REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil Volume 14, Nº 2, 179-188
Jul 2018 - Dez 2018
www.reec.com.br
https://revistas.ufg.br/reec/index

MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DE REFERÊNCIAS DA ANÁLISE DE PLACAS COMPOSTAS POR MATERIAIS HETEROGÊNEOS ATRAVÉS DE UMA ABORDAGEM EM MULTIESCALA

Mapping study of references of the analysis of plates composed by heterogeneous materials through a multiscale modelling

Flávia Gonçalves Fernandes [1], **Gabriela Rezende Fernandes** [2], **Heber Martins de Paula** [3]

Recebido em 31 de outubro de 2017; aceito em 28 de dezembro de 2017; disponível on-line em 26 de abril de 2018.

PALAVRAS CHAVE:

Modelagem multiescala;
Homogeneização;
Elementos de contorno;
Flexão de placas;
Microestruturas.

KEYWORDS:

Multi-scale modelling;
Homogenization;
Boundary elements;
Plate bending;
Microstructures.

RESUMO: As microestruturas de alguns materiais são manipuladas adicionando novos constituintes, a fim de melhorar suas propriedades. Dessa forma, tem sido uma preocupação constante nesses estudos a introdução de modelos representativos do comportamento do material, para que o comportamento global da estrutura possa ser representado de uma maneira mais precisa e com menor custo computacional. Este trabalho apresenta uma revisão sistemática de estudos que investigaram vantagens e desvantagens em desenvolver modelos numéricos por meio de Métodos de Elementos de Contorno (MEC) em relação a utilizar Métodos de Elementos Finitos (MEF) e/ou acoplamento MEC/MEF em análise não-linear de placas compostas por materiais heterogêneos através de uma abordagem em multiescala utilizando Elementos de Volume Representativo (EVR). As fontes de pesquisa foram as seguintes bases de dados indexadas: Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Scopus, Conpemdex e Science Direct. Cabe destacar que a aplicação do Mapeamento Sistemático na elaboração de revisão bibliográfica permitiu identificar as principais lacunas para o desenvolvimento de novas pesquisas, além disso, direciona para as principais publicações ligadas ao estudo. Por fim, os resultados obtidos fornecem, de um lado, subsídios para formulação em multiescala apenas através do MEC e, de outro, evidenciam os resultados comparados com aqueles obtidos através da análise onde se faz o acoplamento MEC/MEF, a fim de verificar os resultados numéricos e indicar as vantagens e desvantagens dos dois tipos de modelagens.

ABSTRACT: *The microstructures of some materials are manipulated by adding new constituents in order to improve their properties. Thus, it has been a constant concern in these studies the introduction of representative models of the behaviour of the material, so that the overall behaviour of the structure can be represented in a more precise and lower computational cost. This work presents a systematic review of studies that have investigated advantages and disadvantages in developing numerical models through the methods of contour elements (BEM) in relation to using finite element methods (FEM and/or BEM/FEM coupling in non-linear analysis of plates composed by heterogeneous materials through a multiscale approach using representative Volume elements (RVE). The research sources were the following indexed databases: The Portal of periodicals for the coordination of improvement of staff of higher level (CAPES), Scopus, Conpemdex and Science Direct. It is important to highlight that the application of systematic mapping in the elaboration of bibliographical revision has allowed to identify the main gaps for the development of new research, in addition, directs to the major publications related to the study. Finally, the results obtained provide, on the one hand, subsidies for multiscale formulation only through BEM and, in addition, they demonstrate the results compared to those obtained through the analysis where the MEC/MEF coupling is made in order to verify the numerical results and indicate the advantages and disadvantages of the two types of modeling.*

*** Contato com os autores:**

[1] **e-mail: flavia.fernandes92@gmail.com (F. G. Fernandes)**
Doutoranda em Ciências Exatas e Tecnológicas, Professora Auxiliar do Departamento de Ciências da Computação - Unidade Acadêmica Especial de Biotecnologia, Universidade Federal de Goiás.

[2] **e-mail: gabrielar.fernandes@gmail.com (G. R. Fernandes)**
Doutora, Professora Adjunta, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia, Universidade Federal de Goiás.

[3] **e-mail: heberdepaula@ufg.br (H. M. de Paula)**
Doutor, Professor Adjunto, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia, Universidade Federal de Goiás.

