



**MODELAGEM DO PROCESSO DE FALHAS EM PAREDES DE
ALVENARIA BASEADA NA UTILIZAÇÃO DE ELEMENTOS
FINITOS DE INTERFACE E MODELOS DE DANO CONTÍNUO**

**MODELING OF THE FAILURE PROCESS IN MASONRY WALLS
BASED ON THE USE OF INTERFACE FINITE ELEMENTS AND
CONTINUUM DAMAGE MODELS**

André N. Tayer

Luís A. G. Bitencourt Jr.

adntayer@usp.br

luis.bitencourt@usp.br

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Av. Prof. Almeida Prado, trav. 2, 271, Universidade de São Paulo - USP, 05508-900, São Paulo-SP, Brasil

Osvaldo L. Manzoli

omanzoli@feb.unesp.br

Universidade Estadual Paulista

Av. Eng. Luís Edmundo Carrijo Coube, 14-01, 17033-360, Bauru-SP, Brasil

Resumo. Este artigo propõe um modelo numérico em mesoescala para a representação computacional de falhas em paredes de alvenaria não armadas submetidas a carregamento estático no plano. Desta forma, blocos e juntas de argamassa serão modelados individualmente. O bloco será representado através de elementos finitos triangulares de três nós usuais com comportamento elástico linear, enquanto que as juntas de argamassa serão representadas utilizando elementos finitos de elevada razão de aspecto. A grande vantagem desta estratégia é a possibilidade de emprego de um modelo constitutivo contínuo para descrever o comportamento de descontinuidades devido à semelhança entre a cinemática dos elementos de interface e aquela apresentada pela Aproximação Contínua de Descontinuidades Fortes (ACDF), usualmente empregada para representar fratura em sólidos. Um modelo composto contínuo baseado na mecânica do dano relacionando tensão vs deformação com uma integração implícita-explicita é proposta para avaliar o comportamento das juntas. A validação do modelo proposto será realizada comparativamente com resultados disponíveis na literatura.

Keywords: paredes de alvenaria, modelo em mesoescala, elemento de interface, modelo de dano contínuo.

Abstract. This paper proposes a new approach to simulate the failure process in masonry walls subject to static in-plane loading. By this mean, units and mortar joints are modeled separately. The main novelty is the application of the interface finite elements with high aspect ratio in the context of a mesh fragmentation approach to describe the behavior of the mortar joints. These elements present the same kinematics as the Continuum Strong Discontinuity Approach (CSDA) when their aspect ratio increases, allowing the application of a continuum constitutive model to describe its behavior, usually employed in solids failure. Thus, a composed continuum damage model with an implicit-explicit integration scheme is proposed to describe the behavior of the mortar joints. Comparisons with results available in literature have been performed in order to validate the proposed model.

Keywords: masonry walls, mesoscale model, interface finite element, continuum damage model.

1 INTRODUCTION

Estruturas em alvenaria estão presentes na cultura ocidental desde os tempos antigos tendo sua execução realizada de modo empírico (rule of thumb) ou ainda por passagem de conhecimento entre as gerações. Devido ao alto valor histórico para a sociedade, administrações públicas, junto a comunidade científica, buscam não só a conservação e preservação dessas estruturas bem como garantir a segurança de seus visitantes. Uma das técnicas para modelar numericamente fissuras em estruturas é a incorporação de elementos de interface na malha de elementos finitos original para simular as descontinuidades impostas pela própria geometria. Tendo isso em vista, nas últimas duas décadas, diversos modelos numéricos têm sido desenvolvidos com a finalidade de estudar o comportamento mecânico de estruturas de alvenaria com diversas técnicas de abordagem (Manos et al., 2012; Vandoren et al., 2013; Salát, 2015; Drougkas et al., 2015; Toti et al., 2015; Tesei and Ventura, 2016; Smoljanović et al., 2015; Greco et al., 2016; Milani et al., 2014; Addessi et al., 2014; Macorini and Izzuddin, 2013; Facconi et al., 2013).

