

# MODELAGEM EM MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ESTUDO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS DE MÚLTIPLO USO\*

Markssuel Teixeira Marvila<sup>1</sup>

Jonas Alexandre<sup>2</sup>

Afonso Rangel Garcez de Azevedo<sup>3</sup>

Euzébio Bernabé Zanelato<sup>4</sup>

Melissa de Almeida Goulart<sup>5</sup>

Gustavo de Castro Xavier<sup>6</sup>

Sergio Neves Monteiro<sup>7</sup>

## Resumo

A modelagem matemática para previsão de parâmetros de resistência em sistemas estruturais é uma ferramenta confiável que a cada dia ganha mais espaço no setor da engenharia. Diante desse cenário o objetivo desse trabalho foi comparar os resultados obtidos para resistência à compressão de dois traços típicos de argamassas de múltiplo uso (1:2:9 e 1:1:6) obtidos de maneira experimental e por modelagem utilizando o método dos elementos finitos. Os resultados comprovam a uniformidade de resultados obtidos utilizando os dois procedimentos propostos.

**Palavras-chave:** método dos elementos finitos, argamassa de múltiplo uso, resistência à compressão.

## MODELING IN METHOD OF FINITE ELEMENTS FOR STUDY OF RESISTANCE TO COMPRESSION OF MULTIPLE USE MORTARS

### Abstract

Mathematical modeling for predicting resistance parameters in structural systems is a reliable tool that gets more space every day in the engineering sector. In this scenario, the objective of this work was to compare the results obtained for the compressive strength of two typical traces of multipurpose mortars (1:2:9 and 1:1:6) obtained experimentally and by modeling using the method of the elements finite. The results demonstrate the uniformity of results obtained using the two proposed procedures.

**Keywords:** finite element method, multipurpose mortar, compressive strength.

<sup>1</sup> Engenheiro Civil, mestre em Estruturas, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Civil, doutor em Estruturas, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Civil, doutor em Estruturas, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Civil, doutorando em Estruturas, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

<sup>5</sup> Estudante de engenharia civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

<sup>6</sup> Engenheiro Civil, doutor em Geotecnia, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

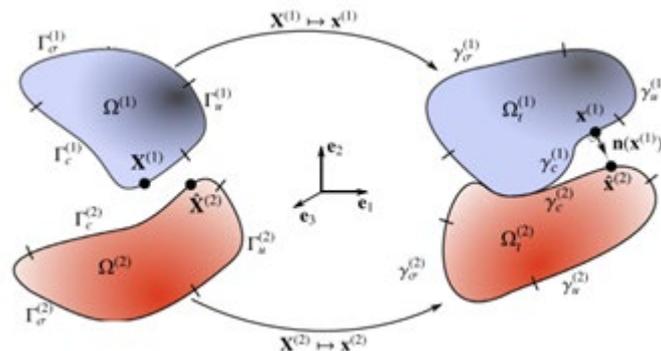
<sup>7</sup> Engenheiro Metalúrgico, PhD em Engenharia e Ciência dos Materiais, IME, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O método dos elementos finitos (MEF) consiste em um método de resolução aproximada de equações diferenciais muito úteis aos diversos ramos de engenharia [1]. Sua base consiste em subdividir, inicialmente, o domínio do problema em subdomínios de dimensões finitas de maneira que a soma de todos os subdomínios resulte no domínio original [2].

Após a divisão, adota-se um comportamento aproximado sobre cada subdomínio, de forma isolada e localizada, para as incógnitas do problema, em geral parâmetros de tensão ou deformação. O comportamento local, apresentado por cada subdomínio, é descrito com o emprego de funções simples [1-2]. A grande vantagem do MEF, então, é utilizar aproximações locais nos subdomínios, gerados apartir do domínio original, em vez de utilizar soluções matemáticas em caráter global. Para melhoria nas respostas obtidas, aumenta-se o número de subdomínios, mantendo constante o comportamento local já adotado no lugar de uma solução global mais sofisticada. Cada um desses subdomínios é denominado de elemento finito.

A Figura 1 apresenta dois elementos vizinhos nomeados como  $\Omega^{(1)}$  e  $\Omega^{(2)}$ . Em geral, os elementos finitos adotados são definidos por sua geometria, pelas funções de aproximação usadas, pelos tipos de problema para os quais foram desenvolvidos. Cada um desses subdomínios apresenta um determinado número de pontos nodais, que podem ser internos ou externos. Na Figura 1  $X^{(1)}$  e  $X^{(2)}$  representam dois nós externos para os elementos 1 e 2, respectivamente.



