

INFLUENCE OF VOID DISTRIBUTION ON YIELD SURFACES OF POROUS DUCTILE MATERIALS

Wanderson Ferreira dos Santos

José Julio de Cerqueira Pituba

wandeson.ufgengcivil@gmail.com

julio_pituba@ufg.br

Laboratory of Computational Modeling, Civil Engineering Department, Engineering School, Federal University of Goiás – Catalão Campus

Abstract. This work deals with numerical simulation of the mechanical behavior of materials composed of heterogeneous ductile microstructures in presence of voids using a multi-scale approach considering plasticity processes. This kind of material has been used in several applications as structural solutions. Therefore, studies about yield surfaces of porous ductile materials are essentials to understanding its mechanical behavior for safety reasons. The numerical modeling is performed in microstructures using the concept of RVE (Representative Volume Element) considering the matrix as considered an ideally plastic material governed by von Mises model with isotropic hardening. Different distributions of voids are analyzed in order to investigate its influence on the proposed yield surfaces. In general way, the RVEs containing concentrated void present yield surfaces with lower values when compared to the other cases therefore the concentration of voids in the RVE decreases its mechanical strength. On the other hand, the RVEs containing random distributions of voids present yield surfaces with high values and RVEs containing symmetric distributions of voids present yield surfaces with intermediate values.

Keywords: RVE homogenization, yield surface, metal matrix composites, voids.

1- Introdução

Com o desenvolvimento tecnológico e o aumento da capacidade de processamento dos computadores, cada vez mais ganha espaço a utilização da Modelagem Computacional para a determinação do comportamento dos materiais. De acordo com Vorel, Šmilauer e Bittnar [1], isso ocorre porque as simulações computacionais - com um conjunto integrado de modelos, algoritmos e procedimentos de análise - são atraentes para a previsão das propriedades mecânicas dos materiais em diversos casos. Nesse sentido, em diversos problemas da Engenharia e Ciência dos Materiais são utilizadas simulações numéricas para obtenção de resultados. Isso ocorre principalmente em situações com maior complexidade, nas quais é difícil a obtenção de soluções analíticas. Nesses casos as simulações numéricas são atraentes e, apesar de gerar respostas aproximadas, podem gerar resultados satisfatórios e próximos da realidade.

Em relação à modelagem do comportamento dos materiais, ao longo do tempo duas abordagens distintas foram seguidas: 1) Macroscópica, baseada em hipóteses fenomenológicas e em considerações da Mecânica do Contínuo; e 2) Micromecânica, considerando informações exclusivas da microestrutura do material (Reis [2]). As abordagens macroscópicas, apesar de terem contribuído com resultados muito importantes, parecem estar próxima dos seus limites de aplicação. Isso fica evidente no estudo de materiais com maior complexidade, como no caso dos meios com estrutura heterogênea. Um dos principais problemas compreende a dificuldade de contemplar com modelos diretamente aplicados na macroescala fenômenos de dissipação e/ou ganho de energia que ocorrem no nível microestrutural, o que geralmente requer formulações complicadas e com um grande número de variáveis a ser encontrado (Karamnejad, Nguyen e Sluys [3]). Já as abordagens voltadas para a micromecânica inicialmente foram desenvolvidas com formulações baseadas em soluções analíticas e semi-analíticas, o que muitas vezes não cobre uma ampla gama de aplicações práticas.

Em meio a essa questão, nas últimas décadas surgiram as teorias multiescala, um assunto de crescente interesse devido a capacidade de promover respostas mais precisas em relação ao comportamento dos materiais (Oliver, Caicedo, Roubin, Huespe e Hernandez [4]). De modo geral, as teorias multiescala relacionam conhecimentos de diferentes escalas na obtenção da resposta do material e as escalas inferiores fornecem informações importantes nesse processo (Santos, Fernandes e Pituba [5]). O foco inicial é voltado para o entendimento sobre os mecanismos físicos que se desenvolvem na microestrutura do material e, posteriormente, as informações adquiridas são utilizadas para a obtenção de respostas do seu comportamento macroscópico. Neste trabalho, a microestrutura do material é modelada através do conceito de Elemento de Volume Representativo (EVR), o qual leva em consideração aspectos relacionados com a heterogeneidade do material. Com o emprego de métodos multiescala, podem ser analisadas características referentes ao nível microestrutural do material como tamanho, forma, distribuição espacial, fração de volume e propriedades dos constituintes individuais na análise de seu comportamento macroscópico, o que seria difícil de contemplar com simulações numéricas diretas na macroescala (Nguyen, Stroeven e Sluys [6]). Por fim, a resposta constitutiva macroscópica pode ser obtida aplicando técnicas de homogeneização.

Uma área que apresenta aplicação das teorias multiescala para meios heterogêneos compreende a proposta e estudo de critérios de início e evolução do processo de plastificação em meios heterogêneos porosos com comportamento dúctil. Esta classe de materiais apresenta uma estrutura mais complexa e ainda são necessários maiores estudos a fim de obter resultados mais consistentes de seu comportamento. No decorrer do tempo foram desenvolvidos alguns trabalhos relacionados com superfícies de plastificação de meios heterogêneos voltados para meios porosos, incluindo algumas publicações recentes no âmbito da modelagem multiescala que mostram o despertar da comunidade científica para essa questão. Para meios dúcteis com poros, a superfície de plastificação proposta por Gurson [7] ficou bastante conhecida na literatura. Posteriormente, outros estudos foram realizados e promoveram ajustes no modelo de Gurson [7], merecendo destaque Tvegaard [8], Tvegaard e Needleman [9], Koplik e Needleman [10], que propuseram modificações relacionadas com o critério de plastificação a fim de melhor descrever aspectos como nucleação, crescimento e coalescência de vazios, entre outros. Inclusive, os diversos estudos de Tvegaard e Needleman sobre o modelo de Gurson [7] levaram ao modelo frequentemente referenciado como modelo Gurson–Tvegaard–Needleman (GTN).

O assunto foi retomado recentemente com Giusti, Blanco, de Souza Neto e Feijóo [11], que utilizou uma abordagem multiescala para a obtenção de resultados considerando diferentes proporções de vazios e, inclusive, realizou comparações com os resultados de Gurson [7]. Outra publicação recente consiste no estudo realizado por Santos e Pituba [12], que estudaram dentro de uma abordagem multiescala a análise de superfícies de plastificação de microestruturas de materiais metálicos dúcteis porosos considerando o efeito da distribuição de vazios para duas frações de volume (5% de vazios e 10% de vazios).

Mais especificamente, o presente trabalho visa dar continuidade ao trabalho de Santos e Pituba [12], onde aqui as ações são voltadas para a obtenção de superfícies de plastificação de microestruturas de materiais dúcteis porosos considerando diferentes proporções de vazios (2.5%; 5%; 7.5%; 10%; e 12.5%) e a influência da forma de sua distribuição na matriz metálica (vazio centrado; vazios distribuídos de forma aleatória; e vazios distribuídos de forma simétrica). Deste modo, é estudada uma maior gama de exemplos em relação ao mostrado em Santos e Pituba [12], além da comparação adicional de EVRs com vazios distribuídos de forma simétrica na matriz.

2- Modelo 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, Pituba e de Souza Neto [13] 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 volumetria 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, Fernandes e Pituba [5].

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 , além de vazios (Ω_μ^v). 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.

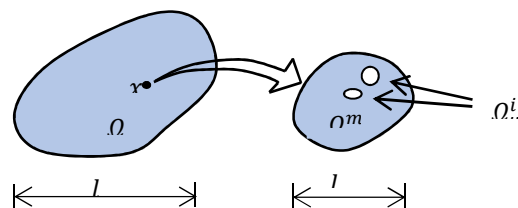


Figura 1 - Análise multi-escala considerando duas escalas: macroescala e microescala.

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 Eq. (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.

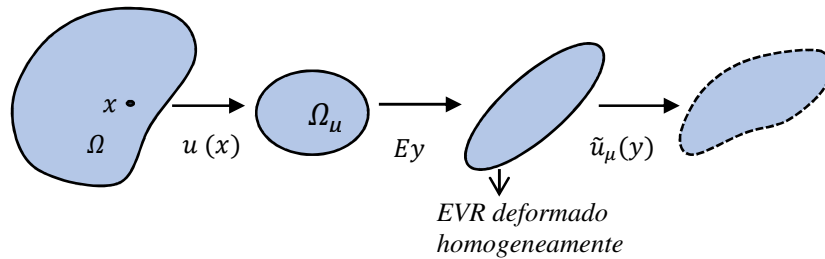


Figura 2. Decomposição dos campos de deslocamento microscópico.

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.