Existem três abordagens numéricas clássicas no contexto das estruturas de alvenaria: macroescala, microescala e mesoescala (microescala simplificada) (Lourenco, 1996). Na abordagem em macroescala, o bloco e a argamassa são transformados em um único material isotrópico com propriedades homogenizadas. Na abordagem em microescala, o bloco e a argamassa são representados separadamente. A superfície entre as juntas de argamassa e o bloco são representadas por elementos finitos de interface enquanto o bloco e a argamassa permanecem como elementos finitos usuais. Por fim, em uma abordagem em mesoescala, o bloco e argamassa também são modelados como materiais distintos, porém as juntas de argamassa assumem a função de elementos de interface enquanto o bloco tem suas dimensões expandidas para a manutenção da geometria do problema.

Neste artigo é proposto um novo modelo numérico em mesoescala com a utilização de elementos finitos de interface de elevada razão de aspecto (Manzoli et al., 2012) para representar a argamassa em estruturas de alvenaria. A grande vantagem deste elemento, consiste no tratamento do campo de deformações que, ao invés de ser tratado na forma discreta (relação tensão vs deslocamento), é formulado de forma contínua (relação tensão vs deformação) para representar um problema descontínuo. A descontinuidade cinemática do problema é escrita por um modelo contínuo usando a similaridade existente entre os campos de deformações do elemento de interface e da Aproximação Contínua de Descontinuidades Fortes (ACDF) (Oliver et al., 2015; Oliver et al., 1999). Desta maneira, o elemento representa bem as descontinuidades do comportamento mecânico encontrado em estruturas de alvenaria. Outra vantagem é sua robustez, uma vez que todos os modelos constitutivos são integrados utilizando uma técnica implícita-explícita (IMPL-EX) que evita problemas de descontinuidade em problemas altamente não lineares, como são os casos envolvendo múltiplas fissuras (Oliver et al., 2008; Prazeres et al., 2016).

2 MODELO NUMÉRICO PROPOSTO

O modelo numérico proposto baseia-se na aplicação de elementos finitos de interface com elevada razão de aspecto (Manzoli et al., 2012) para representar a argamassa entre os blocos de alvenaria. Essa abordagem, denominada técnica de fragmentação de malha (Manzoli et al., 2016), permite a utilização de modelo constitutivo contínuo para descrever o comportamento

das descontinuidades (possíveis caminhos de propagação de fraturas) devido a similaridade entre os campos de deformações dos elementos de interface quando sua espessura tende a zero e da Aproximação Contínua de Descontinuidades Fortes (ACDF).

A Figura 1(a) ilustra a aplicação da técnica de fragmentação em uma parede de alvenaria. Inicialmente, a parede é discretizada em elementos finitos de três nós, e o algoritmo desenvolvido mapeia o contorno entre os blocos, onde serão inseridos os elementos finitos de interface. Para cada aresta (face) definida por dois nós de um elemento do bloco (em branco), uma par de elementos finitos de interface (em azul) é inserido (Figura 1(b)).

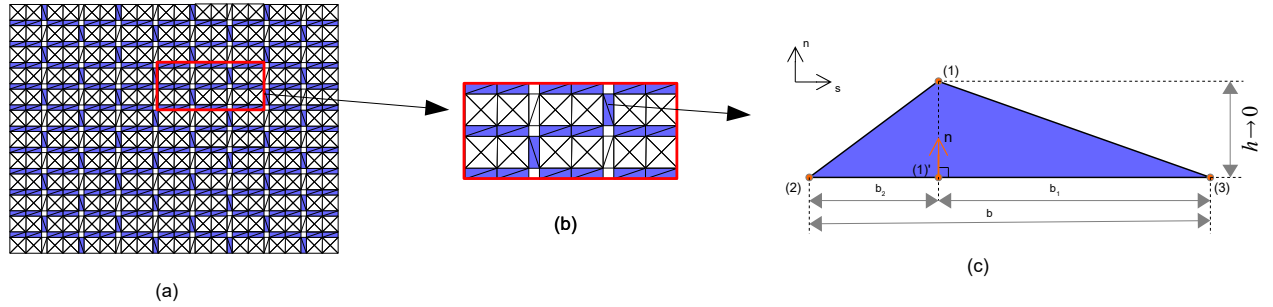


Figura 1: Fragmentação de malha: (a) parede com os elementos finitos de interface, (b) detalhe da inserção de elementos de interface, e (c) elemento finito de interface