ISSN: 2179-0612 DOI: 10.5216/reec.V14i2.50037 **© 2018 REEC - Todos os direitos reservados.**

1. INTRODUÇÃO

Nessa linha de raciocínio, modelar de forma detalhada a pré-existência de microfissuras ou defeitos iniciais na microescala, assim como sua formação e propagação quando a estrutura é sujeita a um dado carregamento, é muito importante para se ter uma boa reprodução do comportamento macromecânico de materiais heterogêneos (GAGG, 2005). Os materiais usados em engenharia são, em geral, heterogêneos em certa escala. O concreto e materiais cerâmicos são naturalmente heterogêneos, já os materiais metálicos são heterogêneos ao nível dos grãos (SCUTTI; MCBRINE, 2002). Para se conseguir reproduzir de forma mais confiável o comportamento desses materiais, se faz necessário a modelagem em diferentes escalas, onde através de princípios de homogeneidade e conceito de média volumétrica, passa-se da microescala para a macroescala (GHOSH; LEE; MOORTHY, 1996). Adotando-se modelos constitutivos simples na microescala, como, por exemplo, modelos elastoplásticos, viscoplásticos ou de contato, a modelagem em multiescala consegue reproduzir comportamentos macromecânicos complexos, como por exemplo, a perda de rigidez devido ao processo de danificação do material (TERADA et al., 2000).

Para se fazer a modelagem em multiescala, deve-se definir no domínio do macrocontínuo pontos de interesse que são chamados de EVR (Elemento de Volume Representativo), que representam a microestrutura, ao nível dos grãos, do macrocontínuo na vizinhança infinitesimal do ponto (KOUZNETSOVA et al., 2002). A formação e propagação de microfissuras são monitoradas individualmente em cada EVR, através do modelo adotado na microescala. Assim, considerando-se uma estrutura sujeita a um carregamento qualquer, através do modelo na macroescala, obtêm-se para cada EVR o campo de deformações, que deverá ser prescrito no mesmo como condição de contorno (KOUZNETSOVA et al., 2004). Então, utilizando-se o modelo adotado na microescala, estuda-se o comportamento do material no EVR devido à solicitação dada. Em seguida, através de princípios de homogeneidade e conceito de média volumétrica, passa-se da microescala para a macroescala e atualizam-se a tensão e a relação constitutiva para aquele ponto. Com esses valores atualizados para cada ponto do macro, dá-se novo incremento de carga obtendo-se, através do modelo na macroescala, novos campos de deformações a serem aplicados nos EVRs. Portanto, a análise na microescala alimenta aquela na macroescala e vice-versa (NEMAT-NASSER et al., 1999).

O EVR pode ser constituído por vazios e diferentes fases, podendo-se adotar para cada fase um material com comportamento elástico ou governado por algum modelo constitutivo (CLAYTON; MCDOWELL, 2003). Para o concreto, por exemplo, a argamassa seria a matriz, que é definida como uma fase com suas propriedades elásticas e modelo constitutivo apropriado para representar seu comportamento (LADEVE`ZE, 2004). Os agregados são definidos como inclusões dentro da matriz e podem ter propriedades elásticas e modelo constitutivo diferentes da matriz. Poderão ser considerados na interface matriz/agregado elementos finitos coesivos, que são regidos por uma lei de fratura coesiva ou uma lei de contato, para simular o descolamento na interface agregado-cimento do material, que ocorre durante o processo de fissuração do concreto, por exemplo (GHOSH et al., 2001).

A modelagem em multiescala através do acoplamento MEC/MEF, está descrita por Fernandes et al. (2015), onde são analisadas estruturas compostas de materiais do tipo MMC (Compósitos de Matriz Metálica). Nesses modelos, podem ser consideradas diferentes condições de contorno no EVR: (i) modelo de Taylor, (ii) deslocamentos lineares, (iii) deslocamentos com variações periódicas e forças de superfície antiperiódicas e (iv) forças de superfície uniformes.

A formulação não-linear do MEC a ser usada na análise na macroescala foi desenvolvida

por Fernandes (2003). Porém, foi modificada por Fernandes et al. (2013) a fim de melhorar a convergência do processo iterativo. Alternativamente, pode ser utilizada nas análises numéricas uma formulação em multiescala, onde tanto a macro como a microescala são modeladas pelo MEC, sem necessidade do acoplamento MEC/MEF. Nesse caso, os resultados podem comparados com aqueles obtidos através do acoplamento MEC/MEF, a fim de verificar os resultados numéricos e indicar as vantagens e desvantagens dos dois tipos de modelagens. Na placa (macrocontínuo), pode ser considerado o problema de flexão simples ou o problema bidimensional particularizado para o caso de estado plano de tensão (problema de chapa).