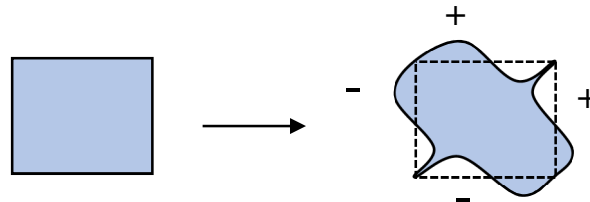


Figura 3. Modelo de Flutuação Periódica no contorno do EVR.

3- Modelagem constitutiva dos EVRs

O procedimento utilizado na modelagem dos EVRs consistiu numa discretização baseada no Método dos Elementos Finitos. Em linhas gerais, no MEF o meio contínuo é discretizado em elementos finitos, ou seja, é dividido em subdomínios. Por sua vez, cada elemento finito possui pontos de integração ou pontos de Gauss. Com a resolução de uma série de equações matemáticas, o referido método permite a simulação do comportamento global do meio contínuo com a obtenção dos campos de interesse (deslocamentos, deformações, tensões, esforços internos, etc.). Vale ressaltar que a solução obtida é aproximada, pois a formulação envolve aproximações em nível de subdomínios.

Para simular o comportamento da matriz foram utilizados conceitos da Teoria da Plasticidade a fim de descrever como ocorre o processo de deformações irreversíveis na microestrutura do material. Dessa forma, a matriz é formada por elementos finitos triangulares com comportamento condicionado por um modelo de plasticidade, no caso o modelo de von Mises. Em todo o processo foram utilizados códigos computacionais baseados num procedimento incremental e iterativo para a obtenção dos resultados. Todas as simulações foram realizadas considerando o modelo multiescala de Flutuação Periódica.

Conforme já apresentado, o objetivo é avaliar a influência da distribuição de vazios na microestrutura de materiais metálicos. Nesse contexto, inicialmente foi simulado o EVR com matriz homogênea (Fig. 4), isto é, sem a presença de vazios. Para avaliar o comportamento das microestruturas em relação à distribuição de vazios, foram analisadas as seguintes configurações de EVRs: EVR com vazio centrado; EVR com quatro vazios de frações distintas e dispersas de forma aleatória na matriz; EVR com quatro vazios idênticos distribuídos de forma aleatória na matriz. Em relação às frações em volume de vazios, foram realizadas análises de EVRs com 2.5% vazios (Fig. 5), 5% vazios (Fig. 6); 7.5% vazios (Fig. 7); 10% vazios (Fig. 8) e 12.5% vazios (Fig. 9).

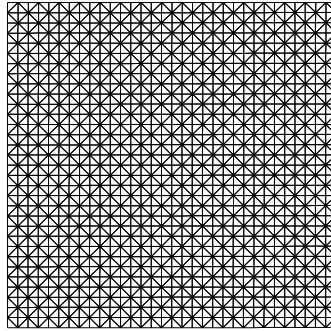


Figura 4 - EVR com matriz homogênea.

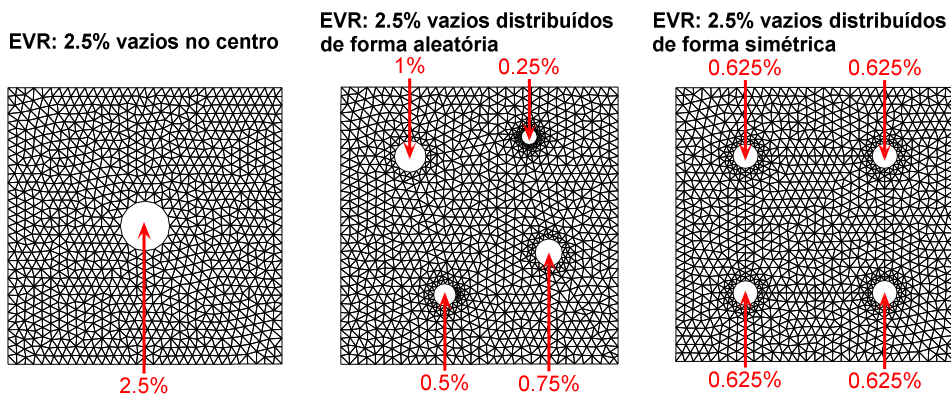


Figura 5 - Configurações de EVRs com fração em volume de 2.5% de vazios.

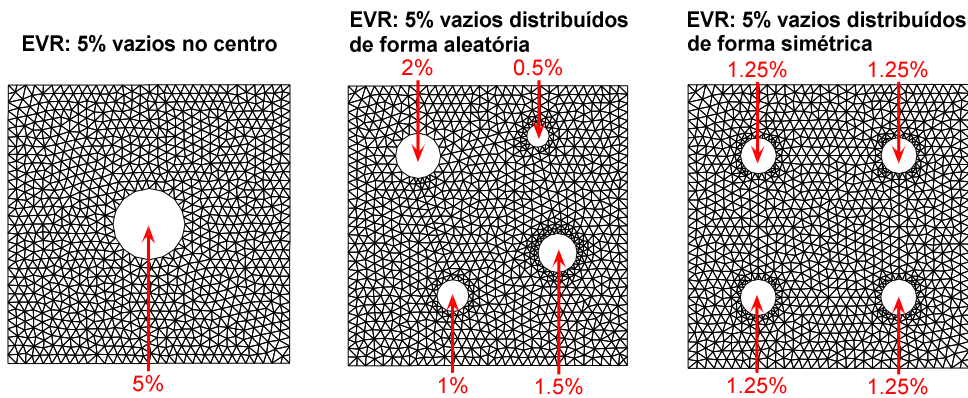


Figura 6 - Configurações de EVRs com fração em volume de 5% de vazios.

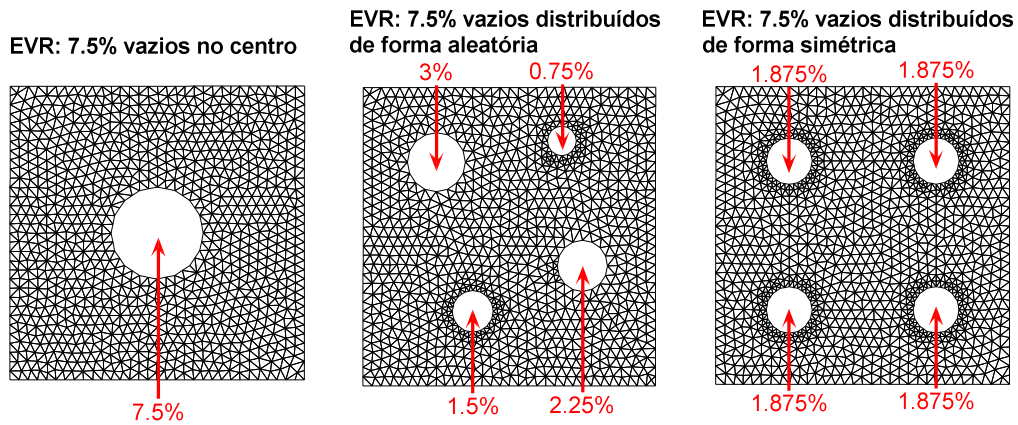


Figura 7 - Configurações de EVRs com fração em volume de 7.5% de vazios.

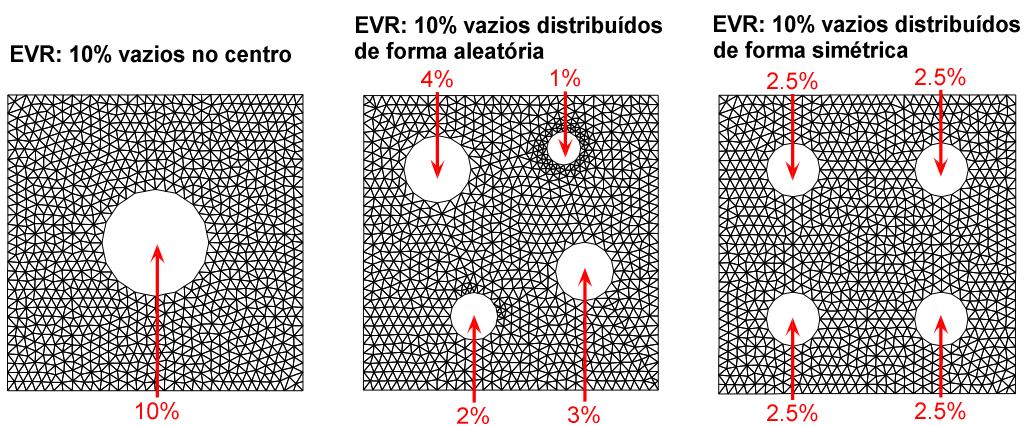


Figura 8 - Configurações de EVRs com fração em volume de 10% de vazios.

