

MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DE REFERÊNCIAS SOBRE SUPERFÍCIES DE ESCOAMENTO DE MATERIAIS POROSOS E DE MICROESTRUTURAS HETEROGÊNEAS

Systematic mapping of references about flow surfaces of porous materials and heterogeneous microstructures

Lorena Estrela Peixoto ¹ Gabriela Rezende Fernandes ²



PALAVRAS CHAVE:

Materiais porosos;
Superfície de escoamento;
EVR;
MEC.

KEYWORDS:

Porous materials;
Drain surface;
RVE;
BEM.

RESUMO: O estudo da homogeneização em análises numéricas de materiais heterogêneos tem recebido considerável atenção no campo da engenharia. Este artigo apresenta uma revisão sistemática de modelos constitutivos que investigam materiais heterogêneos, com ênfase específica em materiais porosos. Também é considerado o Método dos Elementos de Contorno (MEC), pois o mesmo tem sido aplicado em diversas pesquisas recentes para análises complexas, como a condutividade térmica em materiais micro-porosos, análise de comportamento de microestruturas heterogêneas e análises viscoelásticas e termoelásticas. As fontes para tal pesquisa foram as bases de dados CAPES e SCOPUS. O mapeamento permitiu identificar as principais lacunas sobre o tema destacando a importância de compreender a influência dos vazios nas propriedades desses materiais, evidenciando sua complexidade e heterogeneidade. Observou-se ainda uma lacuna quando se trata desse tipo de análise utilizando o MEC, possibilitando desenvolver estudos na área.

ABSTRACT: The study of homogenization in numerical analyzes of heterogeneous materials has received special attention in the field of engineering. This article presents a systematic review of constitutive models that investigate heterogeneous materials, with specific emphasis on porous materials. The Boundary Element Method (BEM) is also considered, as it has been applied in several recent research for complex analyses, such as thermal conductivity in micro-porous materials, analysis of the behavior of heterogeneous microstructures and viscoelastic and thermoelastic analyses. The sources for this research were the CAPES and SCOPUS databases. The mapping made it possible to identify the main gaps on the topic, highlighting the importance of understanding the influence of voids on the properties of these materials, their complexity and heterogeneity. We also observed a gap when it comes to this type of analysis using the MEC, making it possible to develop studies in the area.

* Contato com os autores:

Publicado em 19 de setembro de 2024

¹ e-mail: lorena.peixoto@discente.ufcat.edu.br (L. E. PEIXOTO)

Engenheira Civil, Mestranda em Mecânica das Estruturas e dos Materiais, Universidade Federal de Catalão.

² e-mail: gabrielar.fernandes@ufcat.edu.br (G. R. FERNANDES)

Engenheira Civil, Doutora, Professora Titular, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Catalão.

1. INTRODUÇÃO

De modo geral, os materiais heterogêneos possuem uma estrutura mais complexa em relação aos materiais homogêneos convencionais. Utilizando ferramentas adequadas é possível determinar o comportamento macroscópico de materiais heterogêneos através da resposta constitutiva do comportamento microestrutural. Santos (2018) afirmou que em certas situações, esses vazios são intencionalmente introduzidos na estrutura do material para obter propriedades específicas, como redução de peso ou maior deformabilidade, como também podem ser resultados de defeitos que surgiram durante o processo de fabricação ou devido a tensões aplicadas posteriormente.

De acordo com Utsunomiya e Matsumoto (2014), os metais porosos são utilizados como estruturas leves, absorvedor de energia, trocador de calor, biomaterial, filtro e etc. Nakjima (2010) ressaltou que os metais porosos possuem diferentes características quando se comparado a metal a granel, tendo baixa densidade e grande área superficial. Podendo utilizar esses materiais como materiais leves, transportadores de catalisadores, eletrodos, amortecimento de vibração e energia acústica, absorção de energia de impacto.

Lippitz *et al.* (2014) destacou que uma importante característica do metal poroso é quanto a absorção acústica, ressalta ainda que a microestrutura dos materiais porosos influencia diretamente na resistividade do fluxo. Como também, evidencia os aspectos positivos da capacidade de o material ser utilizado de forma estrutural e como filtros.

No âmbito da engenharia são empregados diversos materiais metálicos porosos, que apresentam uma estrutura heterogênea e de maior complexidade quando comparado com uma estrutura homogênea. Conforme Gal e Kryvoruk (2011) e Edmans *et al.* (2013), o comportamento dos materiais em macroescala é uma consequência do que acontece em nível microscópico. Em outras palavras, os fenômenos dissipativos percebidos no comportamento em grande escala, tais como plasticidade, fratura e danos, derivam de microdanos, microfissuras, alterações nos grãos, entre outros, os quais têm origem e progresso em estruturas microscópicas heterogêneas.

Com o avanço tecnológico, os métodos numéricos de modelagem evoluíram significativamente, transformando-se em ferramentas capazes de processar dados de alta complexidade. De acordo com Azevedo (2007), atualmente os métodos numéricos tem sido amplamente aplicados, mostrando-se altamente eficiente na resolução da maioria dos problemas práticos, incluindo aqueles com respostas não-lineares. Entre os diversos métodos numéricos utilizados para resolver problemas físicos, destacam-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), o Método das Diferenças Finitas (MDF), ambos utilizam equações diferenciais e o mais recente, o Método dos Elementos de Contorno (MEC), que usa equações integrais para a resolução dos problemas.

O MEF oferece vantagens em relação ao MDF, como uma melhor adaptação à geometria do domínio, maior facilidade na aplicação das condições de contorno e a capacidade de criar malhas com tamanhos variáveis. Essas vantagens fizeram com que o MEF se tornasse popular entre os cientistas e engenheiros. No entanto, uma característica do MEF é que ele requer um grande número de variáveis em seu equacionamento, o que demanda considerável tempo computacional. (AZEVEDO, 2007).