Caso sejam analisadas estruturas de materiais frágeis, como o concreto, por exemplo, para se passar da microescala para a macroescala deve ser definido um critério que indique uma possível abertura de fissura no macro, de acordo com o processo de fissuração ocorrido no EVR. Ou seja, deve ser desenvolvido um critério a ser aplicado no macrocontínuo que defina, após a solução do EVR, se há localização de processos de danificação no macro.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é verificar o panorama das pesquisas relacionadas sobre desenvolvimento de modelos numéricos, através do acoplamento MEC/MEF ou utilizando-se apenas o Método dos Elementos de Contorno (MEC), para análise não-linear em multiescala de placas compostas de materiais heterogêneos, apresentando um estudo sistêmico acerca do que vem sendo publicado para tal vertente.

3. METODOLOGIA

Para a revisão da literatura, foi desenvolvido um mapeamento sistemático (mapping study), de acordo com a metodologia proposta por Bailey et al., (2007) e Petersen et al. (2008), que consiste na busca de estudos cadastrados em bases de dados por meio de operadores lógicos para a seleção dos artigos, a partir da seleção de palavras ou expressões chave. Esta técnica de mapeamento sistemático também foi utilizada por Paula et al., (2016), Bonfim et al., (2017) e Rodrigues et al., (2017).

As bases de dados consideradas foram: Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, 2017), Scopus (2017), Compendex (ENGINEERING VILLAGE, 2017) e Science Direct (2017), bases disponíveis na Universidade Federal de Goiás. Vale ressaltar que foram analisados somente artigos de periódicos revisados por pares.

As expressões lógicas empregadas foram: (a) multiscale AND "boundary elements" e (b) plate bending AND "boundary elements". Foram escolhidas estas strings para buscar trabalhos que envolvam métodos de elementos de contorno aplicados em placas com abordagem em multiescala.

Após a busca inicial, foram adotados como filtros: o idioma (inglês e português); sem restrição da área de conhecimento e o tipo de publicação (artigo de periódico revisado por pares). Aplicados os filtros em cada base de dados, os artigos foram classificados pelo ano de publicação e pelos títulos, observando as possíveis repetições entre as bases de dados.

Após a busca inicial, foram adotados como filtros: o idioma (inglês e português); sem restrição da área de conhecimento e o tipo de publicação (artigo de periódico revisado por pares). Aplicados os filtros em cada base de dados, os artigos foram classificados pelo ano de publicação e pelos títulos, observando as possíveis repetições entre as bases de dados.

A etapa final de seleção dos artigos foi efetuada a partir da leitura e análise dos títulos e resumos, de modo a excluir aqueles trabalhos que não se relacionavam diretamente ao tema em estudo, sendo a revisão da bibliografia desenvolvida a partir do número final de estudos obtido.

Para isso, os critérios utilizados para leitura dos títulos e resumos dos artigos foram: se

continham as palavras-chaves, e se as mesmas estavam aderentes ao contexto almejado que, neste caso, refere-se às pesquisas envolvendo métodos de elementos de contorno aplicados em placas com abordagem em multiescala. Neste sentido, trabalhos que abordavam temáticas diferentes foram descartados.

A finalidade deste mapeamento sistemático é analisar as referências dos trabalhos realizados envolvendo a temática sobre placas com abordagem em multiescala por meio do método numérico de elementos de contorno. E, com isso, verificar a ascensão desta linha de pesquisa na atualidade.

4. RESULTADOS

Após a realização das buscas nas bases de dados, os resultados obtidos foram organizados em forma de gráficos e tabelas com a finalidade de apresenta-los de maneira mais prática. A Tabela 1 apresenta os resultados totais obtidos no mapeamento e a Figura 1 apresenta a evolução da publicação dos artigos de periódicos levantados, considerando-se as citadas palavras-chave e a data limite de agosto de 2017.

Dessa forma, por meio do mapeamento sistemático foi criado um banco de dados com 15 (quinze) referências de bases de dados para a string "Multiscale AND boundary elements" e 25 (vinte e cinco) referências para a string "Plate bending AND boundary elements", totalizando 40 referências aderentes ao trabalho. Algumas bases de dados apresentaram grande número de artigos repetidos entre si, e alguns dos artigos dessas bases que foram classificados em aderentes quanto ao título e resumo possuíam acesso restrito ao texto completo, inviabilizando a sua utilização. A string "Plate bending AND boundary elements" foi a que apresentou maior porcentagem de artigos com título e resumo aderentes e acesso ao texto completo selecionados após o resultado inicial.