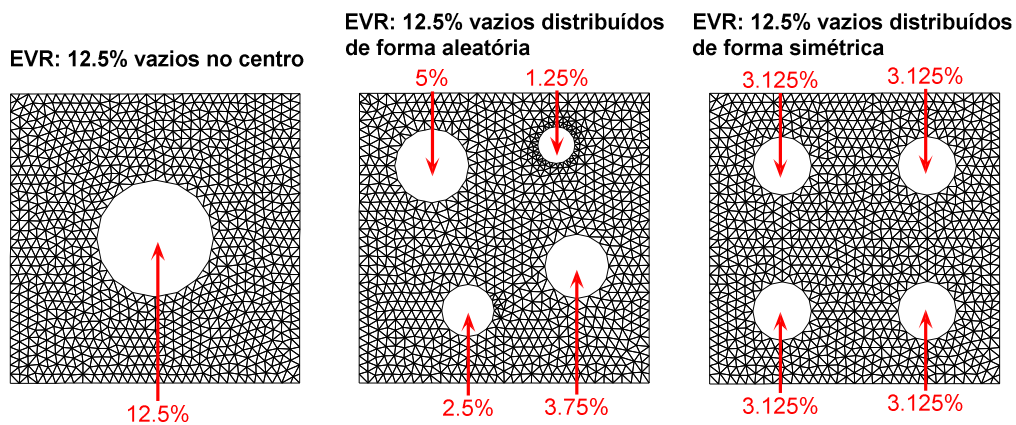


Figura 9- Configurações de EVRs com fração em volume de 12.5% de vazios.

As malhas apresentadas foram geradas a partir de um código computacional, cujo grau de refinamento é dado por meio de um fator β . Maiores valores de β implicam em malhas mais grosseiras, enquanto que menores valores de β geram malhas mais refinadas. Por assim dizer, β é o tamanho padrão máximo contido na malha de elementos finitos. Diante disso, optou-se por utilizar o mesmo fator ($\beta = 0.4$) para gerar todas as malhas a fim de evitar a interferência nos resultados decorrente de malhas com diferentes níveis de discretização. Maiores detalhes das malhas, incluindo número de elementos e número de nós, são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 - Características das malhas em elementos finitos de todos EVRs analisados.

Proporção de vazios	Distribuição de vazios	Nº de elementos	Nº de nós
0%	Sem vazios	2048	1089
	Vazio centrado	1952	1048
2.5%	Distribuição aleatória	2261	1229
	Distribuição simétrica	2278	1232
5%	Vazio centrado	1908	1034
	Distribuição aleatória	2117	1161
	Distribuição simétrica	2186	1218
7.5%	Vazio centrado	1846	1003
	Distribuição aleatória	2027	1116
	Distribuição simétrica	2366	1308
10%	Vazio centrado	1800	980
	Distribuição aleatória	1922	1057
	Distribuição simétrica	1796	991
12.5%	Vazio centrado	1764	962
	Distribuição aleatória	1841	1031
	Distribuição simétrica	1800	993

3.1- Componentes das superfícies de plastificação e deformações aplicadas

Inicialmente, procurou-se estudar o comportamento em separado da pressão (p) relacionada à parte hidrostática do tensor de tensões e da tensão efetiva de von Mises (q). Considerando o espaço $q' - p'$, normalizado em relação à tensão de escoamento σ_0 , foram obtidas as superfícies a partir da Eq. (11) e da Eq. (12).

$$q' = \frac{1}{\sigma_y} \sqrt{\frac{3}{2} \left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \right)^2 + 2\tau_{xy}^2 \right]} \quad (11)$$

$$p' = \frac{1}{\sigma_y} \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) \quad (12)$$

em que

- σ_x representa a tensão na direção x ;
- σ_y representa a tensão normal na direção y ;
- τ_{xy} consiste na tensão de cisalhamento.

Mais especificamente, foram plotados gráficos com q' e p' versus a relação entre o número do incremento e o somatório dos incrementos para cada EVR, assim como o realizado em Santos e Pituba [12]. Posteriormente, foi obtida uma superfície de plastificação final considerando os máximos valores de q' e p' .

Outras considerações e parâmetros apresentados a seguir foram estabelecidos a partir de Giusti, Blanco, de Souza Neto e Feijóo [11]. As simulações foram realizadas considerando o estado plano de deformação. Para a matriz foi empregado o modelo de von Mises com comportamento elasto-plástico perfeito, cuja tensão de escoamento correspondeu a $\sigma_0 = 240$ MPa. Ainda sobre a matriz, utilizou-se o módulo de elasticidade $E = 200$ GPa e coeficiente de Poisson $\nu = 0.3$.

No que concerne à deformação aplicada ao EVR, adotou-se a Eq. (13).

$$\varepsilon = \frac{\alpha}{500} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} + \frac{\sqrt{1-\alpha^2}}{500} \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

em que

α é um fator de carga que varia entre -1.0 e 1.0.

Valores de α mais próximos de -1.0 e 1.0 implicam em maiores deformações normais ε_x e ε_y (maiores valores de p'). Já os valores de α próximos de 0 resultam em maiores deformações distorcionais γ_{xy} (maiores valores de q'). Esta relação é baseada no trabalho de Giusti, Blanco, de Souza Neto e Feijóo [11], sendo que no presente trabalho foi realizada uma redução no valor da deformação. Isso foi necessário para verificar a convergência dos resultados nas microestruturas com vazios distribuídos, pois deformações superiores acarretavam um colapso plástico prematuro da matriz. Para as análises de q' e p' em separado, foram utilizados fatores expansivos ($\alpha = 1.0$, $\alpha = 0.8$, $\alpha = 0.6$), fatores compressivos ($\alpha = -1.0$, $\alpha = -0.8$ e $\alpha = -0.6$) e a situação com $\alpha = 0$. Para a obtenção das superfícies finais, também foram simulados outros fatores de carga dentro do intervalo entre $\alpha = 1.0$ e $\alpha = -1.0$.

4- Resultados da influência da distribuição de vazios nas microestruturas

Neste segundo momento, são mostrados os resultados comparativos entre cada configuração de EVRs (EVR com vazio centrado; EVR com quatro vazios de frações distintas e dispersas de forma aleatória na matriz; EVR com quatro vazios idênticos distribuídos de forma aleatória na matriz) para cada proporção de vazios: 1) 2.5% de vazios; 2) 5% de vazios; 3) 7.5% de vazios; 4) 10% de vazios; e 5) 12.5% de vazios. Nestas análises, também são abordadas as distribuições de tensão normal e de cisalhamento nos EVRs.

Em relação aos fatores de cargas $\alpha = 0$, $\alpha = 1.0$ e $\alpha = -1.0$, são realizadas algumas considerações iniciais. A componente p' está relacionada com a parte hidrostática e, portanto, é mais sensível a deformações normais aplicadas. Com isso, o caso com $\alpha = 0$, em que não existe deformação normal aplicada, gera valores muito pequenos de p' . Isso gera uma perturbação nos resultados que diferem consideravelmente dos demais casos. Em relação à componente q' , por sua vez associada à parte desviadora, destaca-se sua maior sensibilidade em relação a deformações distorcionais. Dessa forma, nos casos de fatores de carga com $\alpha = 1.0$ e $\alpha = -1.0$, situações com deformação distorcional aplicada nula, a componente q' apresenta valores pequenos. Portanto, nestas situações possivelmente ocorreu uma perturbação nos resultados q' , o que gerou valores destoantes dos demais fatores de carga α .

Na Fig. 10 são apresentadas as respostas das análises referentes às componentes q' e p' em separado para fatores de carga expansivos correspondentes a $\alpha = 1.0$, $\alpha = 0.8$, $\alpha = 0.6$ e para $\alpha = 0.0$. Na Fig. 11 são mostradas as distribuições de tensões normais em x (σ_x) nos EVRs com 2,5% de vazios e a Fig. 12 ilustra a distribuição de tensões de cisalhamento (τ_{xy}), em todos os casos para estes fatores de cargas expansivos.

