocontínuo pode ser representado por um Elemento de Volume Representativo (EVR). Esse EVR, pertence à micro-escala, será sujeito a uma deformação da macro-escala e como resposta serão obtidas tensões para os pontos do volume do sólido. Também é possível obter a tensão na macro-escala por meio do processo de homogeneização. Essa tensão homogeneizada é a tensão atuante no ponto do macrocontínuo devido à deformação aplicada, como pode ser notado na Figura 1.

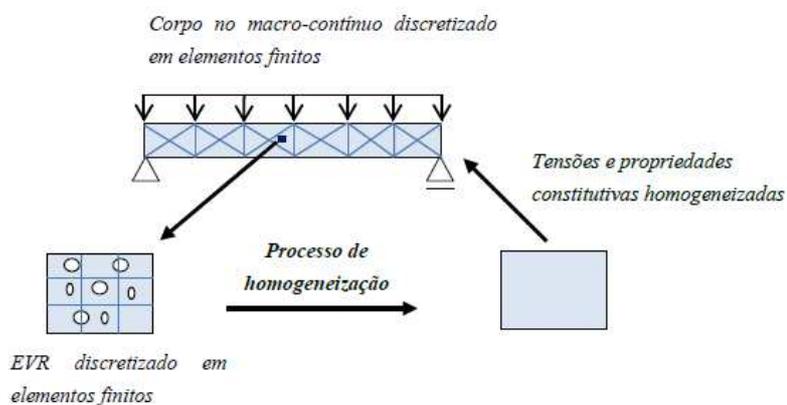


Figura 1. Esquema representativo da modelagem multi-escala (SANTOS *et al.*, 2016).

Na modelagem multi-escala para cada ponto do macrocontínuo está associado um EVR de coordenada y . Esse EVR deve ter dimensões suficientes para captar as

heterogeneidades do material compósito, mas ainda deve pertencer a micro-escala. O EVR é composto por um conjunto Ω_μ que é a união dos conjuntos Ω_μ^s e Ω_μ^v , referentes aos sólidos (matriz e reforço) e vazios. É válido ressaltar que a modelagem citada envolve duas escalas: o macrocontínuo e a micro-escala, representada pelo EVR. Pode ser observado na Figura 2 o esquema representativo dessa modelagem. (SOUZA NETO; FEEIJÓ, 2006)

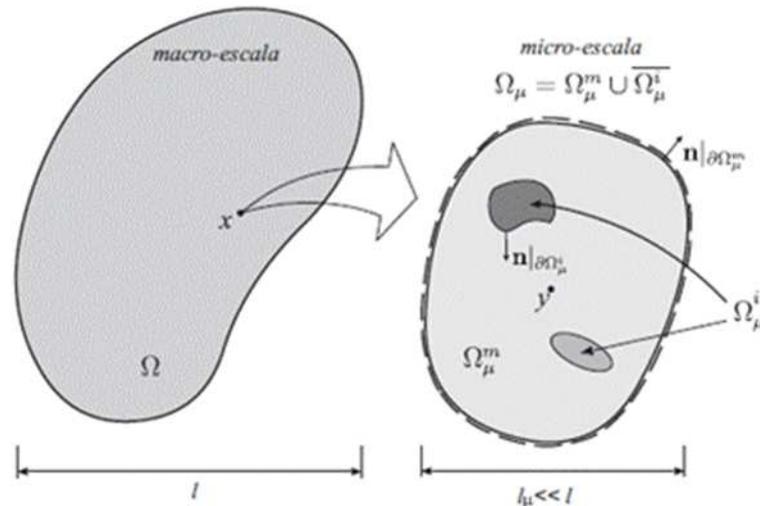


Figura 2. Relação de um ponto do macrocontínuo na micro-escala(GIUSTI, 2009).

Souza Neto e Feijó (2006) apresentaram uma descrição sobre a modelagem constitutiva multi-escala idealizada a partir de formulações variacionais. Os princípios utilizados por eles foram:

- Média volumétrica dos tensores de deformação e tensão;
- Princípio de macro-homogeneidade de Hill-Mandel;
- Suposição do espaço das flutuações de deslocamentos no EVR;
- Equilíbrio do EVR.

2.1 Processo de homogeneização

De acordo com Souza Neto e Feijó (2006), o ponto inicial da formulação cinemática da teoria multi-escala visa estabelecer uma deformação da macro-escala $\varepsilon(x, t)$ que dependa da média volumétrica da deformação da micro-escala, como descrito na Equação 1. E, a deformação na micro-escala pode ser definida assim como na Equação 2. Desse modo, a Equação 3 é equivalente à Equação 1. E, por fim, a tensão do macrocontínuo também pode ser calculada pelo mesmo conceito, como mostrado na Equação 4.

$$\varepsilon(x, t) = \frac{1}{V_\mu} \int_{\Omega_\mu} \varepsilon_\mu(y, t) dV \quad 1)$$

$$\varepsilon_\mu(y, t) = \nabla^s \mathbf{u}_\mu \quad 2)$$

$$\varepsilon(x, t) = \frac{1}{V_\mu} \int_{\Omega_\mu} \nabla^s \mathbf{u}_\mu dV \quad 3)$$

$$\sigma(x, t) = \frac{1}{V_\mu} \int_{\Omega_\mu} \sigma_\mu(y, t) dV \quad 4)$$

Em que:

$\varepsilon(x, t)$ = deformação no ponto x e instante arbitrário t da macro-escala;
 $\sigma(x, t)$ = tensão no ponto x e instante arbitrário t da macro-escala
 V_μ = volume na microescala;
 Ω_μ = domínio da microescala;
 $\varepsilon_\mu(y, t)$ = deformação na coordenada y e instante t da micro-escala;
 $\sigma_\mu(y, t)$ = tensão na microescala na coordenada y e instante t da micro-escala.

u_μ - campo de deformações microscópicas.