A Figura 1(c) ilustra o elemento finito de interface. Esse elemento possui sua base definida pelos nós (2) e (3) e sua altura h definida pelo nó (1) e sua projeção na base (1'). Quando sua altura tende a zero ($h \rightarrow 0$), seu campo de deformações pode ser escrito como:

$$\varepsilon = \tilde{\varepsilon} + \hat{\varepsilon} = \tilde{\varepsilon} + \frac{1}{h}(n \otimes \llbracket u \rrbracket)^S \quad (1)$$

onde $\tilde{\varepsilon}$ é o vetor que contém todas as componentes de deformação que depende da base b e $\hat{\varepsilon}$ contém todas as componentes de deformação que dependem da altura h . A notação $(\bullet)^S$ indica a parte simétrica de $(\bullet)$, $\otimes$ é o produto diádico, n é o versor normal a base do elemento e $\llbracket u \rrbracket$ é o vetor do salto no campo de deslocamento, ou seja, a distância entre o nó (1) e sua projeção (1').

Na Equação 1, quando a largura de banda $h \rightarrow 0$, o campo de deformações pode ser descrito por uma parcela limitada $\tilde{\varepsilon}$ e outra ilimitada $\frac{1}{h}(n \otimes \llbracket u \rrbracket)^S$. Desta forma, na situação limite, o campo de deformações do elemento de interface é definida majoritariamente pelos deslocamentos entre o nó (1) e sua projeção na base (1'). Mais detalhes sobre a formulação do elemento finito de interface podem ser encontrados em (Manzoli et al., 2012).

3 MODELO CONSTITUTIVO DA ARGAMASSA

O modelo da argamassa é composto por dois modelos baseados da mecânica do dano contínuo aplicados em serie:

(a) primeiramente, aplica-se o modelo de dano J_2 , cujo tensor das tensões efetivas $\bar{\sigma}^{J_2}$ é definido pelo tensor das tensões elásticas,

$$\bar{\sigma}^{J_2} = \mathbf{C} : \varepsilon \quad (2)$$

(ii) em um segundo momento, aplica-se o modelo de dano à tração, cujo tensor das tensões efetivas $\bar{\sigma}^{J_2}$ é definido pelo tensor das tensões degradadas pela aplicação do modelo de dano J_2 .

Por fim, o modelo constitutivo combinado pode ser definido da seguinte forma:

$$\sigma^c = \Sigma^t \left(\Sigma^{J_2} \left(\bar{\sigma}^{J_2} \right) \right). \quad (3)$$

3.1 Resumo do modelo constitutivo

A Tabela 1 resume os ingredientes dos dois modelos constitutivos que são aplicados em série para compor o modelo combinado. Cabe aqui destacar que os modelos constitutivos são integrados utilizando uma técnica *de integração implícita-explícita (IMPL-EX)* que evita problemas de convergência em problemas altamente não lineares. Maiores detalhes sobre este modelo pode ser encontrado em Oliver et al. (2006) e Prazeres et al. (2016).

Tabela 1: Ingredientes para o modelo de dano combinado.

	Modelo constitutivo do dano J_2	Modelo constitutivo a tração
Relação constitutiva:	$\sigma^{J_2} = \mathbf{C}\varepsilon - d^{J_2} \bar{\sigma}_d$	$\sigma^t = \mathbf{C}\varepsilon - d^t \bar{\sigma}^{t+}$
Tensão equivalente:	$\tau^{J_2}(\bar{\sigma}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \ \bar{\sigma}_d\ $	$\bar{\tau}^t = \ \bar{\sigma}_n\ $
Critério de dano:	$\bar{\phi} = \tau^{J_2}(\bar{\sigma}) - r \leq 0$	$\bar{\phi} = \bar{\tau}^t - r \leq 0$
Lei de endurecimento/amolecimento:	$q^{J_2}(r) = r_0 + H(r - r_0)$	$q^t(r) = f_t e^{Ah(1 - \frac{r}{f_t})}$
Evolução do dano:	$d^{J_2} = 1 - \frac{q^{J_2}(r)}{r}$	$d^t = 1 - \frac{q^t(r)}{r}$