Segundo Brebbia e Dominguez (1989), o Método dos Elementos de Contorno tem se destacado como uma ferramenta eficaz, oferecendo uma alternativa viável ao Método dos Elementos Finitos. Essa abordagem é particularmente adequada em casos onde é necessária uma maior precisão nos resultados, como em problemas de concentração de tensões ou em domínios que se estendem ao infinito. Azevedo (2007) afirma que além disso, a redução de nós utilizados nas análises via MEC permite diminuir a dimensão nos problemas analisados. Isso resulta em uma menor quantidade de dados de entrada, menor tempo de processamento e menor necessidade de espaço auxiliar para o armazenamento das informações durante o processamento. Nesse sentido, Crozariol (2017) afirma que o tempo de processamento para se resolver o processo iterativo

de um Elemento de Volume Representativo (EVR) pelo MEC é menor do que pelo MEF.

O EVR, em análise multi-escala, representa a microestrutura do material, que considera distintas fases do material. E a resposta constitutiva é determinada pelos valores homogeneizados da tensão e do tensor constitutivo do EVR. Isso resulta em uma maior precisão na modelagem do comportamento desses materiais quando utilizada a abordagem multi-escala (PITALUGA, 2022).

Considerando a influência que os vazios causam nas propriedades dos materiais metálicos é fundamental investigar como esses vazios influenciam a resposta constitutiva dos materiais. O estudo detalhado da morfologia dos vazios pode oferecer informações essenciais para otimizar o desempenho e as características dos materiais porosos em diversas aplicações. Portanto, a contribuição do presente trabalho reside no fato de utilizar o conceito de mapeamento sistemático para produzir uma base de dados de modelos constitutivos que investigam materiais heterogêneos, com ênfase nos materiais porosos. Essa análise sistemática dos modelos permite uma compreensão mais aprofundada das propriedades desses materiais e suas aplicações potenciais.

2. OBJETIVO

No que se refere aos objetivos, o presente artigo, através de um mapeamento sistemático investiga de forma ampla o tópico da pesquisa e distingue os artigos que possuem informações consistentes e relevantes para o estudo de superfícies de escoamento de materiais porosos e de microestruturas heterogêneas. Além disso, realiza-se um refinamento adicional, a fim de verificar trabalhos que realizam esse tipo de análise numérica utilizando formulações do Método dos Elementos Contorno (MEC) baseada em Elementos de Volume Representativo (EVR).

3. METODOLOGIA

A análise do campo de estudo é conduzida com a utilização do mapeamento sistemático (*mapping study*) como referência, seguindo a abordagem delineada por Bailey *et al.* (2007) e Petersen *et al.* (2008). Esse método envolve a investigação de acervos bibliográficos catalogados em bases de dados científicos, empregando termos ou palavras-chave para a seleção preliminar dos estudos pertinentes. Essa técnica vem sendo amplamente utilizada por diversos autores como Santa (2018), Oliveira *et al.* (2018), Paula *et al.* (2016), Passos *et al.* (2017), Fernandes *et al.* (2018), Lobo *et al.* (2020) e Sena *et al.* (2022).

O mapeamento sistemático pode oferecer uma base de conhecimento e um ponto inicial para futuras investigações. Esse recurso não só beneficia os próprios pesquisadores que o conduziram, mas também para outros estudiosos na área, permitindo que avancem em suas pesquisas a partir dos dados já levantados, otimizando tempo e recursos (BUDGEN *et al.*, 2008).

Dessa forma, foram analisadas as seguintes bases de dados: o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Scopus. Para a pesquisa foram utilizadas combinações dos operadores lógicos "AND", entre as expressões "*heterogeneous material*", "*yield surface*", "*porous material*", "*boundary elements*" e "*RVE*". O objetivo foi selecionar artigos que abordassem modelos constitutivos de materiais heterogêneos, com ênfase em materiais porosos e superfícies de escoamento. A busca foi refinada para incluir especificamente modelos que utilizaram o Método dos Elementos de Contorno (MEC) e Elementos de Volume Representativo (EVR).

Após a etapa inicial de pesquisa, foram estabelecidos critérios de filtragem como a seleção de artigos nos idiomas inglês e português, sem restrição quanto à área de conhecimento. Após a aplicação desses filtros em cada base de dados, procedeu-se à classificação dos artigos com base nos títulos e no ano de publicação, sendo observadas eventuais repetições entre as diferentes bases de dados.

Utilizando o software Zotero, foi efetuada a análise de conformidade entre os títulos e resumos, identificando assim os estudos que apresentavam informações pertinentes ao objeto de estudo em questão. Aqueles itens que apresentaram repetições, tanto dentro de uma mesma pesquisa quanto entre diferentes pesquisas, foram excluídos da análise. Dessa forma, a revisão bibliográfica foi conduzida com base no total de estudos obtidos após as análises.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a análise de aderência, procurou-se por indícios do tema central do trabalho como as palavras chaves, optando por selecionar os artigos que estivessem alinhados com o objeto de estudo. Após a realização das pesquisas nas bases de dados, os arquivos obtidos foram organizados conforme a Tabela 1.