Por fim, o tensor constitutivo do material pode ser calculado pela razão entre a tensão e a deformação no macrocontínuo, assim como indicado na Equação 5. (SANTOS; PITUBA, 2017).

$$C^{ep}(x, t) = \frac{\partial \sigma(x, t)}{\partial \varepsilon(x, t)} = \frac{\frac{1}{V_\mu} \int_{\Omega_\mu} \sigma_\mu(y, t) dV}{\partial \varepsilon(x, t)} = \frac{\frac{1}{V_\mu} \int_{\Omega_\mu} \partial f_y(\varepsilon_\mu(y, t)) dV}{\partial \varepsilon(x, t)} \quad (5)$$

De modo que:

$C^{ep}(x, t)$ = módulo constitutivo tangente;

$\partial f_y(\varepsilon_\mu(y, t))$ = função constitutiva que depende das variáveis internas de acordo com o modelo constitutivo adotado.

2.2 Princípio da Macro – Homogeneidade de Hill – Mandel

O Princípio da Macro - Homogeneidade de Hill – Mandel é a regra fundamental dos modelos constitutivos da teoria multi-escala. Segundo Souza Neto e Feijó (2006), tal princípio é baseado em argumentos físicos e permite dizer que a potência das tensões macroscópicas deve ser equivalente à potência das tensões na micro-escala, assim como denotado nas Equação 6.

$$\sigma : \dot{\varepsilon} = \overline{\sigma_\mu} : \overline{\varepsilon_\mu} \quad (6)$$

Onde:

$\dot{\varepsilon}$ = taxa de deformação;

$\overline{\sigma_\mu}$ = tensor de tensão homogeneizado na microescala;

$\overline{\varepsilon_\mu}$ = tensor de deformação homogeneizado na microescala.

2.3 Campo de deslocamento e flutuação dos deslocamentos no EVR

Para facilitar a compreensão da decomposição do campo de deslocamentos basta observar a Figura 3. Assim, nota-se que para o ponto x do macrocontínuo há um deslocamento macroscópico denotado por $u(x, t)$. Pela teoria multi-escala, esse ponto está relacionado há um EVR na microescala, de modo que a parcela $\bar{u}_\mu(y, t)$ é o campo de deformações macroscópicas que varia linearmente com a coordenada y desse EVR. Assim, é possível reescrever a parcela $\bar{u}_\mu(y, t)$ como mostrado na Equação 7. Já a parcela $\tilde{u}_\mu(y, t)$ representa a flutuação dos deslocamentos no EVR. E, por fim $u_\mu(x, t)$ equipara-se ao deslocamento de corpo rígido que é regido pelo ponto do macrocontínuo. A decomposição do movimento de corpo rígido envolve todas as parcelas citadas e é mostrada na Equação 8. (SANTOS; PITUBA, 2017)

$$\bar{u}_\mu(y, t) = \varepsilon(x, t)y \quad (7)$$

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

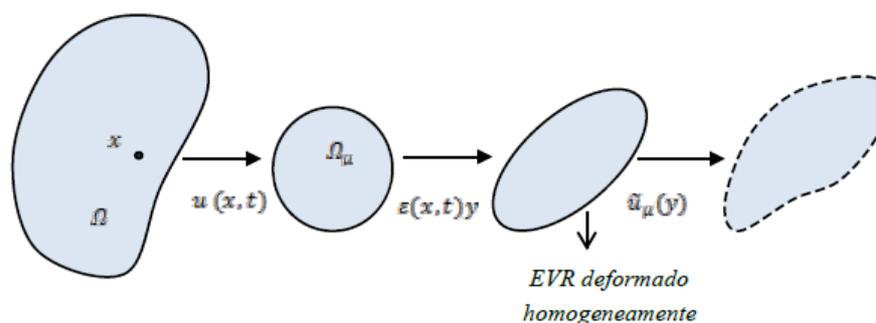


Figura 3. Decomposição dos campos de deslocamento da micro-escala (SANTOS *et al.*, 2016).

A decomposição da Equação 8 pode ser resumida assim como na Equação 9. Cabe ressaltar que o termo $\tilde{u}_\mu(y, t)$ será nulo caso a deformação do EVR seja homogênea. (SANTOS; PITUBA, 2017).

$$u_\mu(y, t) = \bar{u}_\mu(y, t) + \tilde{u}_\mu(y, t)$$

9)

2.4 Classificações dos modelos multi-escala

Os modelos multi-escala se diferem pela escolha do espaço das variações cinematicamente admissíveis. Os quatro modelos clássicos são os seguintes:

- **Modelo de Taylor ou deformação homogênea no EVR** – nesse modelo o espaço das variações cinematicamente admissíveis é nulo, ou seja, $\tilde{u}_\mu(y) = 0$. Por isso, tal modelo é considerado restritivo, gerando respostas rígidas. A deformação microscópica é homogênea e coincide com a deformação na macro-escala. Neste caso, a resposta constitutiva independe da coordenada y . A tensão associada a um ponto da macro-escala é a média ponderada da tensão induzida nas diversas fases sólidas do EVR, resultado conhecido como regra da mistura.