**Figura 1.** Notação para dois subdomínios em contato.

Fonte: Seitzet *al.* (2016) [3]

São incluídas restrições ao problema representadas por  $\Gamma_\sigma$ ,  $\Gamma_u$  e  $\Gamma_c$  que correspondem a condições de carregamento, de deslocamento (apoios) e de contorno (no contato entre dois elementos), respectivamente [3]. Essas condições são incluídas no domínio original e repassadas aos elementos finitos definidos.

Nos nós que fazem fronteira de diferentes elementos, o valor das variáveis do problema deve ser o mesmo, independentemente do tipo de elemento considerado, conforme definido por  $\Gamma_c$ . Após a definição da malha de elementos finitos e do tipo de elemento a ser utilizado na modelagem (linear, triangular, quadrático), as matrizes características correspondentes a cada elemento podem ser formadas e, em seguida, agrupadas, formando o sistema global de equações [3].

A solução deste sistema fornece os valores das incógnitas nos pontos nodais. Dessa maneira também é possível obter os valores das incógnitas nos demais pontos de um elemento, utilizando os valores calculados para os pontos nodais, que passam a funcionar como funções de interpolação [4].

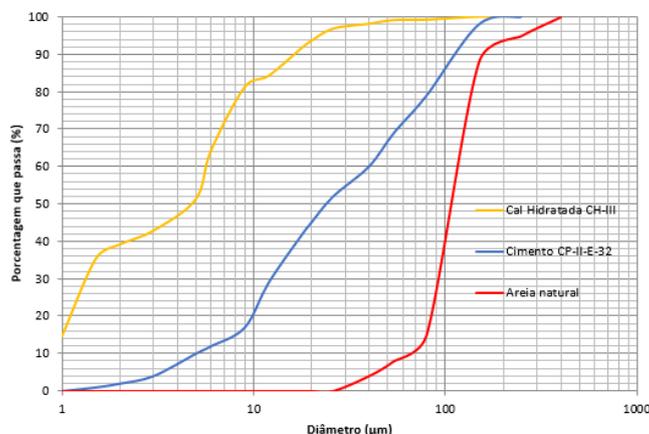
Assim, através da imposição de condições de contorno, que representam os carregamentos aplicados ao domínio original e as vinculações externas, é possível obter as respostas de deformação e de tensão em todo o domínio do problema definido no início da modelagem [4].

Diversas pesquisas já foram desenvolvidas no campo da engenharia de materiais com o intuito de estudar a correlação de parâmetros experimentais, obtidos através de experimentação em corpos de prova, com os parâmetros obtidos através de modelagens matemáticas [5-8].

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi verificar a correlação dos parâmetros de resistência à compressão de argamassas de múltiplo uso convencionais obtidas por procedimento experimental e o mesmo parâmetro obtido por modelagem matemática utilizando o método dos elementos finitos. Para isso foram confeccionados seis corpos de prova 40x40x160 mm de dois traços muito utilizados em argamassas de múltiplo uso, a saber: 1:2:9 e 1:1:6(cimento Portland: cal hidratada: areia natural). A resistência à compressão foi avaliada aos 28 dias utilizando o procedimento da ABNT NBR 13279:2005 [9]. Além disso, foi realizada as modelagens matemáticas para as duas proporções de argamassas utilizando o software ABAQUS/CAE.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

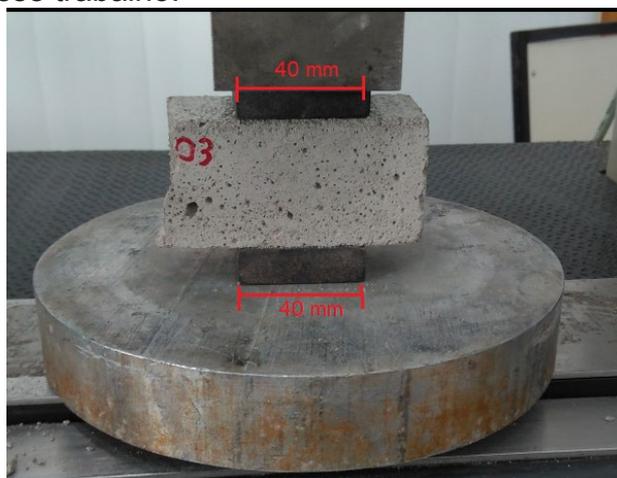
Para confecção dos corpos de prova de argamassa utilizou-se cimento Portland CP-II-E-32, cal hidratada CH-III e areia natural extraída de uma jazida em Campos dos Goytacazes com diâmetro máximo de agregado de 2,4mm. A Figura 2 apresenta a distribuição granulométrica dos materiais descritos.