* $\bar{\sigma}_d$: tensor das tensões efetivas desviadoras;

** $\bar{\sigma}^{t+}$: parcela positiva do tensor das tensões efetivas de tração ($\bar{\sigma}^t = \bar{\sigma}^{t+} + \bar{\sigma}^{t-} = \sigma^{J_2}$)

4 EXEMPLOS

São realizados dois exemplos a fim de demonstrar as principais características do modelo proposto. No primeiro exemplo, dois blocos são submetidos a testes básicos para ilustrar as respostas do modelo à compressão, tração e cisalhamento. Neste exemplo é feito um estudo de refinamento da malha. O segundo exemplo consiste na simulação numérica de uma viga de alvenaria submetida à flexão. Neste exemplo os resultados obtidos são confrontados com resultados experimentais. Em ambos os exemplos os blocos são considerados com comportamento elástico linear.

4.1 Testes básicos

Neste exemplo, dois blocos sobrepostos são submetidos à tração, compressão e cisalhamento. A Figura 2 ilustra a geometria, condições de contorno e carregamento (deslocamentos impostos) para os três casos considerados. São adotados quatro diferentes discretizações (ver Figura 3). As propriedades dos materiais estão listadas na Tabela 2.

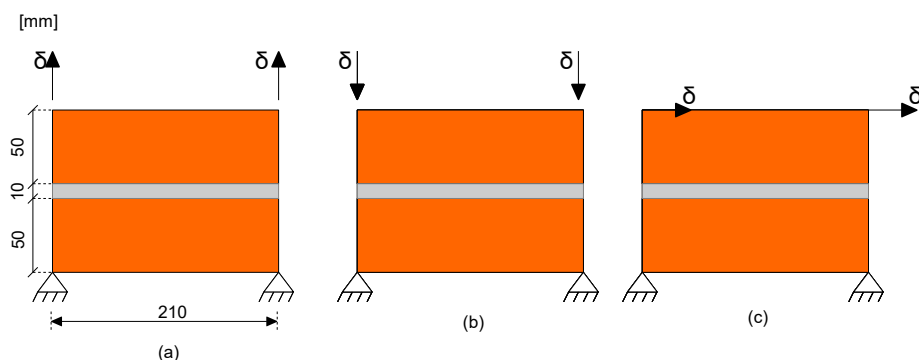


Figura 2: Testes básicos: (a) tração, (b) compressão e (c) cisalhamento.

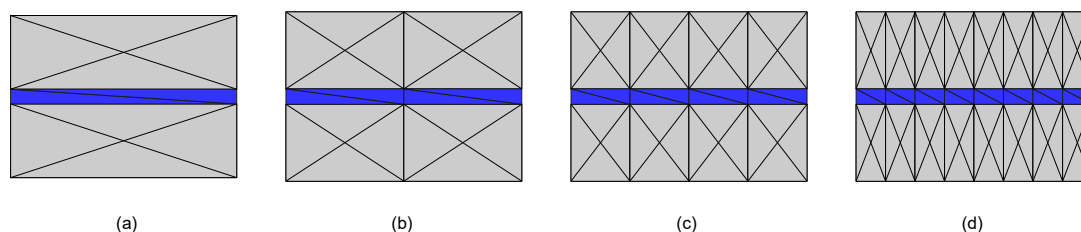


Figura 3: Malhas de elementos finitos utilizadas: (a) malha 1, (b) malha 2, (c) malha 3 e (d) malha 4.

Tabela 2: Propriedade dos materiais.