- **Modelo do deslocamento linear no contorno do EVR** – o deslocamento microscópico em torno do contorno do elemento varia linearmente com y . No entanto só a flutuação de deslocamentos no interior do EVR e não em seu contorno. Como esse modelo permite o cálculo da flutuação no interior do EVR, é mais flexível que o modelo de Taylor.

- **Modelo de flutuação periódica de deslocamento no contorno do EVR** – a distribuição periódica do EVR consiste que esse seja composto por N pares de conjuntos iguais. As formas mais comuns desse modelo são quadradas e hexagonais. Cada ponto y do contorno possui um ponto antissimétrico e a flutuação de um ponto y ocorre de maneira periódica. Como esse modelo possui flutuação no contorno do EVR, é mais flexível que o modelo de deslocamento linear. Por se adequar a microestruturas periódicas, ou seja, microestruturas que se repetem quando o macrocontínuo é refinado na sua malha dando maior representatividade à realidade do material, esse modelo foi adotado no presente trabalho.

- **Modelo de tração uniforme no contorno do EVR** – a tração externa no contorno do EVR é constante. Nesse caso, o campo de forças de corpo também é nulo.

3. Superfícies de plastificação

Na análise de estruturas caracteriza-se o comportamento do material e da estrutura diante uma sollicitação imposta. Um ponto importante de ser observado é a determinação da tensão máxima que pode acarretar a falha do material. Tal falha pode ocorrer devido ao escoamento ou pelo processo de formação de fraturas. O escoamento é comum em materiais dúcteis, os quais possuem um patamar de escoamento bem definido, gerando deformações residuais consideráveis.

A fim de avaliar a carga crítica que leva o material à falha, foram criados critérios de resistência que quantificam o limite de carga sem que haja processos dissipativos excessivos (SANTOS; PITUBA, 2017). Alguns dos critérios empregados são: Tresca, von Mises, Mohr-Coulomb e Drucker Prager. Como já dito anteriormente, neste trabalho será empregado o modelo de von Mises para representar o comportamento da matriz, por ser um material dúctil.

3.1 Modelo de von Mises

O modelo de von Mises é baseado na energia de distorção, que provoca mudança de forma no material. De acordo esse critério de falha, a estrutura do material estará em segurança se o volume de energia de distorção por unidade de volume for menor que a energia de distorção por unidade de volume necessária para provocar o escoamento. (SOUZA NETO *et al.*, 2008)

Von Mises assumiu que a plastificação ocorre a partir de uma tensão de cisalhamento octaédrica atingida. Conforme esse critério, a plastificação se inicia quando o invariante de tensão desviadora, indicado por J_2 , atinge um valor crítico. Tal condição é representada pela Equação 10. (SOUZA NETO *et al.*, 2008)

$$J_2 = R(\alpha) \quad (10)$$

Onde:

J_2 = invariante de tensão desviadora;

R = valor crítico em função de α ;

α = variável interna ligada a uma função de endurecimento.

O critério de von Mises estabelece que a energia de deformação elástica é dada pela soma da energia de deformação elástica armazenada de distorção coma energia de deformação elástica armazenada volumétrica, presente na Equação 11. A contribuição devido ψ_d^e a $e\psi_v^e$ são dadas pelas Equações 12 e 13, respectivamente.

$$\psi^e = \psi_d^e + \psi_v^e \quad (11)$$

$$\bar{\rho}\psi_d^e = \frac{1}{2G}s \quad (12)$$

$$\bar{\rho}\psi_v^e = \frac{1}{2K}p^2 \quad (13)$$

De modo que:

ψ^e = energia de deformação elástica;

ψ_d^e = energia de deformação elástica armazenada de distorção;

ψ_v^e = energia de deformação elástica armazenada volumétrica;

$\bar{\rho}$ = densidade volumétrica;

G = módulo de elasticidade transversal;

K = módulo volumétrico;

s = tensão desviadora;

p = pressão hidrostática.

Conforme Souza Neto *et al.*(2008), o regime plástico se inicia quando a energia de deformação elástica de distorção atinge um valor crítico, que corresponde ao expresso na Equação 14.

$$\frac{1}{G}R \quad (14)$$

Observou-se que até o momento a componente de pressão não participou da definição do critério. Assim, conclui-se que o critério de von Mises não é sensível a pressão. (SOUZA NETO *et al.*, 2008)

No caso de cisalhamento puro, a superfície de escoamento de von Mises, $\Phi(\sigma)$, pode ser definida de acordo com a Equação 15, na qual $\tau_y = \sqrt{R}$ é o limite cisalhante de tensão.

$$\Phi(\sigma) = \sqrt{J_2(s(\sigma))} - \tau_y \quad (15)$$

Considerando-se o caso de tensão uniaxial, a superfície de escoamento de von Mises pode ser representada conforme a Equação 16,

$$\Phi(\sigma) = \sqrt{3J_2(s(\sigma))} - \sigma_y, \quad (16)$$

onde $\sigma_y = \sqrt{3R}$ é o limite de escoamento da tensão uniaxial e a primeira parcela da subtração é denominada de q , tensão efetiva ou equivalente de von Mises. Assim, é possível estabelecer uma relação entre o limite de escoamento uniaxial e o cisalhante, como mostrado na Equação 17. E, por fim, a Equação 16 pode ser reescrita como na Equação 18.

$$\sigma_y = \sqrt{3}\tau_y \quad (17)$$

$$\Phi(\sigma) = q(\sigma) - \sigma_y \quad (18)$$

A superfície de escoamento do critério de von Mises, para quando a tensão efetiva é igual σ_y , é dada por um cilindro infinito, em que o eixo coincide com o eixo hidrostático, já que a pressão hidrostática tem efeito nulo sobre o critério, como representado pela Figura 4. (SOUZA NETO *et al.*, 2008)