A evolução da publicação anual dos artigos selecionados na busca internacional pode ser vista na Figura 1, onde é possível notar que os artigos envolvendo o assunto abordado neste trabalho foram publicados nas últimas décadas, sendo que houve um aumento das publicações a partir do ano de 2000. No contexto nacional, o ano de 2010 pode ser considerado como um marco para início das publicações sobre esse tema. Dessa forma, observa-se que o assunto é recente e com grandes possibilidades de campos a serem explorados.

TABELA 1: Síntese dos resultados obtidos nas pesquisas nas bases de dados.

	Expressões-chave			
BASE DE DADOS	***Multiscale AND* "boundary elements"**		***Plate bending AND* "boundary elements"**	
	Número de artigos			
	Inicial	**Com título aderente**	**Inicial**	**Com título aderente**
Periódicos Capes	509	31	723	54
Scopus	107	14	498	40
Compendex	20	8	226	24
Science Direct	187	26	487	28
Total	823	79	1934	146
Número total de artigos sem repetições entre as bases de dados	36		97	
Número de artigos selecionados após leitura do título e resumo	15		25	

FONTE: Autoria Própria.

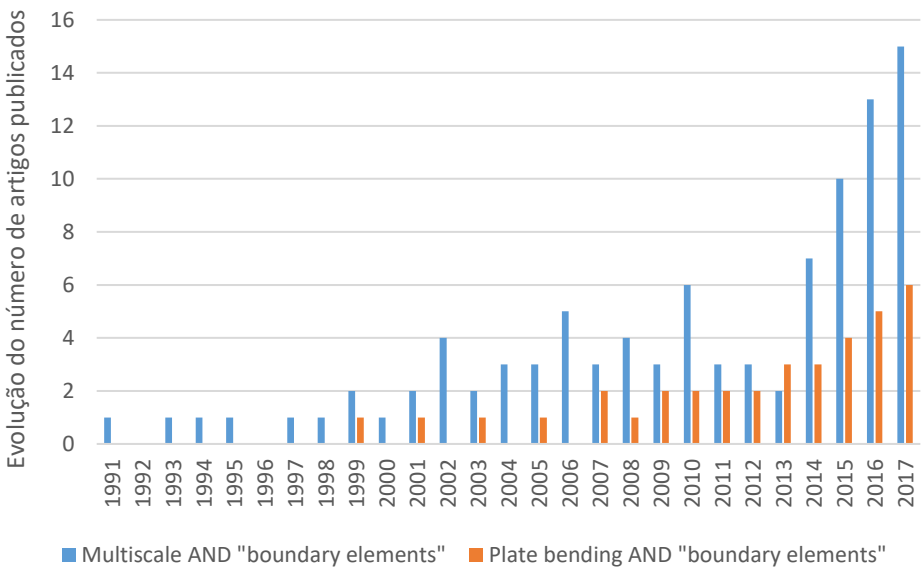

FIGURA 1: Evolução da publicação de artigos levantados em função das palavras-chave empregadas no mapeamento.
FONTE: Autoria Própria.

Após a leitura dos artigos selecionados, a partir da leitura do resumo, foram identificados dois tópicos principais para o agrupamento dos resultados obtidos, quais sejam: (a) análise de placas com abordagem em multiescala utilizando Métodos de Elementos Finitos (MEF) e (b) análise de placas com abordagem em multiescala utilizando acoplamento entre Métodos de Elementos de Contorno e Métodos de Elementos Finitos (MEC/MEF).

Os principais periódicos em que foram publicados artigos sobre estes tópicos são apresentados na Tabela 2.

A Figura 2 apresenta o número de artigos de periódicos publicados por países. Os trabalhos publicados são de diferentes países, tais como: Estados Unidos, Alemanha, Brasil, China, Áustria, Itália, França, Japão e Coréia do Sul. Na América do Sul, foram encontrados trabalhos desenvolvidos apenas no Brasil que abordem esse tema.

TABELA 2: Principais periódicos com artigos no tópico "análise de placas com abordagem multiescala".

Periódico	**Número de artigos publicados**
Engineering Analysis with Boundary Elements	4
International Journal for Multiscale Computational Engineering	2
Composites Science and Technology	2
Computational Mechanics	2
Journal of Multiscale Modeling	2
Revista Matéria	2

FONTE: Autoria Própria.