	Dimensões (mm)	E (MPa)	ν	f_t (MPa)	f_s (MPa)	G_f (N/mm)
Bloco	50x210x100	17500	0	–	–	–
Argamassa	10x210x100	1750	0	0,5	1	0,007

Para o comportamento à tração, foi adotada uma lei de amolecimento exponencial, enquanto para o comportamento ao cisalhamento foi adotada uma lei linear com $H = 0$ (ver Tabela1). As Figuras 4, 5 e 6 ilustram as respostas obtidas (tensão vs deslocamento imposto) para os três exemplos. Como pode ser notado, as respostas obtidas para os quatro refinamentos de malha considerados foram semelhantes. O teste básico de tração demonstrou que o elemento de interface consegue simular abertura de fratura em modo I de acordo com uma lei de amolecimento pré-definida. Além disso, o ensaio de compressão foi importante para demonstrar que os elementos de interface são capazes de evitar penetração dos elementos finitos dos diferentes blocos. Por fim, o ensaio de cisalhamento demonstrou que o modelo é capaz de simular o atrito puro entre os blocos.

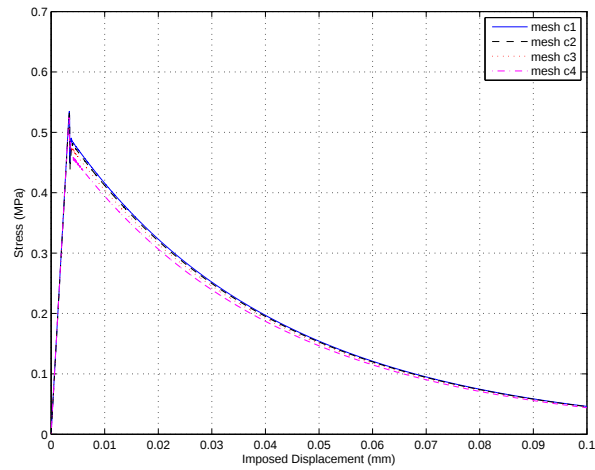


Figura 4: Teste básico de tração.

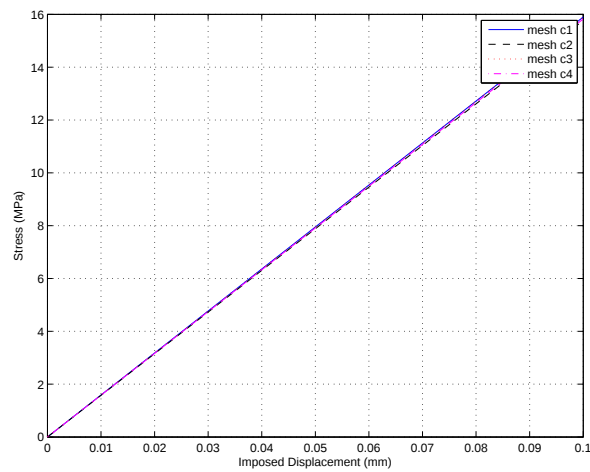


Figura 5: Teste básico de compressão.

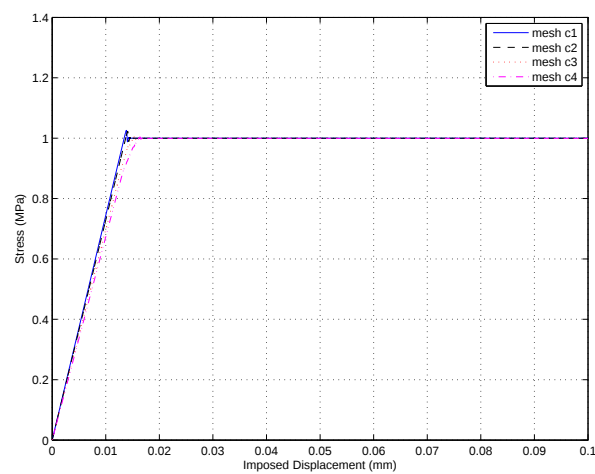


Figura 6: Teste básico de cisalhamento.

4.2 Viga de alvenaria sob flexão

Neste segundo exemplo, a estratégia desenvolvida foi empregada para simular o comportamento de uma viga de alvenaria ensaiada experimentalmente por Chaimoon and Attard (2009). O ensaio consiste em uma viga de alvenaria de 1200 x 334mm², conforme ilustra a Figura 7. A Tabela 3 lista os parâmetros dos materiais (blocos e argamassa).