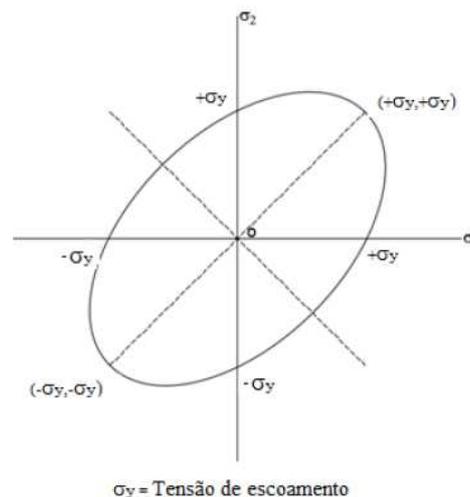


Figura 4. Critério de von Mises (ANDRADE, 2017).

4. Metodologia

Neste trabalho foram modelados Elementos de Volume Representativo com inclusão aderida à matriz considerando a porosidade da matriz. Variou-se a porcentagem de inclusão com relação ao tamanho da malha e também se incluiu vazios com a mesma porcentagem da inclusão. A distribuição de tais vazios foi feita de modo aleatório e simétrico.

A fim de analisar a efetividade de um material compósito com porosidade, adotou-se as mesmas porcentagens de vazios do trabalho de Santos e Pituba (2017), onde foi apenas considerada a matriz porosa sem a presença de inclusões. Na simulação do comportamento da matriz de aço empregou-se o modelo de von Mises com tensão de encruamento de 240 MPa considerando o comportamento elasto-plástico perfeito, módulo de elasticidade de 200 GPa e coeficiente de Poisson de 0,3. A inclusão inserida é de um material elástico erígido com módulo de 1100 GPa e coeficiente de Poisson de 0,25. Os elementos finitos do EVR são triangulares. O refinamento das malhas foi baseado em Santos e Pituba (2017). A partir de tais considerações, obtiveram-se os EVRs da Tabela 1 e das Figuras 5 a 9.

Tabela 1 -Configuração dos EVRs utilizados na simulação.

Porcentagem de vazios (%)	Distribuição	Nº de elementos	Nº de nós
2,5	Simétrica	2846	1541
	Aleatória	2848	1545
5	Simétrica	2682	1486
	Aleatória	2513	1379
7,5	Simétrica	2478	1368
	Aleatória	2562	1407
10	Simétrica	2616	1447
	Aleatória	2785	1543
12,5	Simétrica	2488	1391
	Aleatória	2734	1524

Fonte: Autoria própria (2019).

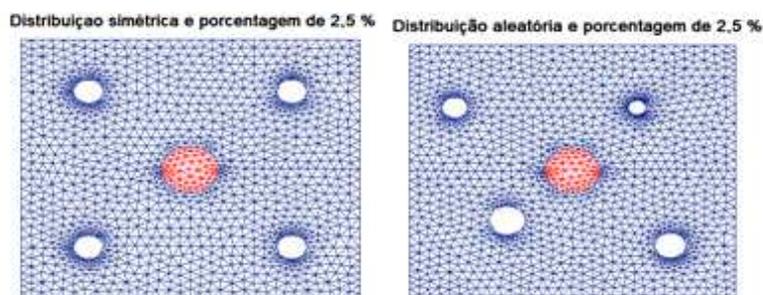


Figura 5. EVRs com 2,5 % de vazios distribuídos de forma simétrica e aleatória e inclusão de 2,5 %.

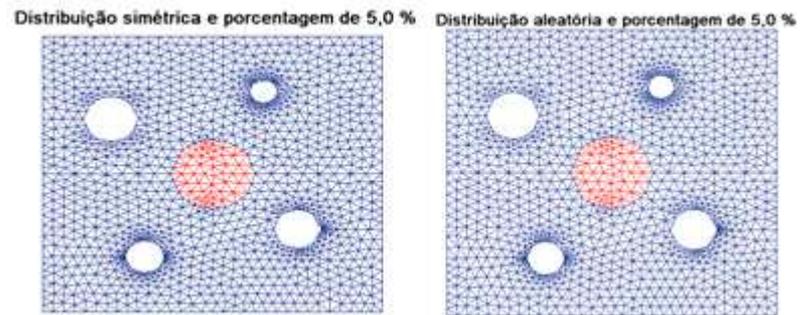


Figura 6. EVRs com 5,0 % de vazios distribuídos de forma simétrica e aleatória e inclusão de 5,0 %.

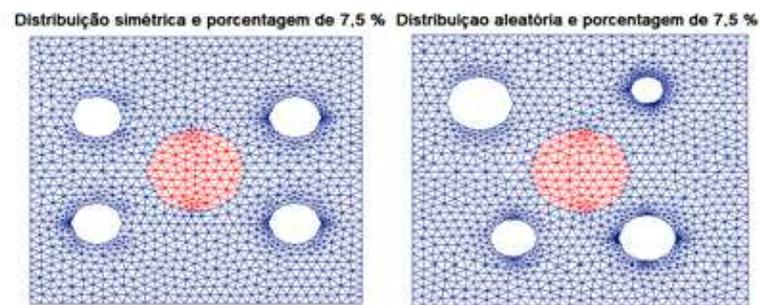


Figura 7. EVRs com 7,5 % de vazios distribuídos de forma simétrica e aleatória e inclusão de 7,5 %.