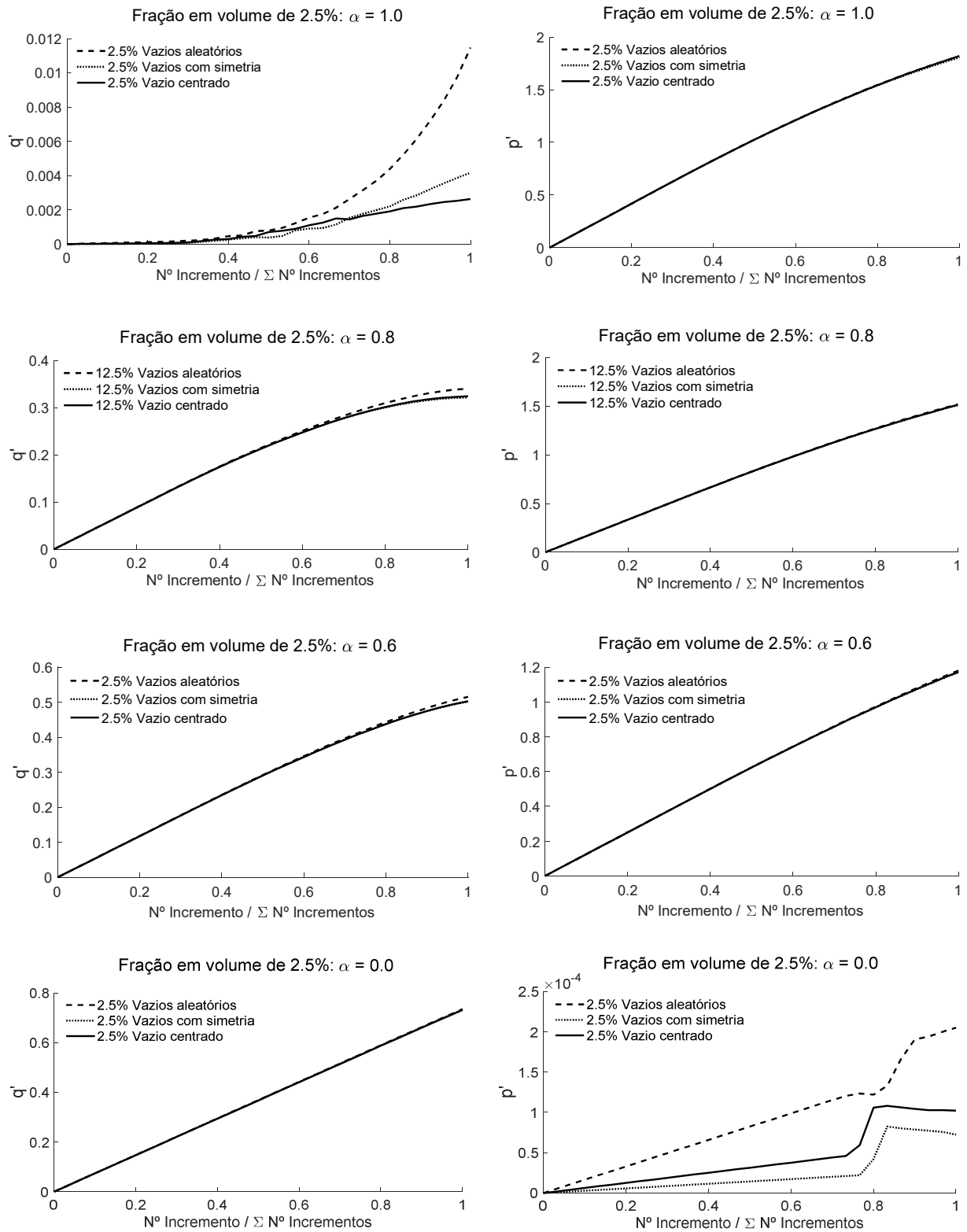


Figura 10 - Gráficos das componentes q' e p' para EVRs com 2.5% de vazios considerando fatores de carga expansivos ($\alpha = 1.0$, $\alpha = 0.8$ e $\alpha = 0.6$) e $\alpha = 0.0$.

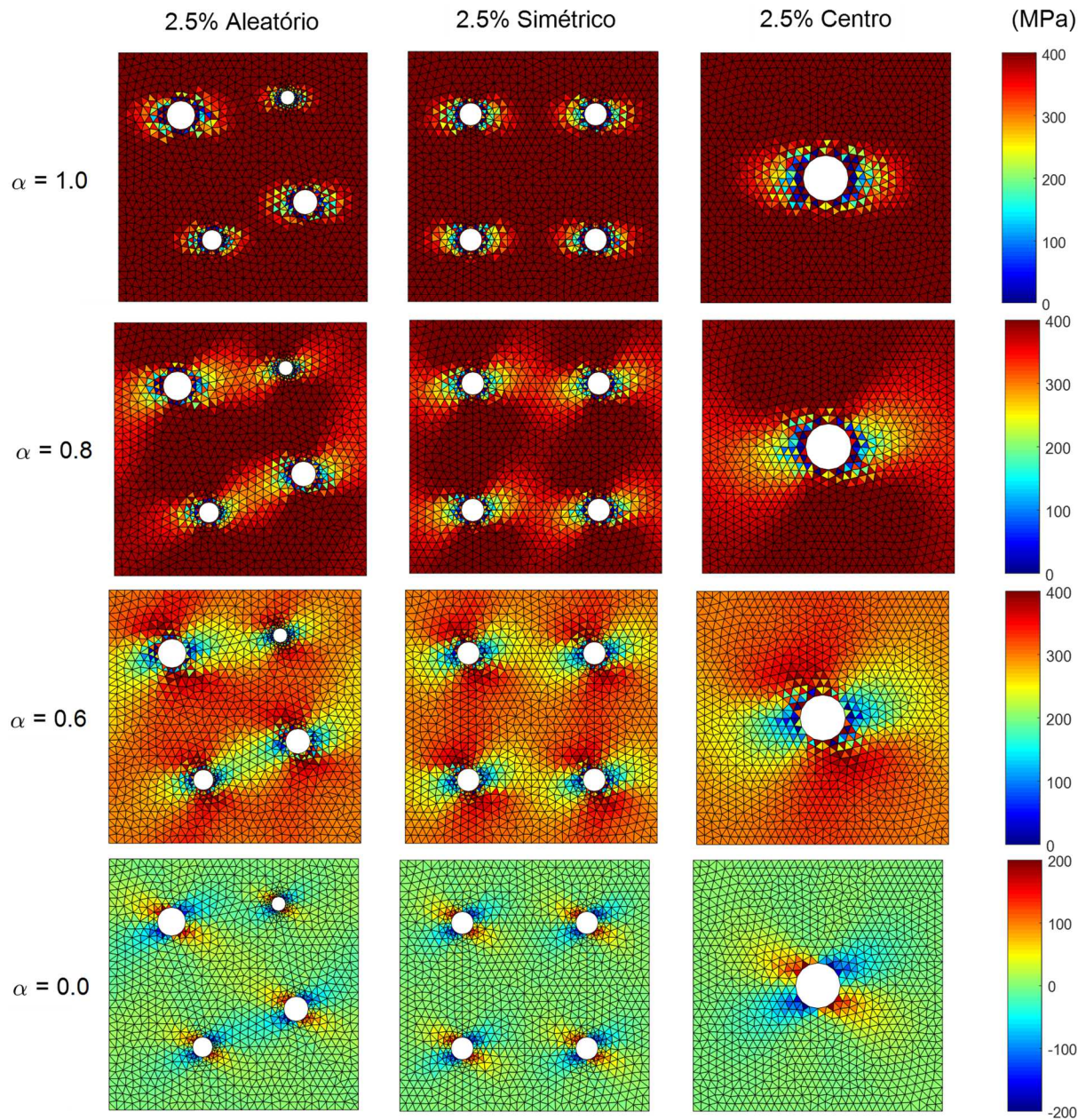


Figura 11 - Distribuição de tensões nos EVRs com 2.5% vazios considerando a tensão normal na direção x (σ_x) para fatores de carga expansivos $\alpha = 1.0$, $\alpha = 0.8$, $\alpha = 0.6$ e $\alpha = 0$.