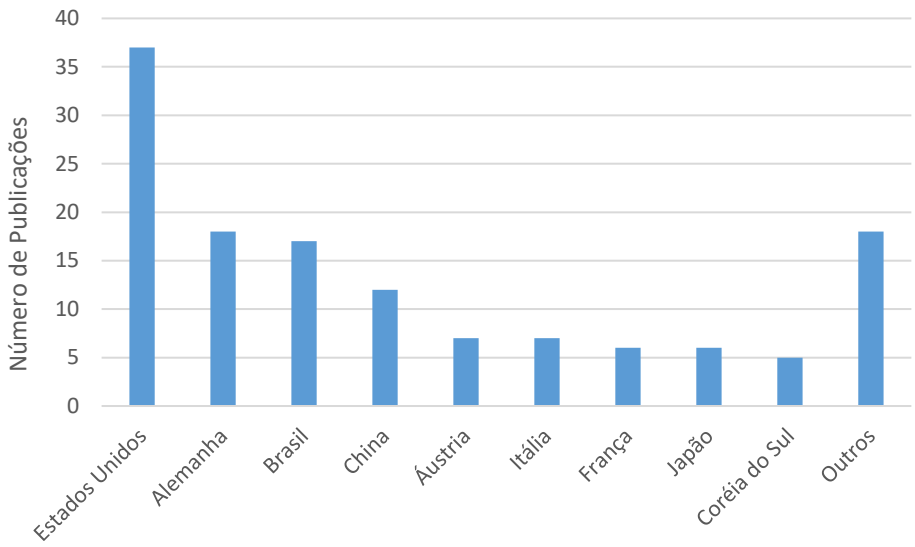

FIGURA 2: Principais países, entre os artigos selecionados, com publicações dentro do tópico "análise de placas em abordagem multiescala". **FONTE**: Autoria Própria.

Desse modo, a pesquisa sobre "análise de placas com formulação em multiescala" também possibilita novos temas que podem ser explorados. Foram encontrados nove trabalhos que utilizam abordagem realizada por Método de Elementos Finitos (MEF), apenas um trabalho com abordagem por Método de Elementos de Contorno (MEC), e quatro trabalhos que fazem uso desta formulação por acoplamento entre dois métodos – Métodos de Elementos de Contorno e Métodos de Elementos Finitos (MEC/MEF). Assim, vê- se a possibilidade de investigar melhor sobre a formulação em multiescala de placas utilizando apenas MEC, visto que ainda é uma área pouco investigada.

A Figura 3 apresenta as principais vertentes identificadas nos artigos de periódicos dentro do tópico "análise de placas com abordagem multiescala" em forma de porcentagem: 64% dos trabalhos encontrados utilizam formulação utilizando Métodos de Elementos Finitos, 29% abordam acoplamento MEC/MEF e apenas 7% fazem uso apenas do Método de Elementos de Contorno , indicando que esta técnica pode ser investigada de maneira mais aprofundada a fim de se descobrir melhor suas vantagens e desvantagens com relação aos outros métodos utilizados com maior frequência pela literatura.

A variedade de métodos numéricos encontrados neste mapeamento demonstra o potencial que os métodos de elementos finitos e de elementos de contorno possuem na análise de placas com abordagem multiescala. Nesse contexto, os principais autores encontrados com pesquisas relacionadas a esse tópico estão apresentados na Tabela 3.

Nas análises da macro e microescalas, podem ser usadas tanto formulações do Método dos Elementos Finitos (MEF) como do Método dos Elementos de Contorno (MEC). A grande maioria dos trabalhos publicados utiliza apenas o MEF para fazer a modelagem em multiescala (RAGHAVAN; GHOSH, 2005). Atualmente, têm-se poucos trabalhos que adotam o MEC para modelar uma escala ou ambas. Em dois trabalhos encontrados, faz-se a análise de problemas bidimensionais, sendo que Mrozek et al. (2007), os autores mostram o acoplamento do MEC com um modelo atômico, e Santos et al. (2007) faz-se a modelagem do processo de danificação no material, através de uma formulação em multiescala onde o MEC é usado para modelar macro e microescalas. Além disso, em Santos et al. (2007), também é discutido o acoplamento do MEC na microescala com o MEF na macroescala. Mais recentemente, Fernandes (2015) desenvolveu uma formulação para análise em multiescala através do acoplamento MEC/MEF, onde o MEC é adotado para modelar a macroescala

utilizando-se a formulação proposta por Fernandes (2013), e o MEF é considerado na microescala de acordo com a formulação desenvolvida por Peric et al. (2010).

Como destaque, a autora identificada na Tabela 3 com maior número de publicações referentes aos tópicos abordados neste trabalho produz evoluções constantes.