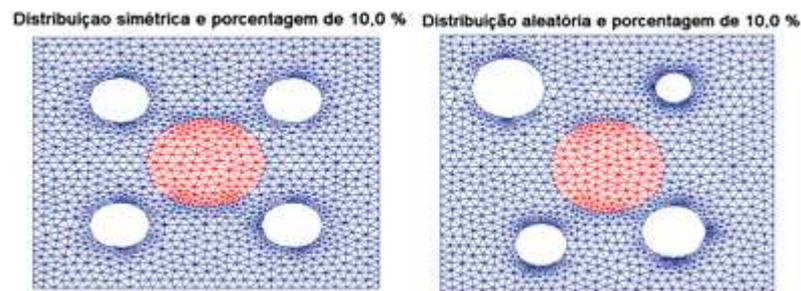


Figura 8. EVRs com 10,0 % de vazios distribuídos de forma simétrica e aleatória e inclusão de 10,0 %.

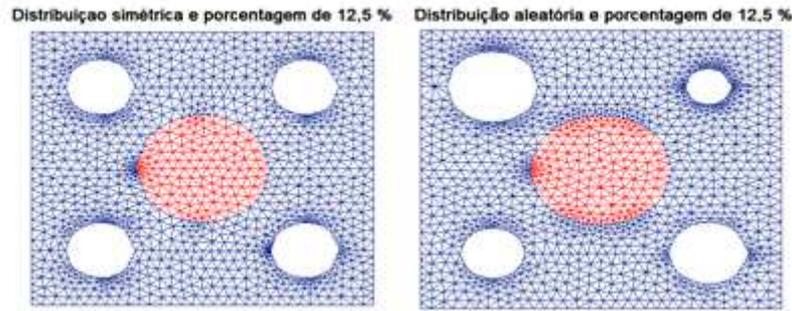


Figura 9. EVRs com 12,5 % de vazios distribuídos de forma simétrica e aleatória e inclusão de 12,5 %.

Para a obtenção dos gráficos de distribuição de tensão nos elementos finitos do EVR, empregou-se o código computacional MICROPLAST_v1.0 desenvolvido no ambiente MATLAB. Esse código computacional utiliza o método dos elementos finitos para a obtenção de um tensor de tensão homogeneizada para comportamento elasto-plástico para um EVR retangular sujeito a uma deformação aplicada na macro-escala. De posse dos valores de tensão nos EVRs, gráficos de p' e q' são construídos de modo a entender o comportamento mecânico das microestruturas sob condições de excitação de deformação. O termo p' representa a pressão de Von Mises normalizada pela tensão de escoamento do material e q' a tensão equivalente de Von Mises também normalizada pela tensão de escoamento.

Para a determinação das deformações na macro-escala embasou-se em Santos e Pituba (2017), em que as deformações são calculadas para fatores α , assim como na Equação 19.

$$\varepsilon = \frac{\alpha}{500} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} + \frac{\sqrt{1-\alpha^2}}{500} \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Onde:

ε = tensor de deformação;
 α = fator de carga.

Empregou-se os mesmos fatores de carga utilizados por Santos e Pituba (2017), os quais foram fatores expansivos de 0.1, 0.8 e 0.6, fatores compressivos de -1.0, -0.8 e -0.6 e fator distorcional de 0.0. Com base em tais fatores, calculou-se as deformações nas direções x e y e a deformação distorcional devido ao cisalhamento, que constam na Tabela 2.

Tabela1 - Deformações devido aos fatores de carga.

α	ε_x	ε_y	γ_{xy}
1	0,00141	0,00141	0,00000
0,8	0,00113	0,00113	0,00085
0,6	0,00085	0,00085	0,00113
-1	-0,0014	-0,0014	0,00000
-0,8	-0,0011	-0,0011	0,00085
-0,6	-0,0008	-0,0008	0,00113
0	0,0000	0,0000	0,00141

Fonte: Autoria própria (2019).

Tais deformações devido aos fatores α , juntamente com a ampliação da malha de elementos finitos, os arquivos de dados dos EVRs citados, modelo multi-escala e o número de incrementos são fatores estabelecidos no comando do código computacional MICROPLAST_v1.0. Esse código computacional foi desenvolvido por Souza Neto e colaboradores inicialmente em 2004 e vem sendo modificado por Pituba e colaboradores desde 2012. É válido ressaltar que o modelo multi-escala empregado foi o periódico, mesmo modelo aplicado em Santos e Pituba (2017).

Após a obtenção dos gráficos de p' e q' foram coletados os valores máximos de tais variáveis para todos os fatores α e para todos os tipos de EVR. A partir desses dados foram plotadas as superfícies de plastificação, com p' no eixo das ordenadas e q' no eixo das abscissas.

5. Resultados e discussões

Os resultados apresentados neste item se referem aos EVRs descritos na metodologia e as deformações macroscópicas da Tabela 2. Como resultado obteve-se gráficos de distribuição de tensão nas células dos elementos finitos do EVR e gráficos de p' e q' para todos os EVRs e fatores α . Devido a limitação de páginas serão apresentadas neste item apenas as superfícies de plastificação presentes nas Figuras 10 a 13 e os gráficos de distribuição de tensão normal nos EVRs apenas para fator 0.1, como pode ser notado na Figura 14.