TABELA 4: Resumo dos resultados obtidos em uma pesquisa no banco de dados.						
BASE DE DADOS	EXPRESSÃO-CHAVE					
	<i>"heterogeneous material" AND "yield surface"</i>		<i>"porous material" AND "yield surface"</i>		<i>"porous material" AND "yield surface" AND "boundary elements"</i>	
	Número de artigos					
	Inicial	Títulos aderentes	Inicial	Títulos aderentes	Inicial	Títulos aderentes
CAPES	255	40	62	13	3	0
SCOPUS	22	6	167	25	0	0
TOTAL	277	46	229	38	3	0
	<i>"heterogeneous material" AND "yield surface" AND "RVE"</i>		<i>"porous material" AND "yield surface" AND "RVE"</i>		<i>"porous material" AND "yield surface" AND "boundary elements" AND "RVE"</i>	
	Inicial	Títulos aderentes	Inicial	Títulos aderentes	Inicial	Títulos aderentes
CAPES	16	2	8	4	0	0
SCOPUS	2	1	6	3	0	0
TOTAL	18	3	14	7	0	0
Número total de artigos sem repetições entre as bases de dados				61		
Número de artigos selecionados após leitura do título e resumo				30		

FONTE: Autoria própria.

Utilizando uma metodologia sistemática de busca, identificou-se um conjunto de artigos que abordam o tema das superfícies de escoamento em materiais porosos e microestruturas heterogêneas. No entanto, ao refinar a busca com palavras-chave específicas, como *"boundary element"* (elemento de contorno), *"RVE"* (Elemento de Volume Representativo), *"porous material"* (material poroso), observou-se uma tendência interessante.

Notavelmente, percebe-se que, apesar do crescente interesse nesse campo, ainda há uma lacuna significativa quando se busca por artigos que abordam simultaneamente os conceitos de *"boundary element"*, *"RVE"*, *"porous material"*. Essa ausência indica uma oportunidade para pesquisas futuras, pois a integração desses conceitos pode trazer avanços importantes na modelagem e análise de materiais porosos utilizando elementos de contorno e elemento de volume representativo. A identificação dessa lacuna reforça a necessidade de estudos mais aprofundados e interdisciplinares para explorar e consolidar essa área

emergente, promovendo uma compreensão mais abrangente e detalhada das interações e propriedades dos materiais porosos.

A Figura 1 apresenta um resumo do levantamento de artigos realizado, destacando o impacto das palavras-chave selecionadas e excluindo aquelas que não geraram resultados relevantes. Observe que "heterogeneous material" AND "yield surface" AND "RVE" corresponde a apenas 3% dos artigos selecionados. Em contrapartida, quando a busca é feita de forma mais ampla, com as palavras-chaves "heterogeneous material" AND "yield surface", abrange a maior parte dos artigos com 49 %, "porous material" AND "yield surface" com 40% e "porous material" AND "yield surface" AND "RVE" com 8% dos artigos com titulação aderente.

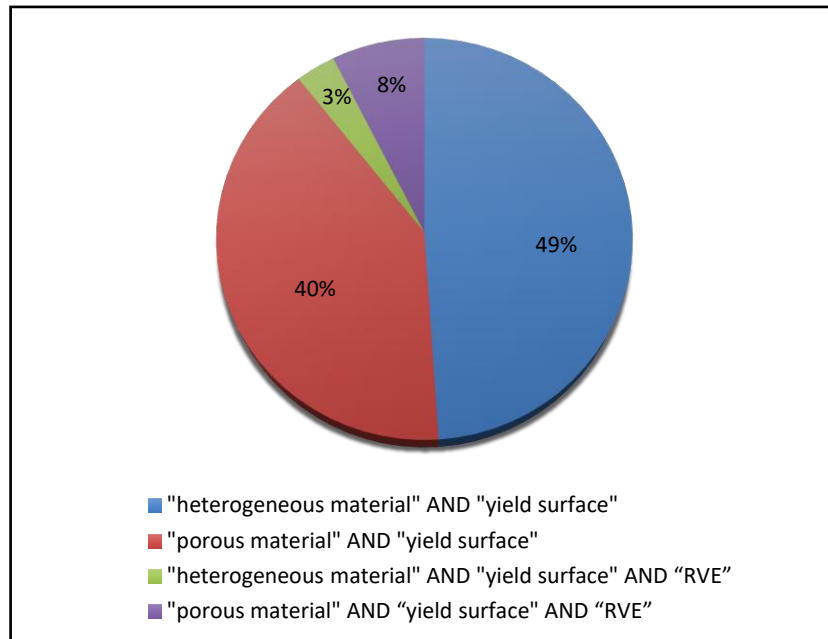


FIGURA 1: Títulos aderentes conforme a palavra-chave.

FONTE: Autoria própria (2024).

A Figura 2 ilustra a evolução anual das publicações dos artigos selecionados após a leitura do título e do resumo. A análise do gráfico revela um padrão de interesse constante em materiais plásticos desde 1988, com períodos de maior atividade em 2007, 2013 e mais recentemente em 2023. Notavelmente, observa-se um pico de publicações em 2007 e 2013, indicando um aumento substancial no interesse de pesquisa nesses anos. Nas duas últimas décadas, especialmente nos anos de 2022 e 2023, houve um crescimento significativo no número de artigos publicados, refletindo um renovado interesse e possivelmente avanços na área de materiais plásticos. Este aumento recente sugere que o tema abordado neste trabalho está ganhando destaque e relevância no campo científico.