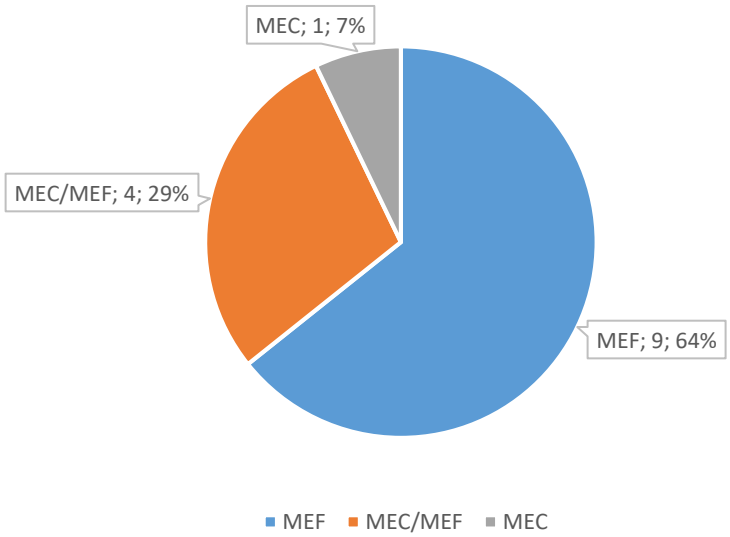

FIGURA 3: Porcentagem das vertentes identificadas nos artigos de periódicos dentro do tópico "análise de placas com abordagem multiescala". **FONTE**: Autoria Própria.

TABELA 3: Principais pesquisadores com artigos dentro do tópico "análise de placas com abordagem multiescala".

Pesquisador	N. de publicações	Período
Fernandes, G.R.	6	2014 a 2017
Sfantos, S. K.	2	2007 e 2009
Gulizzi, V.	1	2015
García, I. G.	1	2015
Moraes, D. H.	1	2014
Peng, Z.	1	2011
Burczyński, T.; Mrozek, A. Górski, R.; Kuś, W.	1	2010
Liu, Y. J.	1	2008

FONTE: Autoria Própria.

5. CONCLUSÕES

Através do mapeamento realizado, foi possível verificar que houve uma valorização do estudo da análise de placas heterogêneas em abordagem multiescala no contexto da engenharia das estruturas. O Método de Elementos Finitos já possui vasta pesquisa realizada mundialmente. Porém, A formulação em multiescala apenas com o Método de Elementos de Contorno é um campo a ser explorado.

Em virtude disso, há possibilidades para desenvolvimento de pesquisas sobre modelos numéricos, através do Método dos Elementos de Contorno (MEC), para análise não-linear em multiescala de placas compostas de materiais heterogêneos. Ao utilizar a formulação em multiescala através apenas do MEC, os resultados podem ser comparados com aqueles obtidos através da análise onde se faz o acoplamento MEC/MEF, a fim de verificar os resultados numéricos e indicar as vantagens e desvantagens dos dois tipos de modelagens.

Nessa linha de raciocínio, verifica-se que este trabalho possui alta viabilidade, uma vez que possui baixo custo financeiro, é importante para o avanço tecnológico e científico na área de engenharia de estruturas, visto que se trata de uma análise numérica de estruturas compostas por materiais heterogêneos, considerando-se uma abordagem em multiescala, e se insere nas seguintes linhas de pesquisa: estruturas de edifícios, mecânica de materiais, modelos numéricos baseados nos métodos dos elementos de contorno, finitos e combinações deles.

Por fim, cabe destacar que a aplicação do mapeamento sistemático na elaboração de revisão bibliográfica permite identificar as principais lacunas para o desenvolvimento de novas pesquisas. Além disso, direciona para as principais publicações ligadas ao estudo.

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: 18 ago. 2017.

___. **Engineering Village**. 2017. Disponível em: <https://www.engineeringvillage.com>. Acesso em: 18 ago. 2017.

___. **Science Direct**. 2017. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/>. Acesso em: 18 ago. 2017.

___. **Scopus**. 2017. Disponível em: <https://www.scopus.com/>. Acesso em: 18 ago. 2017.

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.

BONFIM, W. B.; BALDIN, V.; PEREIRA, R. R.; PAULA, H. M. **Lama residual de usinas de concreto: características e aplicações na confecção de blocos**. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 13, n. 2, p. 32 - 43, 2017.

CLAYTON, J.D.; MCDOWELL, D.L.. **Finite polycrystalline elastoplasticity and damage**: multiscale kinematics, *Int. J. Solids Struct*. 40 (2003) 5669–5688.