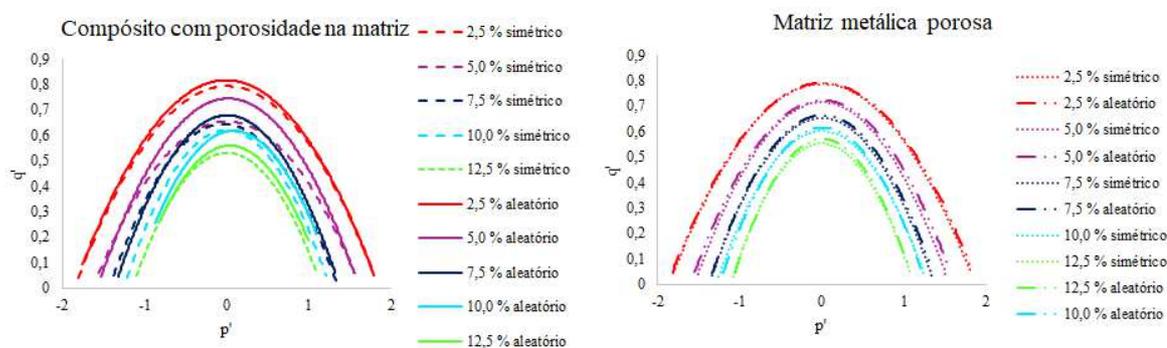


Figura 10. Superfície de plastificação para EVRs com matriz porosa e compósitos de matriz porosa considerando a inserção de inclusões.

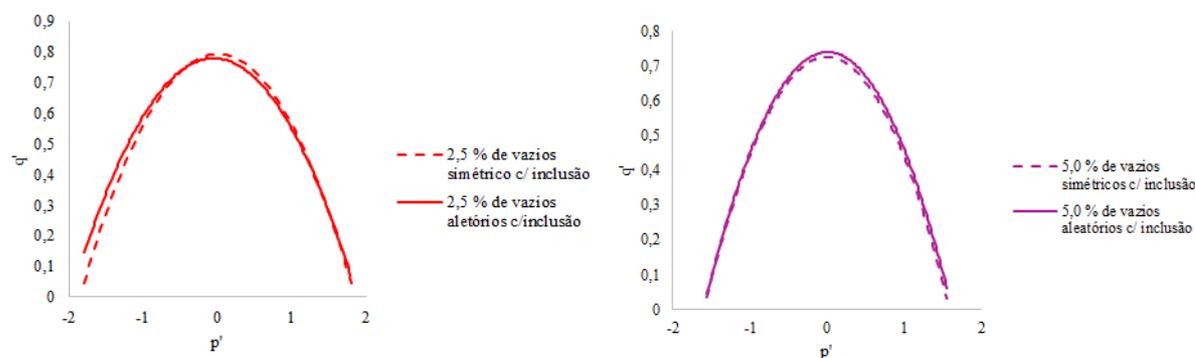


Figura 11. Superfície de plastificação para EVRs de compósitos com 2,5 % e 5,0 % de porosidade na matriz e com a inserção de inclusão de mesma porcentagem.

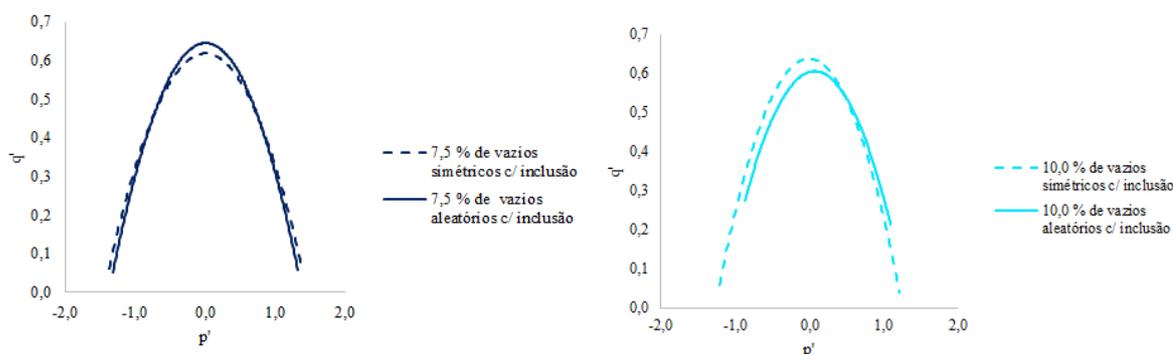


Figura 12. Superfície de plastificação para EVRs de compósitos com 7,5 % e 10,0 % de porosidade na matriz e com a inserção de inclusão de mesma porcentagem.

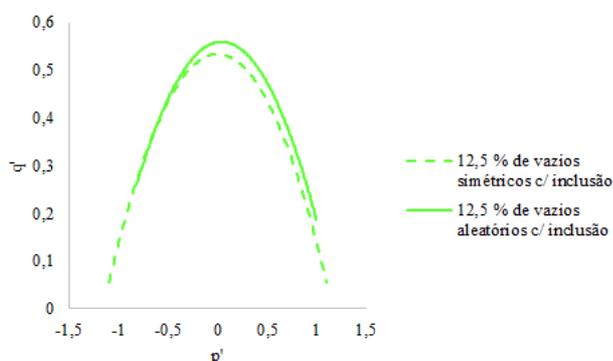


Figura 13. Superfície de plastificação para EVRs de compósito com 12,5 % de porosidade na matriz e com a inserção de inclusão de mesma porcentagem.

Ao analisar-se a Figura 10 nota-se que à medida que se aumenta a porcentagem de vazios na matriz obtém-se valores de p' e q' cada vez mais reduzidos, independentemente da presença ou ausência de inclusão. Isso se deve à perda elevada de seção do material e a consequente perda de resistência. À medida que as deformações aumentam esses vazios podem se conectar, fenômeno denominado de coalescência.