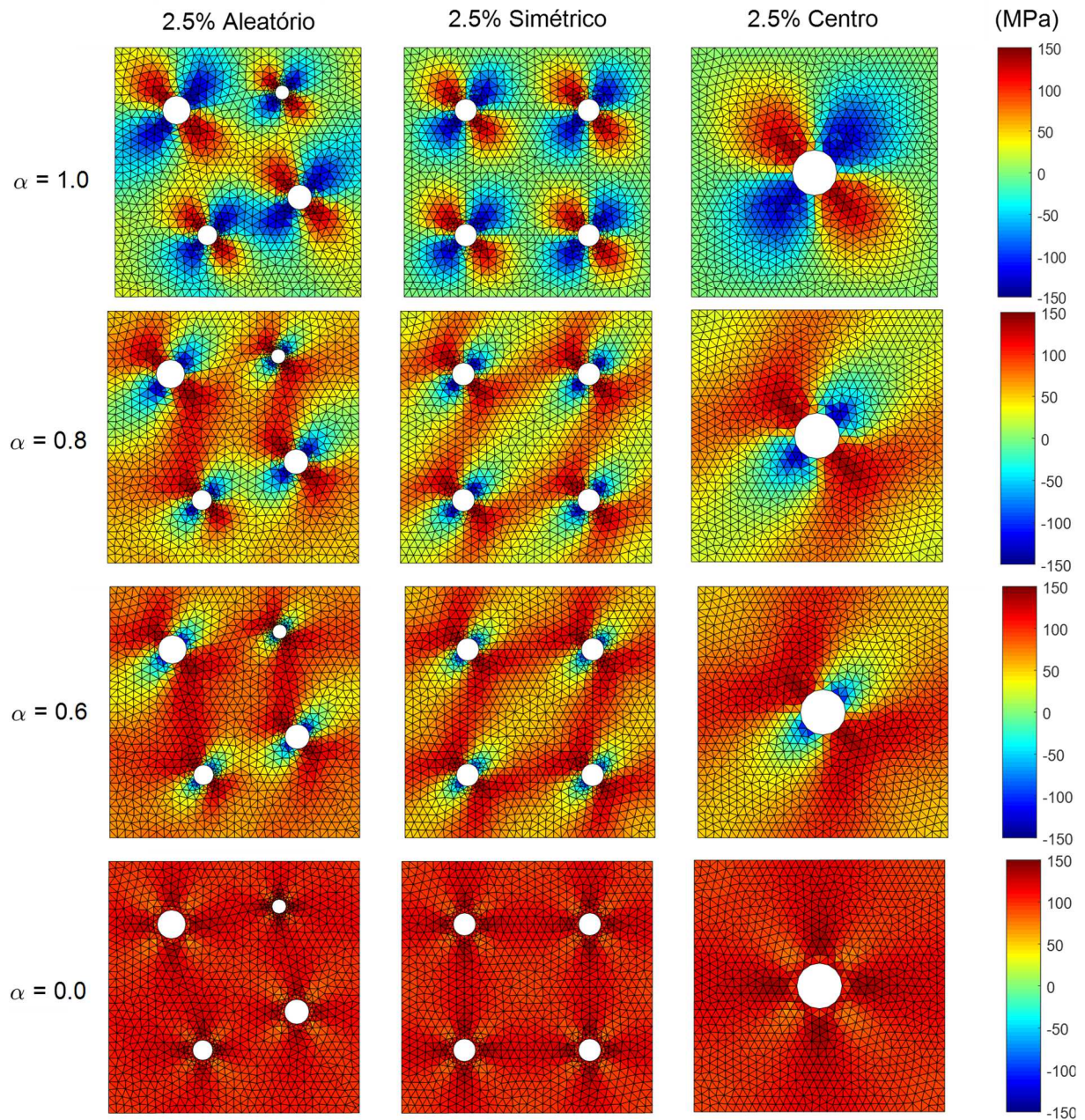


Figura 12 - Distribuição de tensões nos EVRs com 2.5% de vazios considerando a tensão de cisalhamento (τ_{xy}) para fatores de carga expansivos $\alpha = 1.0$, $\alpha = 0.8$, $\alpha = 0.6$ e $\alpha = 0$.

Por outro lado, na Fig. 13 são mostradas as respostas para fatores de carga compressivos correspondentes a $\alpha = -1.0$, $\alpha = -0.8$ e $\alpha = -0.6$. Também nas Figs. 14 e 15 é possível analisar a distribuição de tensões normais em x (σ_x) e de tensões de cisalhamento (τ_{xy}), respectivamente, nos EVRs os referidos fatores de carga compressivos.

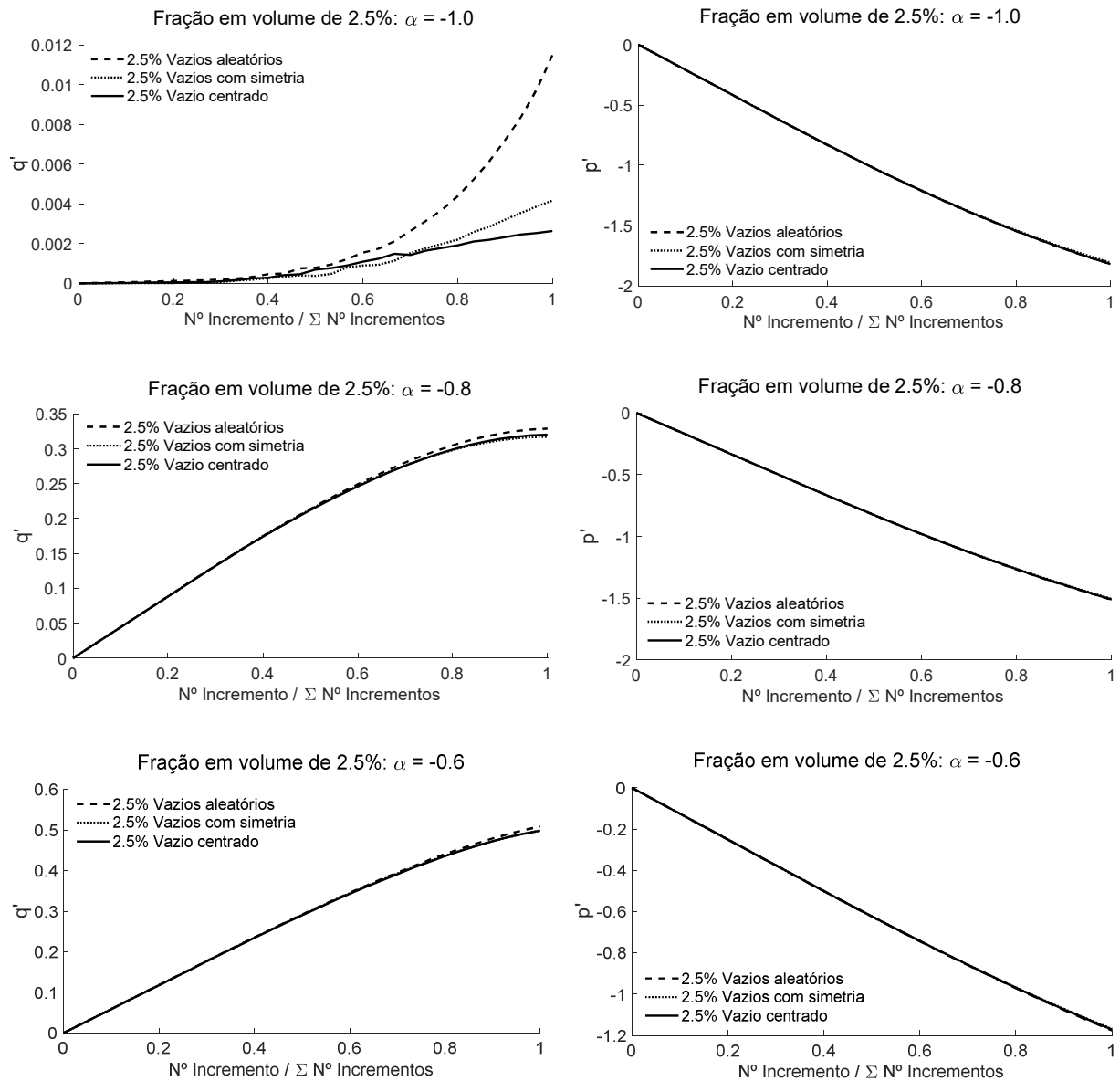


Figura 13 - Gráficos das componentes q' e p' para EVRs com 2.5% de vazios considerando fatores de carga compressivos ($\alpha = -1.0$, $\alpha = -0.8$ e $\alpha = -0.6$).