**Figura 2.** Curva granulométrica dos materiais utilizados nas argamassas confeccionadas.

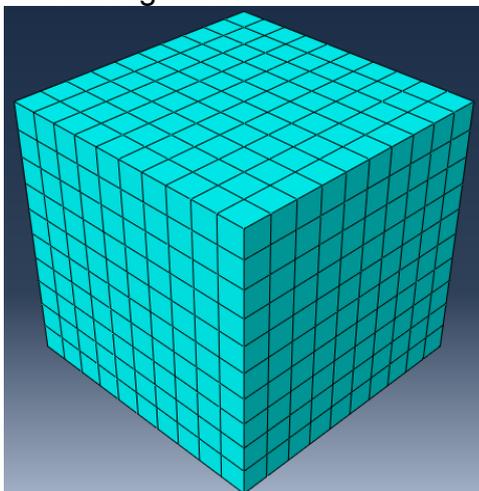
No estudo foram estudados dois traços convencionais de argamassa de múltiplo uso nas proporções em massa 1:2:9 e 1:1:6(cimento Portland: cal hidratada: areia natural), nomeadas como argamassa A e B, respectivamente. A quantidade de água foi definida utilizando o limite de consistência de  $260 \pm 5$  mm, conforme recomendação da ABNT NBR 13276:2016 [10]. Assim, foram utilizadas as relações água/cimento de 2,275 e 1,600 para as argamassas A e B. Essa diferença deve-se a quantidade de cal hidratada utilizada, já que quanto maior a quantidade empregada desse aglomerante, maior a necessidade de água para manter a consistência normativa.

Para cada proporção estudada foram confeccionados 6 corpos de prova nas dimensões 40x40x160mm. Os corpos de prova foram ensaiados a tração na flexão e posteriormente ensaiados à compressão, conforme procedimento da ABNT NBR 13279:2005 [9]. Seguindo os critérios desse procedimento, o ensaio à compressão deve ser realizado com auxílio de um suporte de 40x40 mm, conforme a Figura 3. Desta maneira, o ensaio é realizado em um corpo de prova cúbico 40x40x40mm. Vale destacar que os resultados obtidos para resistência à tração na flexão não serão abordados nesse trabalho.