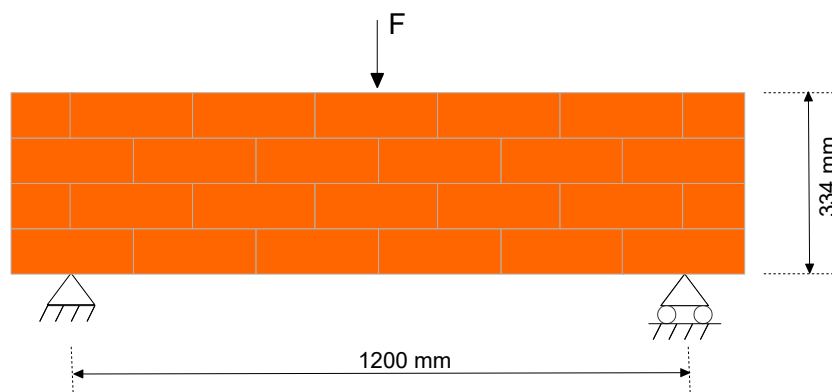


Figura 7: Viga de alvenaria: geometria, condições de contorno e carregamento.

Tabela 3: Propriedades dos materiais.

	Dimensões (mm)	E (N/mm ²)	ν	f_t (MPa)	f_s (MPa)	G^{fI} (N/mm)
Blocos	76 x 230 x 110	17500	0,15	—	—	—
Argamassa	10 x 230 x 110	3360	0,20	0,128	0,216	0,003

A discretização do problema em elementos finitos é ilustrada na Figura 8. Foram utilizados elementos finitos triangulares com três nós na discretização dos blocos e comportamento descrito por modelo constitutivo elástico linear. Os elementos finitos de interface inseridos através da técnica de fragmentação de malha estão destacados em azul. Foi imposto um deslocamento vertical de 1mm no eixo de simetria da viga em 450 passos de carregamento.

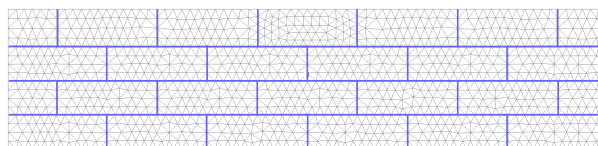


Figura 8: Discretização do problema em elementos finitos.

O padrão de fissuras deste ensaio é apresentado na Figura 9. Os pontos em azul na Figura 9(b) delimitam a geometria dos blocos. Percebe-se que o padrão de fissuras obtido se aproxima do resultado experimental.

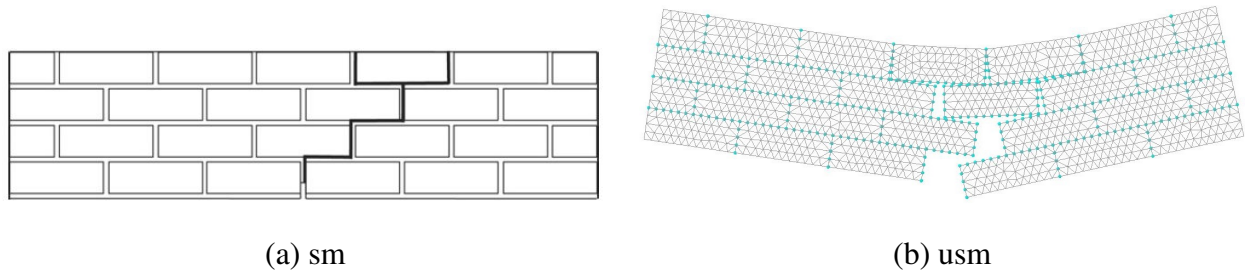


Figura 9: Padrão de fissuras final: (a) experimental Chaimoon and Attard (2009), e (b) modelo numérico.

As curvas experimental e numérica obtidas em termos de força vs deslocamento são ilustradas na Figura 10. Como pode ser visto nesta figura, a curva obtida no resultado numérico foi muito semelhante ao resultado experimental, com uma carga de pico e regime pós-pico ligeiramente inferior. Além disso, para o carregamento máximo, o modelo numérico apresentou a primeira abertura de fissura na argamassa, localizada na região inferior do vão central da viga, que foi semelhante ao comportamento experimental descrito por Chaimoon and Attard (2009). Após a carga de pico, a fissura se propaga até a parte superior da viga.