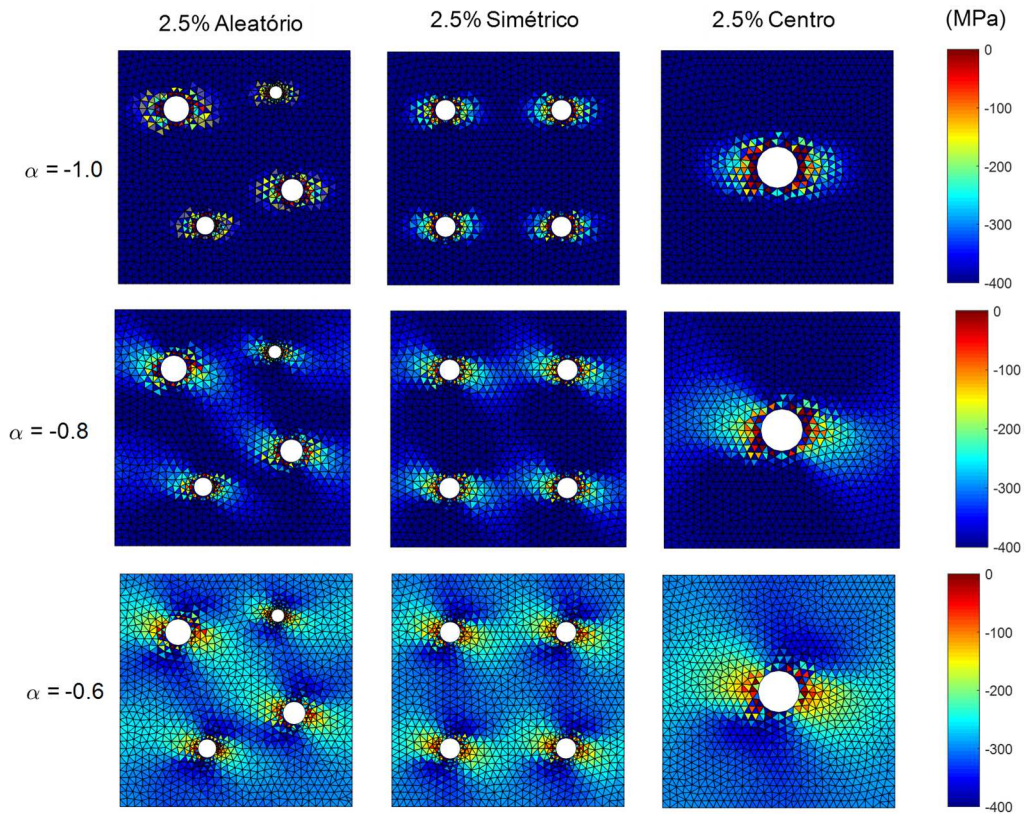


Figura 14 - Distribuição de tensões nos EVRs com 2.5% de vazios considerando a tensão normal na direção x (σ_x) para fatores de carga compressivos $\alpha = -1.0$, $\alpha = -0.8$ e $\alpha = -0.6$.

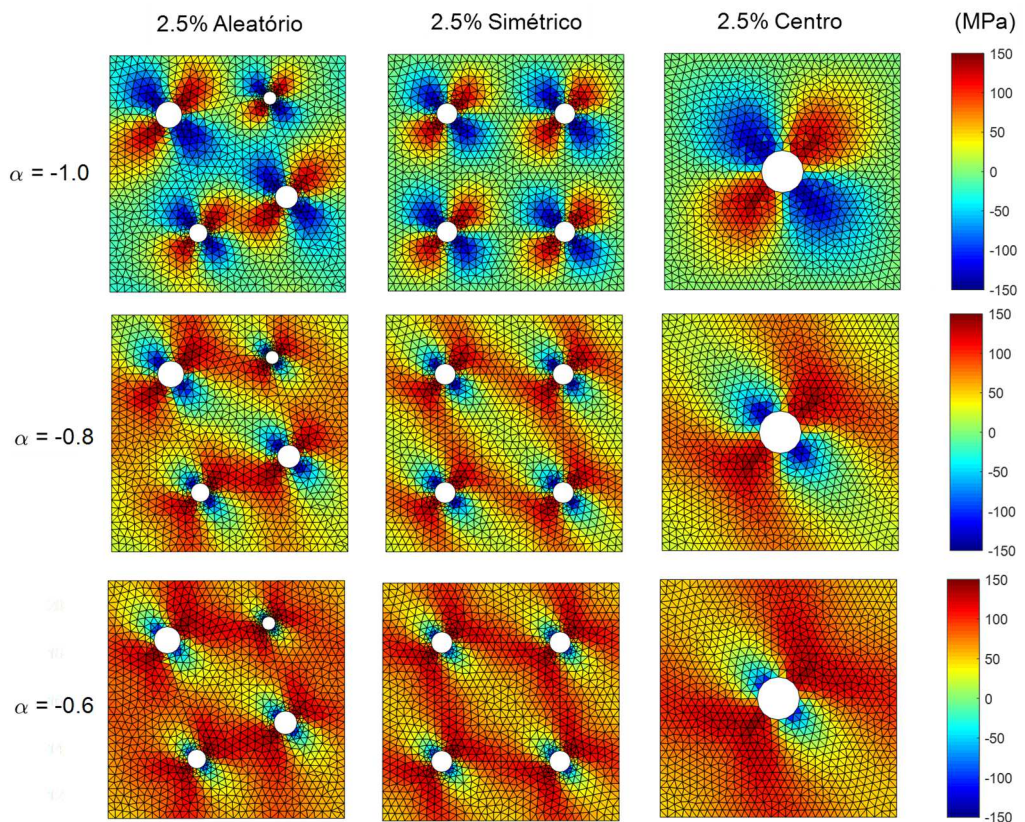


Figura 15 - Distribuição de tensões nos EVRs com 2.5% de vazios considerando a tensão de cisalhamento (τ_{xy}) para fatores de carga compressivos $\alpha = -1.0$, $\alpha = -0.8$ e $\alpha = -0.6$.

O gráfico final com as componentes máximas q' e p' para diferentes fatores de carga α , considerando valores positivos e negativos, é apresentado na Fig. 16. Como a proporção de vazios é pequena (2.5%), sua distribuição não influencia de forma significativa na resposta final da microestrutura. No entanto, é possível notar a superfície do EVR com distribuição aleatória de vazios ligeiramente superior aos demais casos.

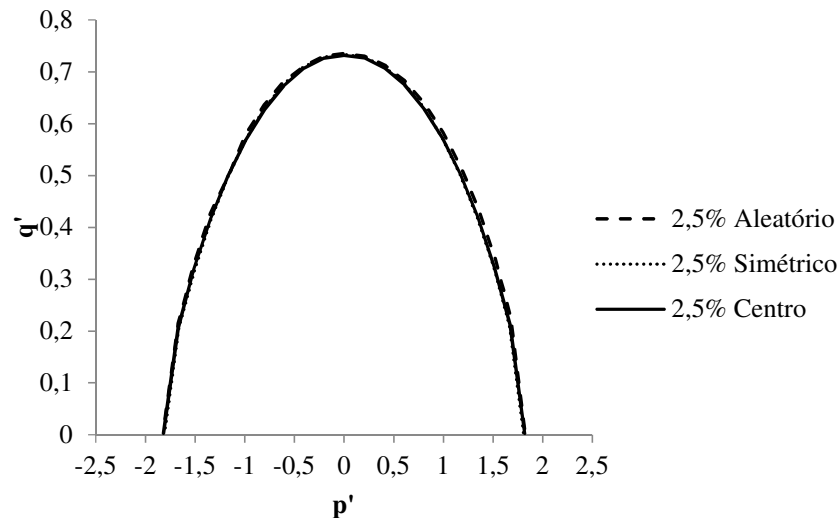


Figura 16 - Superfícies de plastificação finais com os valores máximos das componentes q' e p' para EVRs com 2.5% de vazios.

Seguindo o mesmo modo de aplicação de estados de deformação e considerando uma abordagem resumida dos resultados, são apresentadas a seguir as superfícies de plastificação finais para outros casos estudados de proporção de vazios na matriz.

Portanto, o gráfico final com as componentes máximas q' e p' para diferentes fatores de carga α , considerando valores positivos e negativos, é apresentado na Fig. 17. Para a proporção de vazios correspondente a 5%, é possível perceber uma maior diferença entre as superfícies obtidas. Neste caso, fica evidente que a microestrutura com distribuição aleatória de vazios apresenta maior resistência. Já as demais situações (microestrutura com vazio centrado e microestrutura com distribuição simétrica de vazios) apresentam valores praticamente iguais.

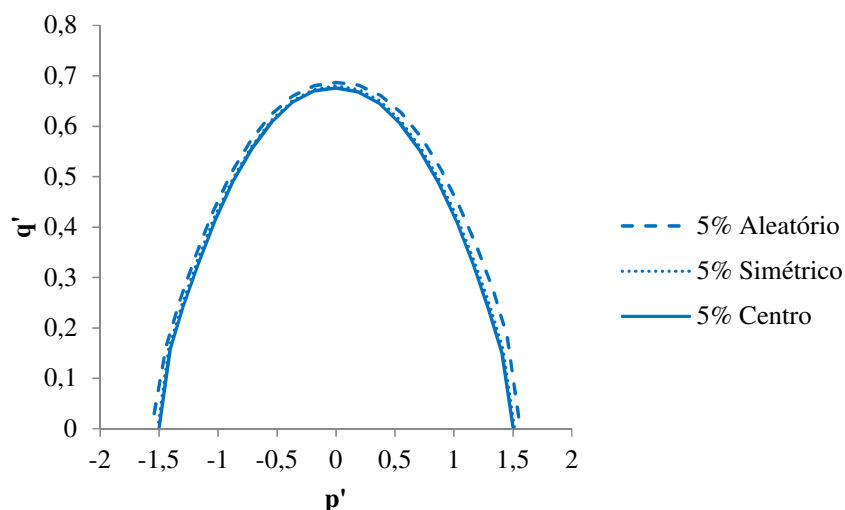


Figura 17 - Superfícies de plastificação finais com os valores máximos das componentes q' e p' para EVRs com 5% de vazios.