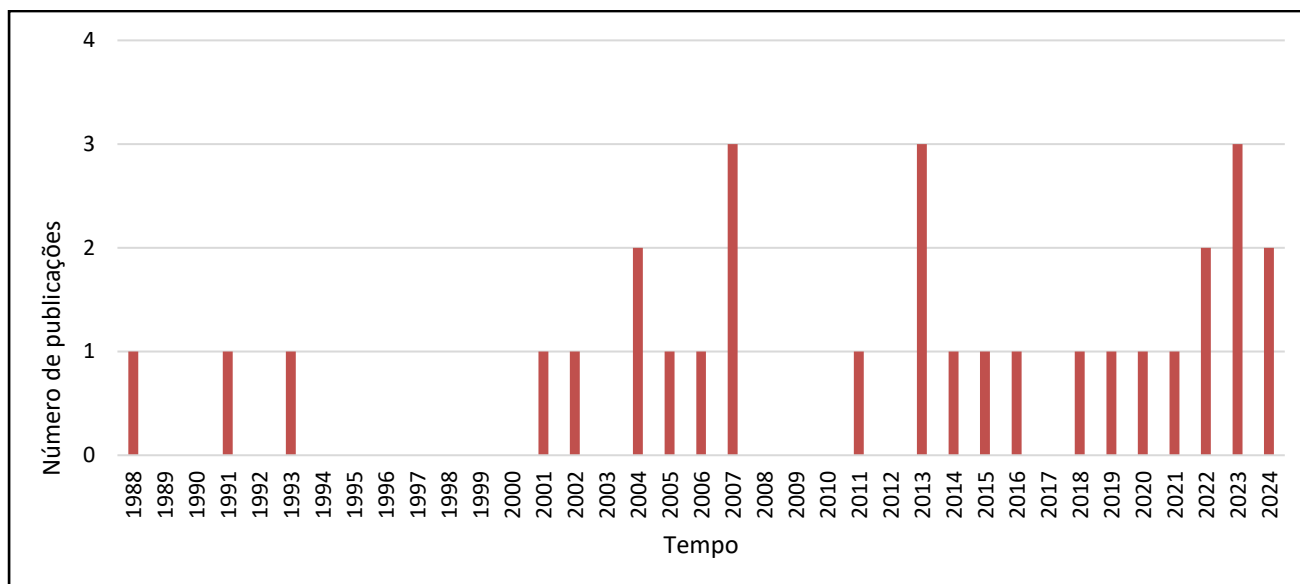


FIGURA 2: Evolução dos artigos publicados com base nas palavras-chave com títulos aderentes.

FONTE: A autoria própria (2024).

Essa observação sugere áreas de oportunidade para pesquisas futuras, indicando a necessidade de investigações mais aprofundadas que integrem esses conceitos em estudos sobre superfícies de escoamento em materiais porosos e microestruturas heterogêneas. Além disso, ressalta a importância de abordagens interdisciplinares e colaborativas para avançar no entendimento desse domínio crucial da ciência e engenharia.

Dessa forma, para a seleção dos artigos foi realizada a leitura do título e do resumo, sendo que esses tiveram que abordar estudos que utilizaram materiais heterogêneos, material poroso, superfície de plasticidade, elemento de volume representativo (EVR). Os tópicos tiveram que estar associados no contexto, porém não foi necessária a concentração de todos no texto, os demais artigos foram descartados.

4.1 MATERIAIS POROSOS E SUPERFÍCIE DE PLASTICIDADE

Após revisão dos resumos dos artigos selecionados, o autor Gurson (1977) foi referência no assunto, citado por vários autores, tendo desenvolvido um modelo baseado na teoria da plasticidade que se tornou fundamental para a análise de materiais porosos. Este modelo, conhecido como modelo de Gurson, oferece uma abordagem micromecânica para descrever o comportamento plástico de materiais dúcteis contendo cavidades ou poros.

Mais tarde, Tvergaard e Needleman (1984) procuraram aprimorar o modelo original de Gurson, introduzindo parâmetros adicionais que melhoraram a precisão na previsão do comportamento de materiais porosos. Pindera e Aboudi (1988) fizeram uma análise micromecânica de escoamento de compósitos com matriz metálica. Um pouco mais adiante, Svobodnik *et al.* (1991) desenvolveram uma lei de material para análise elasto-plástica de compósitos de matriz metálica reforçados com fibras, usando uma abordagem de elementos finitos tridimensionais (3D) baseada em modelos micromecânicos.

Diversos estudos têm se dedicado a investigar a evolução do vazio dependente do tamanho. Kamenyarzh e Yakusheva (1993) analisaram o avanço de uma zona plástica ao redor de um furo sob carregamento, contribuindo para a compreensão do comportamento de deformação plástica em materiais com furo. Segundo Choi *et al.* (2001) o estudo sobre vazios é de extrema importância pois diversos materiais usados na engenharia podem conter vazios que surgem inicialmente no processo de fabricação. De acordo com Liao (2004) metais estruturais frequentemente apresentam microvazios e partículas de segunda fase, que atuam como pontos de concentração de deformação, facilitando a nucleação, crescimento e coalescência desses vazios, o que pode resultar em falhas.

Bilgel *et al.* (2005) realizaram um estudo tanto da resposta global quanto a local de meios porosos que consistem em uma matriz perfeitamente plástica enfraquecida por vazios sem tensões. Eles determinaram que microestruturas aleatórias sem aglomerados específicos de vazios apresentam respostas mais rígidas, enquanto microestruturas com aglomerados conectados de vazios tendem a ter respostas mais suaves. Fica claro que a variação na distribuição de vazios em uma matriz plástica resulta em diferentes padrões de deformação.

Li e Steinmann (2006), também afirmaram que a forma dos vazios (geometria ou configuração) influencia em como os materiais porosos fluem e como os vazios crescem ao longo do tempo. A pesquisa ainda ressalta que mudanças significativas ocorrem conforme o tamanho desses vazios.

Bilger *et al.* (2007) exploraram os efeitos de uma distribuição não uniforme de vazios na resposta macroscópica ao rendimento de meios porosos com uma matriz rígida-perfeitamente plástica. Bonfoh e Lipinski (2007) estudaram sobre modelagem micromecânica de danos dúcteis através do descolamento de partículas em compósitos de matriz metálica. Gărăjeu e Suquet (2007) abordaram como as flutuações locais na fração volumétrica dos constituintes afetam as propriedades efetivas de compósitos não lineares, especialmente em relação aos materiais porosos.