FERNANDES, G. R. **A BEM formulation for linear bending analysis of plates reinforced by beams considering different materials**. *Engineering Analysis with Boundary Elements*., v.33, p.1132 - 1140, 2009.

FERNANDES, G. R. **Análise não-linear de estruturas de pavimentos de edifício através do método dos elementos de contorno**. *Tese (Doutorado) - EESC-USP*, 2003.

FERNANDES, G. R. **Aplicação do método dos elementos de contorno a análise não-linear de placa de pavimentos de edifícios**. *Dissertação (Mestrado) - EESC-*USP, 1998.

FERNANDES, G. R.; CHAVES, E. W. V.; VENTURINI, W. S.. **Plate Bending Boundary Element Formulation Considering Variable Thickness**. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. , v.23, p.405 - 418, 1999.

FERNANDES, G. R.; DENIPOTTI, G. J.; KONDA, D. H.. **A BEM formulation for analysing the coupled stretching-bending problem of plates reinforced by rectangular beams with columns defined in the domain**. *Computational Mechanics*. , v.45, p.523 - 539, 2010.

FERNANDES, G. R.; KONDA, D. H.. **A BEM formulation based on Reissner's theory to perform simple bending analysis of plates reinforced by rectangular beams**, *Computational Mechanics*. , v.42, p.671 - 683, 2008.

FERNANDES, G. R.; PITUBA, J. J. C.; SOUZA NETO, E. A. **Multi-Scale modelling for bending analysis of heteregeneous plates by coupling BEM and FEM**. Engineering Analysis with Boundary Elements. v. 51 p.1-13, 2015.

FERNANDES, G. R.; PITUBA, J. J. C.; SOUZA NETO, E. A.. **FEM/BEM formulation for multi-scale analysis of stretched plates**. Engineering Analysis with Boundary Elements.V. 54 p.47-59, 2015.

FERNANDES, G. R.; ROSA NETO, J.. **Analysis of stiffened plates composed by different materials by the boundary element method**. Structural Engineering and Mechanics, an International Journal. v.56 No.4 p.605-623, 2015.

FERNANDES, G. R.; SOUZA NETO, E. A.. **Self-consistent linearization of non-linear BEM formulations with quadratic convergence**. *Computational Mechanics* v.52, p.1125 - 1139, 2013.

FERNANDES, G. R.; VENTURINI, W. S.. **Building floor analysis by the Boundary element method**. *Computational Mechanics*. , v.35, p.277 - 291, 2005.

FERNANDES, G. R.; VENTURINI, W. S.. **Non-linear boundary element analysis of floor slabs reinforced with rectangular beams**. *Engineering Analysis with Boundary Element*s. , v.31, p.721 - 737, 2007.

FERNANDES, G. R.; VENTURINI, W. S.. **Non-Linear Boundary Element Analysis of Plates Applied to Concrete Slabs**. *Engineering Analysis with Boundary Elements*., v.26, p.169 - 181, 2002.

FERNANDES, G. R.; VENTURINI, W. S.. **Stiffined Plate Bending Analysis by the Boundary Element Method**. *Computational Mechanics*. , v.28, p.275 - 281, 2002.

FURTADO, A.S.; PITUBA, J.J.C.; FERNANDES, G.R. **Análise da influência de microestruturas heterogêneas na resposta macromecânica do problema bidimensional de placas**. Revista Matéria, doi: 10.1590/S1517-707620170002.0162, v. 22, n. 2, 2017.

GAGG, C.R.. **Failure of components and products by 'engineered-in' defects**: case studies, *Engrg. Fail. Anal*. 12 (2005) 1000–1026.

GHOSH, S.; KYUNGHOON, L.; RAGHAVAN, P.. **A multi-level computational model for multi-scale damage analysis in composite and porous materials**, *Int. J. Solids Struct*. 38 (2001) 2335–2385.

GHOSH, S.; LEE, K.; MOORTHY, S.. **Two scale analysis of heterogeneous elastic–plastic materials with asymptotic homogenisation and Voronoi cell finite element model, *Comput****.*** *Methods Appl. Mech. Engrg*. 132 (1996) 63–116.

GIUSTI. S. M.; BLANCO, P. J.; SOUZA NETO, E. A.; FEIJOO, R. A.. **An assessment of the Gurson yield criterion by a computational multi-scale approach**, *Engineering Computations*, v. 26 n. 3 (2009) 281-301.