No entanto, ao comparar os EVRs com inclusão com os EVRs de Santos e Pituba (2017), que possuem apenas matriz porosa, percebe-se que a presença da inclusão proporcionou aumento na resistência do material, como esperado. Ressalta-se também que se obteve maior distinção entre as superfícies de plastificação de EVRs com distribuição simétrica e aleatória. Acredita-se que esse fenômeno é devido à presença da inclusão, de modo que os vazios ficaram mais próximos ao contorno do EVR, principalmente as proporções mais altas, dos que os presentes em Santos e Pituba(2017).

Para a porcentagem de 2,5 % de vazios e inclusão de 2,5 % há pouca diferença da plastificação quando se compara a distribuição de vazios. Essa configuração apresentou o melhor comportamento plástico, mostrando-se mais resistente que as demais, como pode ser notado na Figura 14 suportou tensões de até 400 MPa. Por outro lado, os EVRs com 5,0 % e 7,5 % de vazios notou-se maior discrepância dos resultados de acordo com a distribuição. A distribuição aleatória mostrou-se mais efetiva para essas configurações, como indicado nas Figuras 11 e 12.

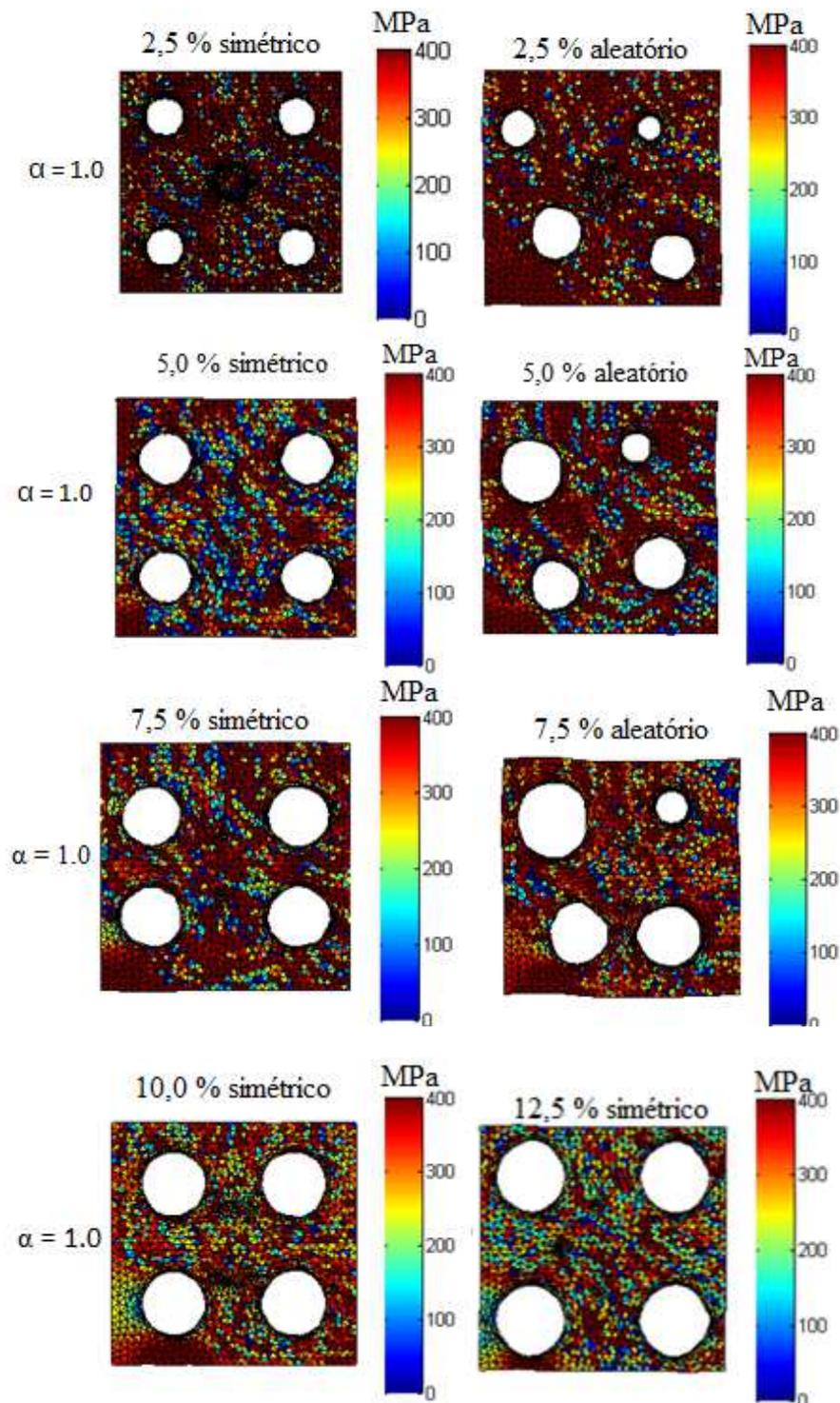


Figura 14. Gráfico de distribuição de tensão normal em x nos EVRs com fator expansivo de 1.0.

Em contrapartida, quando se eleva a porcentagem para 10,0 % e 12,5 % os resultados começaram a não convergir para fatores alfa compressivos e expansivos de 1.0 e 0.8 nas distribuições aleatórias. Supõe-se que isso se deva a maior proximidade dos vazios com o contorno do EVR e uns com os outros, devido aos grandes diâmetros, implicando em

coalescência e perda de resistência. Mesmo os com distribuição simétrica apresentaram menores níveis de tensão que as demais proporções, como pode ser notado na Figura 14.