Segundo a literatura de Khatam e Pindera (2011), a arquitetura microestrutural exerce um papel fundamental na resposta elástico-plástica de compósitos com matriz metálica, incluindo metais porosos. A geometria das inclusões ou poros e o tipo de matriz exercem um impacto mais significativo na resposta pós-ruptura do que nos módulos elásticos, alterando os componentes desviatórios e hidrostáticos do campo de tensão. Assim, técnicas micromecânicas avançadas são essenciais para uma captura precisa desses efeitos.

Azizi *et al.* (2013) fizeram um estudo de homogeneização de compósitos de matriz metálica que incorporam fibras elásticas longas. Madou e Leblond (2013) utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) determinaram as superfícies de escoamento para oito geometrias distintas de vazios. Monchiet e Kondo (2013) investigaram os efeitos combinados do tamanho e da forma de vazios no critério macroscópico de materiais nanoporosos dúcteis, utilizando uma matriz plástica rígida-ideal, do tipo von Mises.

Khindr *et al.* (2014) abordaram a homogeneização computacional de meios porosos plásticos com duas populações de vazios esféricos de diferentes tamanhos. Além disso, foi realizado o cálculo com apenas uma população de vazios em que se concluiu que uma única população de vazios pode representar o comportamento constitutivo do meio poroso adequadamente. No ano seguinte, Khindr *et al.* (2015), fizeram um estudo de homogeneização computacional de meios porosos aleatórios, estimando a superfície de escoamento geral de meios porosos com distribuição de vazios aleatórios.

Elminor *et al.* (2016), estudaram células cúbicas tridimensionais contendo vazios esferoidais distribuídos de maneira aleatória, a fim de estimar a superfície de escoamento de meios porosos. Ao fazer a comparação de seus resultados com alguns critérios de rendimento do tipo Gurson, evidenciaram que os parâmetros heurísticos de Gurson-Tvergaard são independentes do tamanho do vazio, sugerindo que um meio poroso com apenas uma população de vazios poderia representar adequadamente o comportamento deste material, se comparado com o mesmo meio contendo duas populações de vazios.

Bourih *et al.* (2018), fizeram análises para estimar a superfície de escoamento eficaz de meios porosos com vazios esféricos idênticos sobrepostos aleatoriamente através da micromecânica computacional, pelo MEF. Niordson e Tvergaard (2019) aplicaram uma teoria de plasticidade com gradiente de deformação para quantificar os efeitos de escala no crescimento de vazios sob diferentes condições de carregamento. Eles propuseram um método para aprimorar modelos de plasticidade porosa, levando em conta a influência do tamanho dos vazios em escala micrométrica.

Shen *et al.* (2020), fizeram simulações numéricas através do método de elementos finitos de uma matriz sólida do tipo von Mises considerando diferentes valores de porosidade, a fim de prever as superfícies de escoamento plástico do material. Hure (2021) propoz um modelo de homogeneização que reproduziu

quantitativamente o comportamento de materiais elastoplásticos isotrópicos contendo distribuições aleatórias de vazios sob deformações finitas.

Bensaada *et al.* (2022), fizeram uma investigação com uma ampla variação de volumes de vazios, de 0,1% a 24% (meio altamente poroso) utilizando elementos finitos para modelar o EVR, analisando a evolução da forma do vazio e suas consequências no processo de ruptura dúctil. Ainda no mesmo ano, Santos *et al.* (2022), realizaram uma abordagem de homogeneização computacional a fim de avaliar a influência da morfologia do vazio na representação geométrica completa das superfícies de escoamento isotrópicas de meios dúcteis porosos, utilizando o MEF para criar superfícies de escoamento total, abrangendo diferentes taxas de triaxialidade de tensão.

Santos *et al.* (2023) investigaram a representação geométrica completa de superfícies de escoamento para meios dúcteis porosos isotrópicos, em uma abordagem de homogeneização computacional, em que os efeitos da morfologia celular e das condições de contorno impostas foram avaliadas. Foi observado que a variação na morfologia das células resultam em diferentes padrões de escoamento, mesmo sob a mesma condição de carga. Notou-se também que as condições de contorno, sejam periódica ou de deformação uniforme, resultam em mudanças significativas na resposta da superfície de escoamento. E ao considerar triaxialidades baixas e intermediárias, o ângulo de Lode exerce uma grande influência na geometria de tais superfícies.

Filho e Cavalcante (2023) realizaram análises de superfícies de escoamento de meios bidimensionais com microestruturas porosas periódicas utilizando a abordagem Análise de Campo de Transformação (TFA) como uma alternativa ao método dos elementos finitos. Essas análises possibilitaram a caracterização dos modos de deformação para os diversos modelos avaliados, permitindo entender a rigidez e a resistência do material em distintos estados de tensões macroscópicas. Sénac *et al.* (2023) determinam critérios de rendimentos para materiais anisotrópicos porosos (tipo Hill e monocristalinos) sob carregamento axissimétrico utilizando análise limite. Os estudos observaram que dependendo da microestrutura e da anisotropia plástica, a coalescência em colunas pode ser mais favorável que em camadas sob diversas condições de carga, incluindo tensões com ângulo de Lode. Diferente do estreitamento interno, esse modo de deformação não resulta na perda total da capacidade de suporte, conforme evidências experimentais. Ressaltando que o modelo de plasticidade multissuperfície proposto supera as abordagens anteriores para prever fratura dúctil em materiais anisotrópicos sob condições axissimétricas.