O gráfico final com as componentes máximas q' e p' para diferentes fatores de carga α , considerando valores positivos e negativos, é apresentado na Fig. 18. Para a proporção de 7.5% de vazios, novamente a microestrutura com distribuição aleatória de vazios apresenta valores superiores perante os demais casos para maiores valores de q' . Neste caso, também é importante destacar a diferença no comportamento considerando fatores de carga compressivos (parte negativa de p') e expansivos (parte positiva de p'). Nos carregamentos expansivos existe uma maior diferença entre as superfícies, em que o EVR com distribuição aleatória é mais resistente. No caso de carregamentos compressivos, as superfícies apresentam valores próximos. Além disso, é possível observar o fato do EVR com distribuição simétrica de vazios possui uma superfície levemente superior ao caso com vazio centrado em determinados momentos.

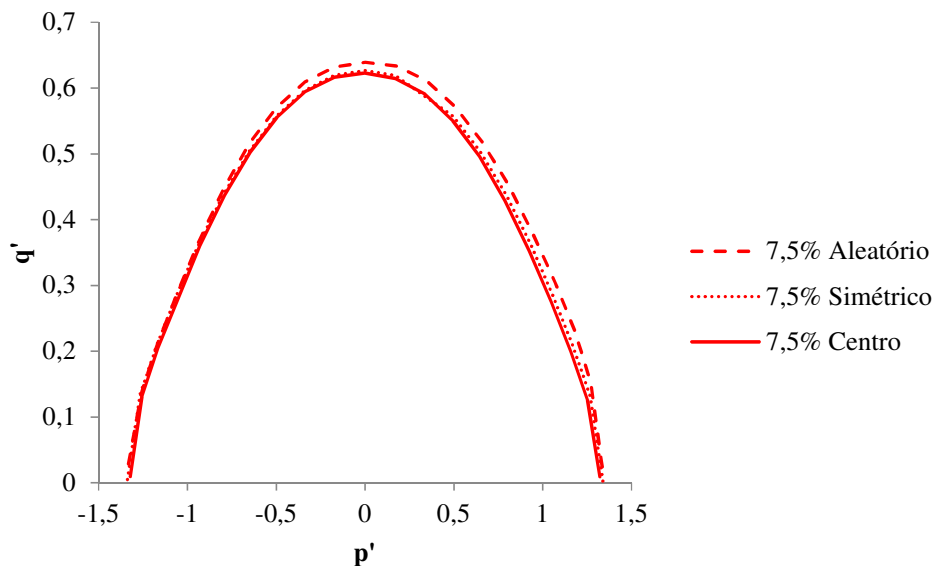


Figura 18 - Superfícies de plastificação finais com os valores máximos das componentes q' e p' para EVRs com 7.5% de vazios.

Por fim, o gráfico final com as componentes máximas q' e p' para diferentes fatores de carga α , considerando valores positivos e negativos, é apresentado na Fig. 19. No caso com 10% de vazios, observa-se uma diferença significativa entre carregamentos compressivos (parte negativa de p') e expansivos (parte positiva de p'). No caso de fatores de carga compressivos a microestrutura com distribuição simétrica de vazios tem mais resistência e os demais casos ficam próximos. Já para fatores de carga expansivos (parte positiva de p') os EVRs com distribuição aleatória e simétrica possuem valores próximos e superiores ao caso com vazio centrado. Em contrapartida, para maiores valores de q' , os resultados mostram que o EVR com distribuição aleatória é mais resistente, seguido do EVR com distribuição simétrica e do EVR com vazio centrado.

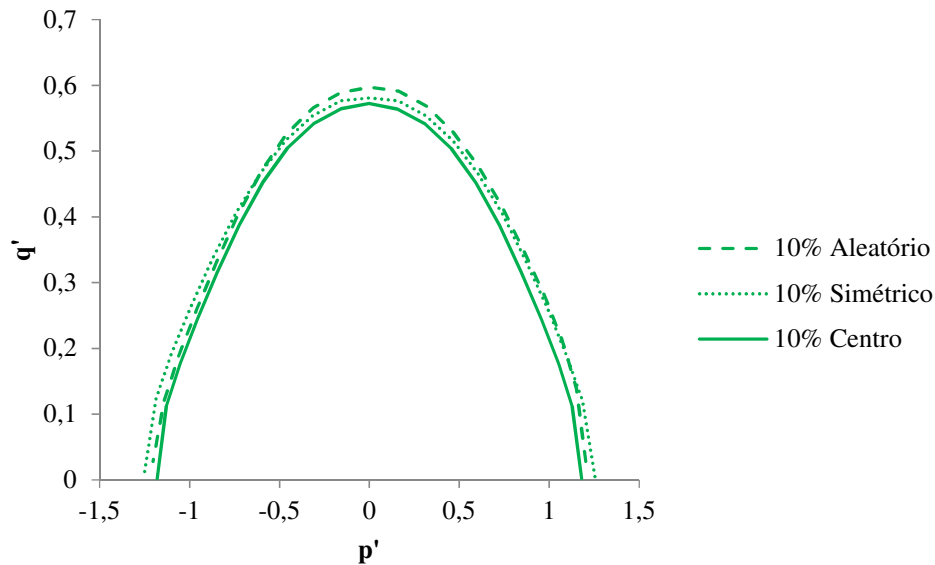


Figura 19 - Superfícies de plastificação finais com os valores máximos das componentes q' e p' para EVRs com 10% de vazios.

O gráfico final com as componentes máximas q' e p' para diferentes fatores de carga α , considerando valores positivos e negativos, é apresentado na Fig. 20. Para a situação com maior proporção de vazios, observa-se que a diferença mais significativa entre as curvas está nos valores críticos de q' . Fica evidente que o EVR com distribuição aleatória é o mais resistente. Por outro lado, os demais casos possuem valores próximos com o EVR com distribuição simétrica de vazios possuindo uma superfície pouco superior a do EVR com vazio no centro.

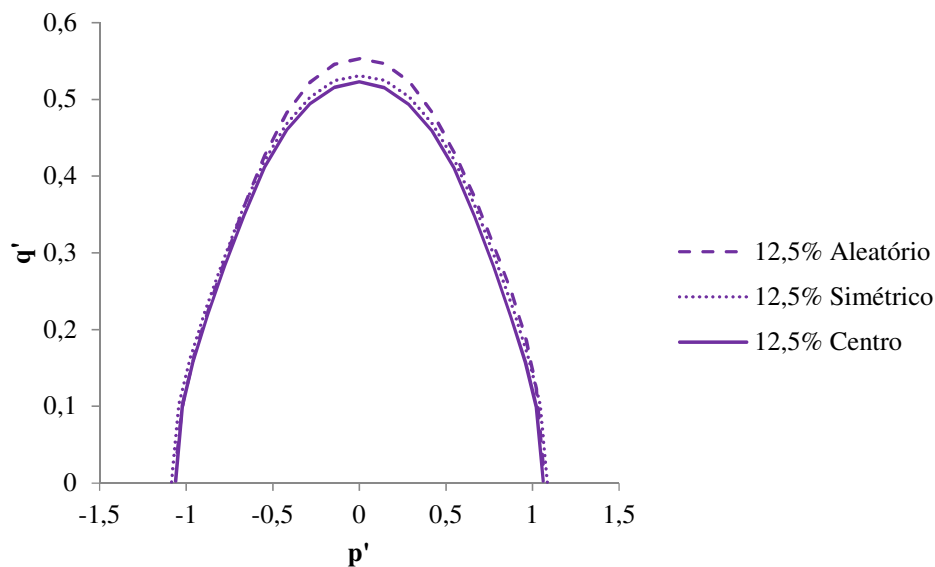


Figura 20 - Superfícies de plastificação finais com os valores máximos das componentes q' e p' para EVRs com 12,5% de vazios.

4.1- Comparação final dos resultados

Para uma análise comparativa entre todas as configurações de EVRs e todas as proporções de vazios, é mostrada a Fig. 21 com as componentes máximas q' e p' para diferentes fatores de carga α ,

considerando valores positivos e negativos. Como pode ser observado na Fig. 21, maiores proporções de vazios promovem a perda de resistência da microestrutura. Por sua vez, a forma de distribuição dos vazios também influencia no comportamento da microestrutura de materiais metálicos porosos, principalmente nos casos maiores proporções de vazios. É perceptível que a maior influência ocorre na tensão efetiva de von Mises normalizada (q'). De modo geral, os EVRs com vazios distribuídos de forma aleatória apresentam superfícies maiores, ou seja, esta disposição de vazios cria uma maior resistência no material. Isso pode ser decorrente de aspectos como diferentes distâncias entre vazios e também tamanhos distintos de vazios, o que gera uma distribuição de tensões não muito uniforme (ver Figs. 11, 12, 14 e 15). Por outro lado, os EVRs com vazios centrados foram aqueles com menores superfícies. Assim, a concentração de vazios promove a perda de resistência no material. Já os EVRs com vazios distribuídos de forma simétrica apresentam valores intermediários, porém mais próximos do EVRs com vazios centrados. Essa proximidade está associada com a distribuição de tensões, nestes casos mais uniforme.