Tendo em vista o exposto, percebe-se que o EVR mais resistente foi o com configuração de 2,5 % de vazios e inclusão, com ambas distribuições, seguido de 7,5 % e 5,0 % de distribuição aleatória e posteriormente de distribuição simétrica. No trabalho de Santos e Pituba (2017) os resultados mostraram que o tipo de distribuição influencia na resistência do material, sendo que em seu estudo a distribuição aleatória mostrou-se mais resistente.

Neste trabalho, percebe-se que para porcentagens de vazio altas, a resistência pode ser reduzida. Dessa forma, pressupõe-se que das configurações estudadas as com melhor desempenho estrutural são as de 2,5 %, 5,0 % e 7,5 % de vazios, com distribuição aleatória. Entretanto, é necessário estudar o descolamento de fase entre a matriz e o reforço, o que pode causar perda de resistência no material (AZIZI, 2012), sendo, portanto, uma linha a ser investigada em trabalhos futuros.

6. Conclusões

Os compósitos de matriz metálica possuem grande relevância econômica para diversos ramos da indústria devido a suas boas propriedades mecânicas, assim como os metais porosos. A junção dessas configurações poderia gerar um material com propriedades únicas e talvez superiores do que separadamente. No entanto, esses materiais podem ter sua integridade estrutural comprometida pela coalescência e nucleação de vazios, bem como pelo descolamento de fase e danificação na zona de interface reforço/matriz.

Desse modo, nota-se que o estudo das possibilidades de falha do material é importante tanto do ponto de vista econômico, como estrutural. Neste trabalho tal estudo foi realizado empregando a modelagem na micro-escala e técnicas para obtenção respostas homogeneizadas. Essa proposta de modelagem é pouco estudada no Brasil e bastante atual, o que indica a importância do estudo.

Tendo em vista as configurações de EVRs estudadas, notou-se que os EVRs com 2,5 %, 5,0 % e 7,5 % obtiveram superfícies de plastificação superiores que as obtidas por Santos e Pituba (2017), que abordou somente a matriz metálica com a presença de poros. Assim como em Santos e Pituba (2017), notou-se que a distribuição influencia na resistência do material, de modo que a aleatória proporciona melhores propriedades mecânicas do que a simétrica. Entretanto, para altas porcentagem de vazio e presença de inclusão tal resultado não se mantém.

Como neste estudo não foi possível a consideração do descolamento entre as fases devido ao tempo de execução, sugere-se para próximos trabalhos tal abordagem. Desse modo será possível avaliar se a inclusão melhora efetivamente a resistência da matriz metálica porosa. Após tais análises pode-se obter também a variável de dano do compósito com matriz porosa e compará-la a danificação de um compósito somente com inclusão de mesma porcentagem. Assim, será possível acompanhar as várias configurações das microestruturas dos compósitos até sua falha, como, compósito com matriz metálica porosa e somente metal poroso.

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

ANDRADE, P. V. Q. Estudo do comportamento mecânico de microestruturas de materiais compósitos de matriz metálica. 2017. f. 111. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2017.

AZIZI, R. Micromechanical modeling of damage in periodic composites using strain gradient plasticity. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 92, p. 101–113, 1 set. 2012.

GIUSTI, S. M. Análise de sensibilidade topológica em modelos constitutivos multi-escalas. Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional. Petrópolis, 2009.

PITUBA, J. J. C.; SOUZA NETO, E. A., Modeling of unilateral effect in brittle materials by a mesoscopic scale approach, **Computers and Concrete**, v. 15, p. 1–25, maio 2015.

PITUBA, J. J. C., A damage model formulation: unilateral effect and RC structures analysis, **Computers and Concrete**, v. 15, n. 5, p. 735-758, maio 2015.

QIN, J.; QUING, C.; YANG, C.; HUANG, Y. Research process on property and application of metal porous materials. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 654, p. 39–44, 5 jan. 2016.

REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros**, v. 10, n. 2, p. e4–e10, jun. 2000.

SANTOS, W. F.; FERNANDES, G. R.; PITUBA J.J.C. Analysis of the influence of plasticity and fracture processes on the mechanical behavior of Metal Matrix Composites microstructures. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, n. 3, p. 577–598, set. 2016.

SANTOS, W. F.; PITUBA, J. J. C., Yield surfaces of material composed of porous and heterogeneous microstructures considering phase debonding, **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 14, p. 1387-1415, 2017.

SOUZA NETO, E. A.; FEIJÓO, R. A. Variational Foundations of Multi-Scale Constitutive Models of Solid: Small and Large Strain Kinematical Formulation. **Technical Report n. 16/2006**, Laboratório Nacional de Computação Científica LNCC/MCT, Petrópolis, Brasil, 2006.

SOUZA NETO, E. A.; PERIÉ, D.; OWEN, D. R. J. **Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications**. Swensea: Wiley, 2008.

UTSUNOMIYA, H.; MATSUMOTO, R. **Deformation Processes of Porous Metals and Metallic Foams (Review)** - **ScienceDirect**. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211812814009791>. Acesso em: 25 mar. 2019.

VENTURA, A. M. F. M. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 21, n. 3–4, p. 10–19, jul. 2009.

WEI, B; ROY, A; SUN, R.; SILBERSCHMIDT, V. V. Enhanced machinability of SiC-reinforced metal-matrix composite with hybrid turning. **Journal of Materials Processing Tech.** 268, p. 149 – 161, 2019.