Mais recentemente, Ferreira *et al.* (2024) desenvolveram um critério de rendimento anisotrópico macroscópico para materiais porosos considerando a anisotropia plástica da matriz e dos vazios esféricos. O estudo alcançou resultados satisfatórios considerando a isotropia plástica equivalente (IPE) estabelecendo relações constitutivas gerais para a matriz com dependência do ângulo de Lode e anisotropia arbitrária. Xenos *et al.* (2024) propuseram um novo modelo elástico-plástico independente da taxa; foi desenvolvido para materiais metálicos porosos, consistindo em microestruturas com vazios esferoidais distribuídos e orientados de maneira aleatória. Este modelo visa investigar o impacto da forma inicial dos vazios na resposta efetiva do material. Tanto as análises analíticas quanto numéricas mostraram que o formato inicial dos vazios influencia de maneira significativa o comportamento de escoamento do material poroso, resultando em respostas mais suaves para vazios de formato plano.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio desse mapeamento sistemático, nota-se que as superfícies de escoamento têm sido objeto de ampla investigação, com um aumento significativo nas pesquisas nos últimos anos. Os materiais porosos possuem diversas aplicações; compreender e determinar a influência de vazios na matriz é de extrema importância para conhecer o comportamento do material. No entanto, o uso do Método dos Elementos de

Contorno (MEC) neste contexto ainda é uma área relativamente nova. A análise das bases de dados utilizadas revela a escassez de estudos compatíveis com esse método.

Nesse sentido, abre-se uma janela para o desenvolvimento de estudos voltados à determinação de superfícies plásticas utilizando o Método dos Elementos de Contorno (MEC). Diversas pesquisas já destacaram que o MEC é um método numérico que oferece vantagens em termos de custo computacional e resultados satisfatórios, quando comparado ao Método dos Elementos Finitos (MEF), amplamente utilizado nas investigações científicas do mapeamento.

Por fim, é importante ressaltar que revisões bibliográficas utilizando o mapeamento sistemático possibilita identificar o avanço científico sobre o tema estudado, ao mesmo tempo que direciona para as publicações mais relevantes relacionadas ao tema, o que auxilia a definir a relevância e originalidade da pesquisa a ser desenvolvida.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

____. **CAPES** - Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. 2017. Disponível em: <http://www-periodicos-capes-gov-br.ez49.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 31 maio 2024.

____. **Scopus**. 2017. Disponível em: <https://www.scopus.com/>. Acesso em: 31 de maio 2024.

____. **Scielo**. 2024. Disponível em: <https://www.scielo.org/>. Acesso em: 31 de maio 2024.

AZIZI, R.; LEGARTH, B.; NIORDSON, F. A new macroscopically anisotropic pressure dependent yield function for metal matrix composite based on strain gradient plasticity for the microstructure. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 61, n. 4, p. 991-1009, abr. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2012.12.004>.

AZEVEDO, C. A. C. de. **Formulação alternativa para análise de domínios não-homogêneos e inclusões anisotrópicas via MEC**. 2007. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: [doi:10.11606/D.18.2007.tde-18102007-110753](https://doi.org/10.11606/D.18.2007.tde-18102007-110753). Acesso em: 26 jun. 2024.

BAILEY, J.; BUDGEN, D.; TURNER, M; KITCHENHAM, B; BRERETON, P.; LINKMON, S. **Evidence relating to Object-Oriented software design**: A survey. First International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement. Computer Society, 2007.

BENSAADA, R.; KANIT, T.; IMAD, A.; ALMANSBA, M.; SAOUAB, A. Void-growth computational analysis in elastic-plastic porous materials. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 217, 107021, mar. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.107021>. Acesso em: 16 jun. 2024.

BILGER, N. et al. Effect of a nonuniform distribution of voids on the plastic response of voided materials: a computational and statistical analysis. **International Journal of Solids and Structures**, v. 42, n. 2, p. 517-538, jan. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.06.048>. Acesso em: 16 jun. 2024.

BILGER, N., AUSLENDER, F., BORNERT, M., MOULINEC, H., & ZAOU, A. Bounds and Estimates for the Effective Yield Surface of Porous Media with a Uniform or a Nonuniform Distribution of Voids. **European Journal of Mechanics - A/Solids**, v. 26, n. 5, 810-836, set. 2007. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.euomechsol.2007.01.004>>. Acesso em: 16 jun. 2024.

Brebbia, C. A.; Dominguez, J. **Boundary Elements: An Introductory Course**. Southampton: McGraw Hill, 1989.

BONFOH, N.; LIPINSKI, P. Ductile damage micromodeling by particles' debonding in metal matrix composites. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 49, n. 2, p. 151-160, fev. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2006.08.015>.

BOURIH, A.; KADDOURI, W.; KANIT, T.; MADANI, S.; IMAD, A. Effective yield surface of porous media with random overlapping identical spherical voids. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 7, n. 2, p. 103–117, abr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.01.002>. Acesso em: 24 jun. 2024.

BUDGEN, D., TURNER, M., BRERETON, P., KITCHENHAM, B., **Using Mapping Studies in Software Engineering**. In: Proceedings of PPIG 2008, Lancaster University, 2008, pp. 195–204.

CHOI, S. H.; BARLAT, F.; LIU, J. Efeito de precipitados na anisotropia plástica para ligas de alumínio policristalino. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 32, p. 2239-2247, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11661-001-0199-2>>.

CROZARIOL, L. H. de R. **Análise do comportamento de microestruturas heterogêneas pelo método dos elementos de contorno considerando-se não-linearidade física**. 157f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2017.

EDMANS, Ben; ALFANO, Giulio; BAHAI, H. Nonlinear multi-scale homogenization with different structural models at different scales. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 94, p. 355-373, 2013. DOI: 10.1002/nme.4447.