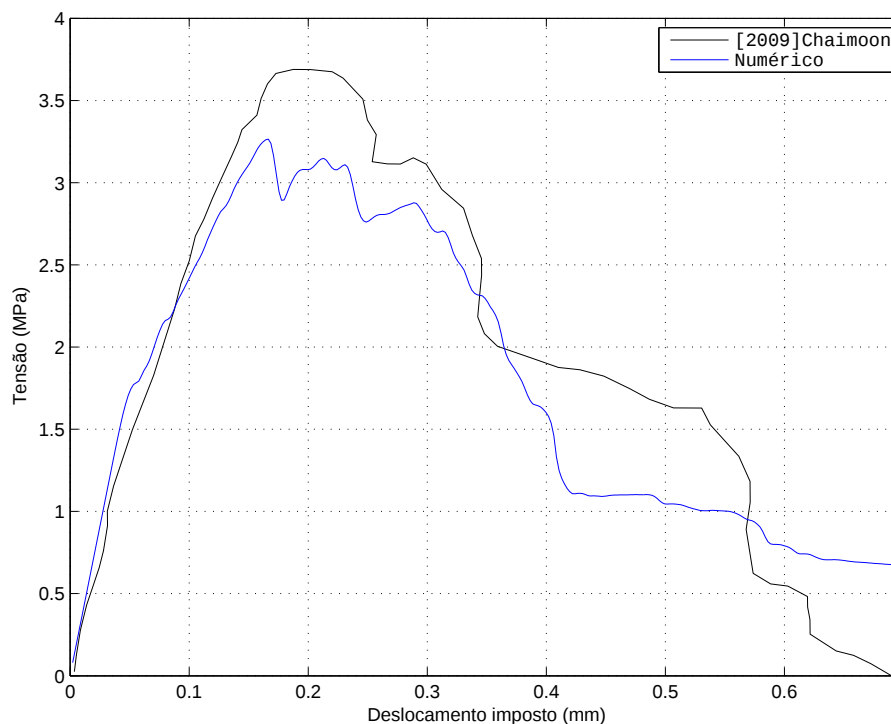


Figura 10: Curvas de força vs deslocamento do ponto aplicado: experimental vs numérico.

CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um modelo numérico para simulação de falhas em estruturas de alvenaria utilizando uma técnica de fragmentação de malha. Através desta técnica, elementos finitos de interface com elevada razão de aspecto foram utilizados para simular as juntas de argamassa e descrever as possíveis trajetórias de propagação de fraturas nessas regiões.

A similaridade dos campos de deformações do elemento de interface (quando sua altura tende a zero) e aquela encontrada na aproximação contínua de descontinuidades fortes permite que um modelo contínuo possa ser empregado para descrever a falha material através dos elementos de interface. Desta forma, foi implementado um modelo constitutivo composto baseado na mecânica do dano contínuo (tensão vs deformação) para simular a propagação de fratura ao longo das interfaces entre os blocos.

Um primeiro exemplo com testes básicos de tração, compressão e cisalhamento foi capaz de demonstrar as principais características do modelo proposto. O teste básico de tração demonstrou que o elemento de interface consegue simular abertura de fratura em modo I de acordo com uma lei de amolecimento pré-definida. Além disso, o ensaio de compressão foi importante para demonstrar que os elementos de interface são capazes de evitar penetração dos elementos finitos dos diferentes blocos. Por fim, o ensaio de cisalhamento demonstrou que o modelo é capaz de simular o atrito puro entre os blocos.