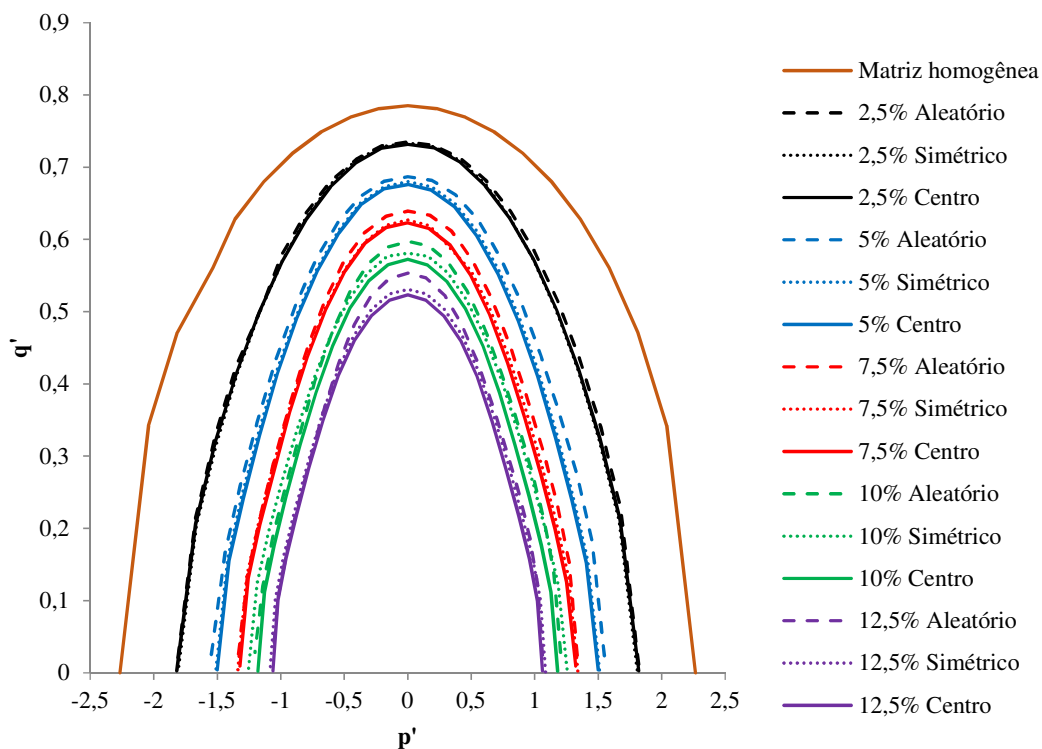


Figura 21 - Superfícies de plastificação finais com os valores máximos das componentes q' e p' para todas as situações estudadas.

Por fim, cabe destacar que também foram aplicadas maiores deformações nas microestruturas. Entretanto, ocorreram problemas de convergência, evidenciando possivelmente o colapso plástico prematuro da matriz. Isso foi observado principalmente nos casos com vazios distribuídos de forma aleatória. Acredita-se que tal fato está associado à distribuição de tensões nas microestruturas, sobretudo, às tensões de cisalhamento (ver Figs. 12 e 15). Apesar de gerar maiores superfícies, a situação com vazios distribuídos apresenta uma distribuição de tensões mais complexa, em especial no caso da tensão de cisalhamento. Isso dificultou a convergência dos resultados para maiores deformações distorcionais aplicadas, situação na qual o cisalhamento assume um papel de maior importância. Já as situações com vazios centrados e vazios distribuídos de forma simétrica apresentam distribuições de tensões mais uniformes, o que facilita a convergência dos resultados.

5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer do trabalho, foi realizado um estudo sobre a distribuição de vazios na microestrutura de materiais metálicos e sua influência nas superfícies de plastificação. De modo geral, os resultados mostram que o aumento da proporção de vazios promove superfícies com valores menores, um resultado já esperado devido à perda de resistência gerada pelos vazios. Por sua vez, a forma de distribuição dos vazios influencia na tensão efetiva de von Mises, principalmente para as situações com maiores proporções de vazios. Neste caso, mantendo a proporção de vazios, os EVRs com distribuição aleatória de vazios apresentam valores maiores da tensão efetiva de von Mises em comparação com demais casos, haja vista que foram simulados materiais dúcteis e nesse caso a tensão de cisalhamento tem papel importante. Os EVRs com vazios centrados apresentam as superfícies com menores valores. Já os EVRs com vazios distribuídos de forma simétrica apresentam valores ligeiramente superiores às situações com vazios centrados.

Com base nestes resultados conclui-se que a modelagem multi-escala configura como uma ferramenta atraente para o estudo do comportamento de materiais caracterizados por uma estrutura heterogênea. Podem ser desenvolvidos e/ou aplicados modelos constitutivos simples para descrever com maior precisão o comportamento dos materiais através de informações de fenômenos dissipativos observados ao nível microestrutural. Além disso, o presente trabalho abre espaço para aplicação desta metodologia a diferentes materiais porosos por meio do emprego de modelos constitutivos adequados para a simulação do material a ser estudado.

Cabe destacar ainda que os resultados iniciais obtidos ao nível microestrutural são importantes para futuras análises multiescala considerando a transição entre escalas de estruturas com materiais metálicos porosos. Em um momento futuro será utilizada a metodologia descrita em Fernandes, Pituba e De Souza Neto [13], em que é apresentado o procedimento para simulações com acoplamento entre a microescala e a macroescala.

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

- [1] J. Vorel, V. Šmilauer and Z. Bittnar. Multiscale simulations of concrete mechanical tests. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, v. 236, p. 4882-4892, 2012.
- [2] F. J. P. Reis. Multi-Scale Modelling and Analysis of Heterogeneous Solids at Finite Strains. 2014. 205 f. Thesis (Doctorate of Philosophy in Mechanical Engineering) – Faculty of Engineering University of Porto, Porto, 2014.
- [3] A. Karamnejad, V. P. Nguyen, L. J. Sluys. A multi-scale rate dependent crack model for quasi-brittle heterogeneous materials. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 104, p. 96-113, 2013.
- [4] J. Oliver, M. Caicedo, E. Roubin, A. E. Huespe and J. A. Hernandez. Continuum approach to computational multiscale modelling of propagating fracture. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 294, p. 384-427, 2015.
- [5] W. F. Santos, G. R. Fernandes and J. J. C. Pituba. Análise da influência dos processos de plasticidade e fratura no comportamento mecânico de microestruturas de Compósitos de Matriz Metálica. *Matéria (UFRJ)*, v. 21, n. 3, p. 577-598, 2016.
- [6] V. P. Nguyen, M. Stroeven and L. J. Sluys. An enhanced continuous-discontinuous multiscale method for modelling mode-I failure in random heterogeneous quasibrittle materials. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 79, p. 78-102, 2012.

- [7] A. L. Gurson. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I – Yield criteria and flow rules for porous ductile media. *Journal of Engineering Materials and Technology*, v. 99, p. 2-15, 1977.
- [8] V. Tvergaard. Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions. *International Journal of Fracture*, v. 17, p. 389-407, 1981.
- [9] V. Tvergaard and A. Needleman. Analysis of the cup–cone fracture in a round tensile bar. *Acta Materialia*, v. 32, p. 157-169, 1984.
- [10] J. Koplik and A. Needleman. Void growth and coalescence in porous plastic solids. *International Journal of Solids and Structures*, v. 24, p. 835-853, 1988.
- [11] S. M. Giusti, P. J. Blanco, E. A. de Souza Neto and R. A. Feijóo. An assessment of the Gurson yield criterion by a computational multi-scale approach. *Engineering Computations: International Journal for Computer-Aided Engineering and Software*, v. 26, n.3, p. 281-301, 2009.
- [12] W. F. Santos and J. J. C. Pituba. Yield surfaces of material composed of porous and heterogeneous microstructures considering phase debonding. *Latin American Journal of Solids and Structures*. v. 14, n. 8, p. 1387-1415, 2017.
- [13] G. R. Fernandes, J. J. C. Pituba and E. A. de Souza Neto. FEM/BEM formulation for multi-scale analysis of stretched plates. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, v. 54, p. 47-59, 2015.