ELMINOR, H.; BAHRAOUI, I.; ELMINOR, H.; HILALI, E.; KANIT, T. Numerical approach to estimate the effective yield surface of random porous media for spherical voids. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**, v. 13, n. 05, p. 26–32, maio 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.9790/1684-1305072632>. Acesso em: 24 jun. 2024.

FERNANDES, G. R., OHLAND, G. A., VIERIA, J. F.; **A boundary elemento formulation to perform elastic analysis of heterogeneous microstructures**. *Engineering Analysis with Boundary Elements.*, v.87, p.47-65; 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2017.11.006>.

FERREIRA, A. R.; PROENÇA, S. P. B.; BENALLAL, A. Yield criteria for voided materials with anisotropic matrix behavior. **European Journal of Mechanics - A/Solids**, v. 104, 105079, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.euomechsol.2023.105079>. Acesso em: 24 jun. 2024.

FILHO, C. A. F. V.; CAVALCANTE, M. A. A. Evaluation of macroscopic yield surfaces of periodic porous microstructures employing transformation field analysis and high order finite element method. **Materials Today Communications**, v. 34, 105462, mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105462>. Acesso em: 24 jun. 2024.

GAL, E.; KRYVORUK, R. Fiber reinforced concrete properties - A multiscale approach. **Computers and Concrete**, v. 8, n. 5, p. 525-542, 2011. DOI: 10.12989/cac.2011.8.5.525.

GĂRĂJEU, M.; SUQUET, P. On the influence of local fluctuations in volume fraction of constituents on the effective properties of nonlinear composites: Application to porous materials. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 55, n. 4, p. 842-878, abr. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2006.09.005>.

GURSON, A. L. 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.

HURE, J. Yield criterion and finite strain behavior of random porous isotropic materials. **European Journal of Mechanics - A/Solids**, v. 85, 104143, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2020.104143>. Acesso em: 24 jun. 2024.

KAMENYARZH, Ya. A.; YAKUSHEVA, Ye. V. The evolution of a plastic zone near a hole. **Journal of Applied Mathematics and Mechanics**, v. 57, n. 1, p. 181-196, jan. 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(93\)90112-Y](https://doi.org/10.1016/0021-8928(93)90112-Y). Acesso em: 16 jun. 2024.

KHATAM, H.; PINDERA, M. Plastic deformation modes in perforated sheets and their relation to yield and limit surfaces. **International Journal of Plasticity**, v. 27, n. 10, p. 1537-1559, out. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2010.10.004>.

KHINDR, Y.; KANIT, T.; Fahmi, Z.; NAÏT-ABDELAZIZ, M. Computational homogenization of plastic porous media with two populations of voids. **Materials Science and Engineering: A**, v. 597, p. 324-330, mar. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.12.095>.

KHINDR, Y.; KANIT, T.; Fahmi, Z.; NAÏT-ABDELAZIZ, M. A computational homogenization of random porous media: effect of void shape and void content on the overall yield surface. **European Journal of Mechanics - A/Solids**, v. 49, p. 137-145, jan. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2014.07.001>.

LIAO, K.-C. Yield criteria for porous ductile sheet metals with planar anisotropy under plane stress conditions. **Computers & Structures**, v. 82, n. 29-30, p. 2573-2583, nov. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.02.027>. Acesso em: 16 jun. 2024.

Li, Z., Steinmann, P. RVE-Based Studies on the Coupled Effects of Void Size and Void Shape on Yield Behavior and Void Growth at Micron Scales. **International Journal of Plasticity**, v. 22, n. 7, p. 1195-1216, jul. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2005.07.004>

LIPPITZ, N.; RURKOWSKA, K.; RÖSLER, J.; LANGER, S. Fouling behaviour of porous metals. **Procedia Materials Science**, v. 4, p. 299-303, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.561>.

LOBO, F.; FERREIRA, M. E.; UCHOA, C.; COSTA, J. V. da. Uso de Plataformas Aéreas Não Tripuladas no Brasil – um Panorama de Dez Anos (2008-2018) de Publicações Acadêmicas. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 72, p. 785–806, 2020. DOI: 10.14393/rbcv72nespecial50anos-56503. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/56503>.

NIORDSON, C. F.; TVERGAARD, V. A homogenized model for size-effects in porous metals. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 123, p. 222-233, 2019. ISSN 0022-5096. DOI: 10.1016/j.jmps.2018.09.004.

PASSOS, D. da S., VENEGA, V. de S., & ROCHA, M. L. (2018). SOFTWARES PARA SUPORTE NO ENSINO DE ENGENHARIA CIVIL: UM MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DO USO NAS INSTITUIÇÕES BRASILEIRAS. **REVISTA CEREUS**, 9(4), 2-18. Disponível em: <http://ojs.unirg.edu.br/index.php/1/article/view/1865>.

PETERSEN, Kai; FELDT, Robert; MUJTABA, Shahid; MATTSSON, Michael. Systematic Mapping Studies in Software Engineering. In: **Proceedings of the 12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering**, v. 17, 2008.

PINDERA, M-J.; ABOUDI, J. Micromechanical analysis of yielding of metal matrix composites. **International Journal of Plasticity**, v. 4, n. 3, p. 195-214, jan. 1988. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0749-6419\(88\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0749-6419(88)90010-1).

PONTES, G.B da S.; **Análise não linear física de chapas considerando-se uma abordagem multiescala pelo método dos elementos de contorno**. Ilha Solteira: [s.n.], 2019 141 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2019.

MADOU, K.; LEBLOND, J. Numerical studies of porous ductile materials containing arbitrary ellipsoidal voids - I: Yield surfaces of representative cells. **European Journal of Mechanics - A/Solids**, v. 42, p. 480-489, nov. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2013.06.004>.