No segundo exemplo, uma viga de alvenaria sob flexão foi simulada numericamente e os resultados foram comparados com os resultados experimentais obtidos por Chaïmoon and Attard (2009). Este exemplo demonstrou que o modelo é capaz de simular o comportamento de uma estrutura real e a diferença entre as respostas pode ser justificadas pelas hipóteses simplificadoras adotadas no modelo, como por exemplo, o modelo elástico linear para descrever o comportamento dos blocos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o auxílio fornecido pelas seguintes agências de fomento à pesquisa: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

REFERENCES

- Addessi, A., Marfia, S. Sacco, & Toti, J., 2014. Modeling approaches for masonry structures. *Open Civil Engineering Journal*, vol. 8, n. 1, pp. 288-300.
- Chaïmoon, K., & Attard, M. M., 2009. Experimental and numerical investigation of masonry under three-point bending (in-plane). *Engineering Structures*, vol. 31, n. 1, pp. 103-112.
- Drougkas, A., Roca, P., & Molins, C., 2005. Numerical prediction of the behavior, strength and elasticity of masonry in compression. *Engineering Structures*, vol. 90, pp. 15-28.
- Faconi, L., Plizzari, G. & Vecchio, F., 2013. Disturbed stress field model for unreinforced masonry. *Journal of Structural Engineering*, vol. 140, n. 4, pp. 04013085.
- Greco, F., Leonetti, L., Luciano, R. and Blasi, P. N., 2016. An adaptive multiscale strategy for the damage analysis of masonry modeled as a composite material. *Composite Structures*, vol. 153, pp. 972-988.
- Lourenço, P. B., 1996. *Computational strategies for masonry structures*. PhD thesis, Delft University of Technology/ Delf.

- Macorini, L. & Izzuddin, B. A., 2013. Nonlinear analysis of masonry structures using meso-scale partitioned modelling. *Advances in Engineering Software*, vol. 60-61, pp. 58-69.
- Manzoli, O.L., Gamino, A.L., Rodrigues, E.A. & Claro, G.K.S., 2012. Modeling of interfaces in two-dimensional problems using solid finite elements with high aspect ratio. *Computers & Structures*, vol. 94-95, pp. 70-82.
- Manzoli, O.L., Macedo, M. A., Bitencourt Jr., L. A. G. & Rodrigues, E.A., 2016. On the use of finite elements with a high aspect ratio for modeling cracks in quasi-brittle materials. *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 153, pp. 151-170.
- Milani G., Simoni S., & Tralli, A., 2014. Advanced numerical models for the analysis of masonry cross vaults: A case-study in Italy. *Engineering Structures*, vol. 76, pp. 339-358.
- Oliver, J., Cervera, M. and Manzoli, O., 1999. Strong discontinuities and continuum plasticity models: the strong discontinuity approach. *International Journal of Plasticity*, vol. 15, n. 3, pp. 319-351.
- Oliver, J., Huespe, A.E., Blanco, S. & Linero, D.L., 2006. Stability and robustness issues in numerical modeling of material failure with the strong discontinuity approach. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 195, n. 52, pp. 7093-7114.
- Oliver, J., Huespe, A.E. & Cante, J.C., 2008. An implicit/explicit integration scheme to increase computability of non-linear material and contact/friction problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 197, n. 21, pp. 1865-1889.
- Oliver, J., Caicedo, M., Roubin, E., Huespe, A.E. & Hernández, J. A., 2015. Continuum approach to computational multiscale modeling of propagating fracture. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 294, n. 1, pp. 384-427.
- Prazeres, P. G. C., Bitencourt Jr., L. A. G., Bittencourt, T. N. & Manzoli, O.L., 2016. A modified implicit-explicit integration scheme: an application to elastoplasticity problems. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 38, n. 1, pp. 151-161.
- Salá t, Z., 2015. Numerical modelling of out-of-plane behavior of masonry structural members. *Engineering Fracture Mechanics*. MSc thesis, Technical University of Catalonia/ Catalonia.
- Smoljanović, H., Nikolić, Z. & Zivaljić, N., 2015. A combined finite discrete numerical model for analysis of masonry structures. *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 136, pp. 1-14.
- Tesei, C. & Ventura, G., 2016. A unilateral nonlocal tensile damage model for masonry structures. *Procedia Structural Integrity*, vol.2, pp. 2690-2697.
- Toti, J., Gattulli, V. & Sacco, E., 2015. Nonlocal damage propagation in the dynamics of masonry elements. *Computers & Structures*, vol. 152, pp. 215-227.
- Vandoren, B., De Proft, K., Simone, A. & Sluys, L. J., 2013. Mesoscopic modelling of masonry using weak and strong discontinuities. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 255, pp. 167-182.