JÚNIOR,S.S.N.; FERNANDES, G.R.; PITUBA, J.J.C. **Formulação multi-escala para a análise de flexão de placas considerando processos dissipativos na microestrutura e acoplamento MEC/MEF**. Revista Matéria, doi: 10.1590/S1517-707620170002.0153, v.22, n.2, 2017.

KOUZNETSOVA, V.; GEERS, M.G.D.; BREKELMANS, W.A.M.. **Multi-scale constitutive modelling of heterogeneous materials with a gradientenhanced computational homogenization scheme**, *Int. J. Numer. Methods Engrg*. 54 (2002) 1235–1260.

KOUZNETSOVA, V.; GEERS, M.G.D.; BREKELMANS, W.A.M.. **Multi-scale second-order computational homogenization of multi-phase materials: a nested finite element solution strategy**, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*. 193 (2004) 5525–5550.

LADEVE`ZE, P.. **Multiscale modelling and computational strategies for composites**, *Int. J. Numer. Methods Engrg*. 60 (2004) 233–253.

MROZEK, A.; KUŚ, W.; BURCZYŃSKI, T.. **Application of the coupled boundary element method with atomic model in the static analysis**, *Computer methods in materials science*, vol. 7, 2007, No. 2, 284-288.

NEMAT-NASSER, S.. **Averaging theorems in finite deformation plasticity**, *Mech. Mater*. 31 (1999) 493–523.

NEMAT-NASSER, S.; HORI, M.. **Micromechanics**: Overall Properties of Heterogeneous Materials, *Elsevier Science*, Amsterdam, 1999.

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.

PERIC, D.; SOUZA NETO, E. A.; FEIJÓO, R.; PARTOVI, M.; MOLINA, A. C.. **On Micro-to-Macro Transitions for Multiscale Analysis of Heterogeneous Materials**: Unified Variational Basis and Finite Element Implementation, *Int. J. Numer. Methods Engrg.* (published online 13 Sept 2010. DOI: 10.1002/nme.3014).

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.

PITUBA, J. J. C.. **Sobre a formulação de um modelo de dano para o concreto**. *Tese (Doutorado) - EESC-USP*, 2003.

PITUBA, J. J. C.; SOUZA NETO, E. A. . **Charazterization of Macroscopic Mechanical Behavior of Concrete with Mesoscopic Scale Finite Element Analysis**. In: 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS 2012, Viena. p. 6835-6849.

RAGHAVAN, P.; GHOSH, S.. **A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding**, *Mech. Mater*. 37 (2005) 955–979.

RODRIGUES, K. C.; MESQUITA, H. C.; EDUARDO, R. C.; PAULA, H. M. **Mapeamento sistemático de referências do uso do BIM na compatibilização de projetos na construção civil**. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 13, n. 1, p. 219 - 239, 2017.

SAAVEDRA-FLORES, E. I.; SOUZA NETO, E. A.; PEARCE, C.. **A large strain computational multi-scale model for the dissipative behaviour of wood cell-wall**. *Computational Materials Science*, 50(3): 1202-1211, 2011. DOI: 10.1016/j.commatsci.2010.11. 023.

SANTOS, G. K.; ALIABADI, M. H.. **Multi-scale boundary element modelling of material degradation and fracture**, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*. 196 (2007) 1310–1329.

SCUTTI, J.J.; MCBRINE, W.J.. **Failure Analysis and Prevention**, *in: W.T. Becker, R.J. Shipley (Eds.), ASM Handbook*, vol. 11, ASM, USA, 2002.

SOMER, D. D.; SOUZA NETO, E. A.; DETTMER, W. G.; PERIC, D.. **A sub-stepping scheme for multi-scale analysis of solids**, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*. 198 (2009) 1006–1016.

SOUZA NETO, E.A.; FEIJOO, R. A. (2006). **Variational foundations of multi-scale constitutive models of solid**: Small and large strain kinematical for-mulation, *In M Vaz Jr., EA de Souza Neto and P Munoz-Rojas, editors, Computational Materials Modelling: From Classical to Multi-Scale Techniques*, Wiley, Chichester, 2010.

TERADA, K.; HORI, M.; KYOYA, T.; KIKUCHI, N.. **Simulation of the multiscale convergence in computational homogenization approaches**, *Int. J. Solids Struct*. 37 (2000) 2285–2311.

WATANABE, I.; TERADA, K.; SOUZA NETO, E. A.; PERIC, D.. **Characterization of macroscopic tensile strength of polycrystalline metals with two-scale finite element analysis**, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 56 (2008) 1105–1125.