MONCHIET, V.; KONDO, D. Combined voids size and shape effects on the macroscopic criterion of ductile nanoporous materials. **International Journal of Plasticity**, v. 43, p. 20-41, abril de 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2012.10.007>.

NAKAJIMA, H. Fabrication, properties, and applications of porous metals with directional pores. **Proceedings of the Japan Academy, Ser. B**, v. 86, P. 884-899, 2010. Disponível em: <https://translate.google.com/website?sl=en&tl=pt&hl=pt-BR&prev=search&u=https://doi.org/10.2183%252Fpjab.86.884>.

NEEDLEMAN, A.; TVERGAARD, V. An analysis of ductile rupture in notched bars. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 32, n. 6, p. 461-490, 1984. ISSN 0022-5096. DOI: 10.1016/0022-5096(84)90031-0.

NIORDSON, C. F.; TVERGAARD, V. A homogenized model for size-effects in porous metals. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 123, p. 222–233, fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2018.09.004>. Acesso em: 1 jun. 2024.

OLIVEIRA, C. M. et al. RFID nos cuidados com a saúde: uma revisão de mapeamento sistemático. **Acta Biomédica Brasiliência**, vol. 9, n. 1, abril de 2018. Gale OneFile: Informe Acadêmico. Disponível em: <https://link.gale.com/apps/doc/A544711949/IFME?u=anon~83b57702&sid=googleScholar&xid=7fcb4176> >.

PASTOR, J.; PONTE CASTANEDA, P. Critérios de rendimento para meios porosos em deformação plana: estimativas de segunda ordem versus resultados numéricos. **Comptes Rendus Mécanique**, v. 330, n. 11, p. 741-747, 2002. DOI: 10.1016/S1631-0721(02)01526-7. Disponível em: [https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/mecanique/articles/10.1016/S1631-0721\(02\)01526-7](https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/mecanique/articles/10.1016/S1631-0721(02)01526-7)>.

PAULA, H. M. D.; ILHA, M. S. D. O. **Uso da Moringa oleifera no tratamento de águas residuárias de usinas de concreto**: mapeamento sistemático. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 11, n. 1, p. 50 - 60, 2016.

PETERSEN, K.; FELDT, R.; MUJTABA, S.; MATTSSON, M. **Systematic Mapping Studies in Software Engineering**. **School of Engineering**, Blekinge Institute of Technology. University of Bari, Italy, 26 - 27 June. 2008.

PITALUGA, C. G. **Análise em multi-escala de flexão de placas pelo método dos elementos de contorno**. Catalão: Dissertação (Mestrado) - Unidade Acadêmica Especial de Engenharia, Regional Catalão, Universidade Federal de Goiás, 2022.

Santa Anna, J. “Mapeamento sistemático Na Base De Dados Em Ciência Da Informação: Periódicos científicos Em discussão”. **Brazilian Journal of Information Science: Research Trends**, vol. 12, nº 1, maio de 2018, doi:10.36311/1981-1640.2018.v12n1.07.p68.

SANTOS, W. F. **Análise numérica do comportamento de microestruturas porosas**. 2018. 106 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão, 2018.

SANTOS, W. F. dos; FERREIRA, A. R.; PROENÇA, S. P. B. Complete geometric representation of yield surfaces for porous ductile media by a 3D computational homogenization approach: an assessment of the Gurson yield criterion. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 44, n. 5, 163, maio 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03483-1>. Acesso em: 24 jun. 2024.

SANTOS, W. F. dos; FERREIRA, A. R.; PROENÇA, S. P. B. Isotropic yield surfaces for porous ductile materials: complete geometric representation by a computational homogenisation procedure. **Engineering Computations**, v. 40, n. 4, p. 737-771, 15 jun. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/EC-12-2021-0718>. Acesso em: 24 jun. 2024.

SENA, J. P.; SILVA, W. A. da; SANTOS, I. C.; OLIVEIRA, M. H.; FERREIRA, M. de P. Atualização de modelos numéricos a partir de dados experimentais para monitoramento estrutural: mapeamento sistemático. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 18, n. 2, p. 60-71, 2022. DOI: [10.5216/reec.v18i2.63758](<https://doi.org/10.5216/reec.v18i2.63758>).

SÉNAC, C.; HURE, J.; TANGUY, B. Yield surface for void growth and coalescence of porous anisotropic materials under axisymmetric loading. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 179, 105365, out. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2023.105365>. Acesso em: 24 jun. 2024.

SHEN, W.Q.; CAO, Y.J.; SHAO, J.F.; LIU, Z.B. Prediction of plastic yield surface for porous materials by a machine learning approach. **Materials Today Communications**, v. 25, dez. 2020, 101477. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101477>. Acesso em: 24 jun. 2024.

SVOBODNIK, A. J.; BÖHM, H. J.; RAMMERSTORFER, F. G. A 3/D finite element approach for metal matrix composites based on micromechanical models. **International Journal of Plasticity**, v. 7, n. 8, p. 781-802, jan. 1991. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0749-6419\(91\)90018-T](https://doi.org/10.1016/0749-6419(91)90018-T). Acesso em: 16 jun. 2024.

UTSUNOMIYA, H.; MATSUMOTO, R. Deformation processes of porous metals and metallic foams (review). **Procedia Materials Science**, v. 4, p. 245-249, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.614>.

XENOS, S.; ARAVAS, N.; DANAS, K. A homogenization-based model of the Gurson type for porous metals comprising randomly oriented spheroidal voids. **European Journal of Mechanics - A/Solids**, v. 105, 105238, maio 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2024.105238>. Acesso em: 24 jun. 2024.