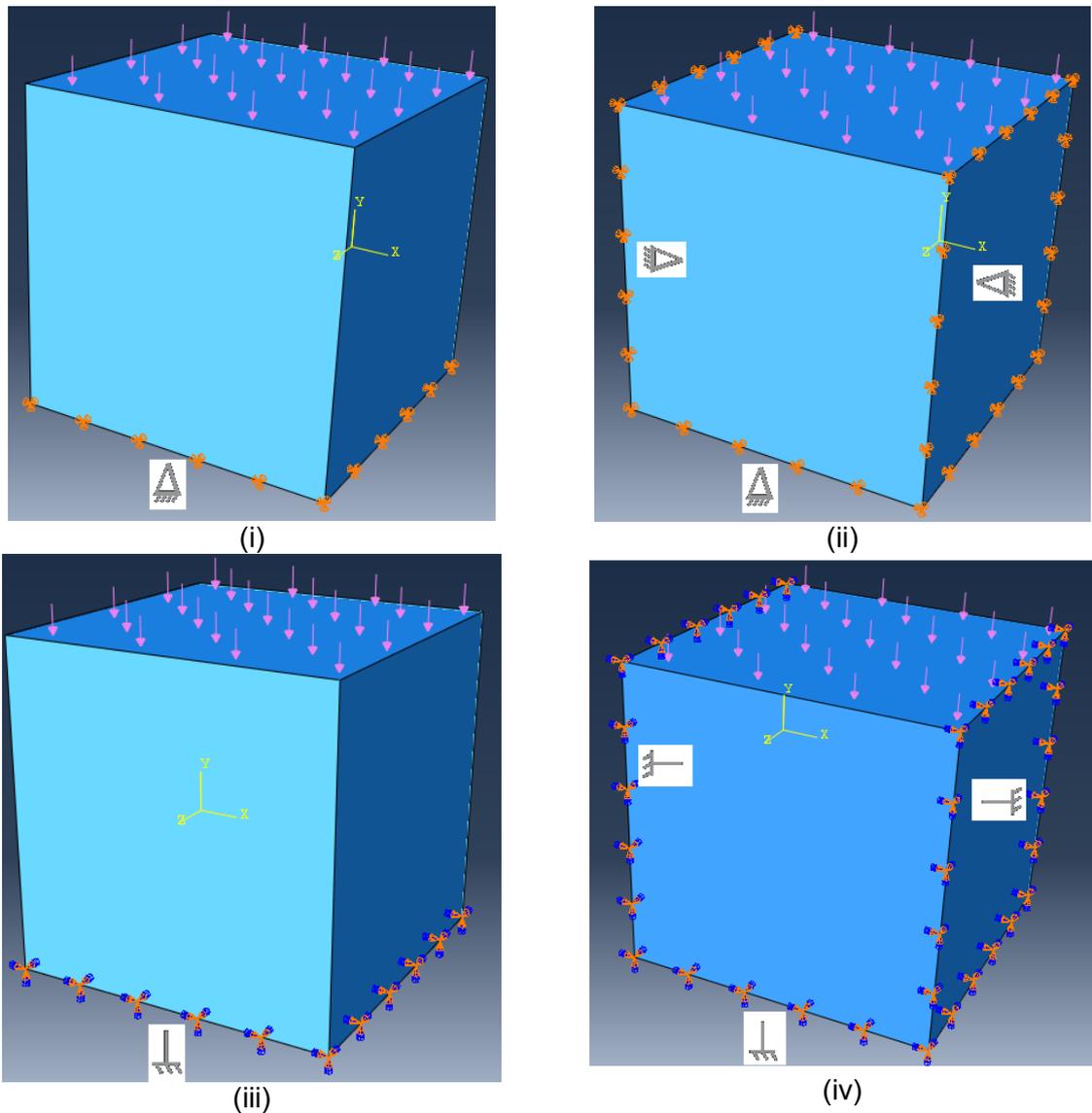
**Figura 3.** Ensaio de resistência à compressão em argamassas.

Para a modelagem pelo MEF foi utilizado o software ABAQUS/CAE, considerando um material com geometria cúbica de 40x40x40 mm. O domínio foi dividido em 1000 elementos, conforme indicado na Figura 4.



**Figura 4.** Elementos utilizados na modelagem pelo ABAQUS/CAE.

Foram utilizados quatro modelos de restrição, afim de verificar o que apresenta a melhor aproximação em relação a resistência das argamassas estudadas: o modelo (i) criou apenas uma restrição na base do elemento, considerando um apoio do 2º gênero (apoio fixo); o modelo (ii) criou restrições na lateral do elemento estudado, além da restrição da base, todas em forma de apoio do 2º gênero; o modelo (iii) impôs um apoio do 3º gênero na base da argamassa (apoio tipo engaste); e o modelo (iv) criou restrições de engaste na base e nas laterais da argamassa. As laterais foram restritas em função do confinamento provocado pelo excesso de argamassa presentes no material. A Figura 5 resume os modelos estudados.



**Figura 5.** Carregamentos e restrições utilizadas no modelo: (i); (ii); (iii) restrição na base de ensaio; e (vi) restrição na base de ensaio e nas laterais confinadas com argamassa.

A aplicação da carga foi realizada com base nas informações obtidas pelo ensaio experimental, onde aplicou-se a média das cargas resistidas pelos CP's de argamassa estudados.

Os parâmetros elásticos das argamassas A e B foram estabelecidos através de consulta a bibliografia, onde optou-se por utilizar 0,2 como coeficiente de Poisson e os valores de 1,80 GPa e 4,00 GPa para os módulos de elasticidade das argamassas A e B, respectivamente [11-13].

As unidades utilizadas na modelagem, com o intuito de obter compatibilidade dimensional, foram: mm para dimensões lineares, MPa para módulo de elasticidade, e N para os carregamentos. Assim, as respostas de tensão obtidas estão expressas em MPa.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão para a argamassa A, enquanto a Tabela 2 apresenta os resultados da argamassa B.

**Tabela 1.** Resultados obtidos para argamassa A.

Corpo de Prova	Máxima Carga (N)	Resistência (MPa)
CP01	5124,4	3,20
CP02	4957,6	3,10
CP03	4847,2	3,03
CP04	5452,7	3,41
CP05	5012,2	3,13
CP06	5511,3	3,44
Média	3,22 ± 0,17	

**Tabela 2.** Resultados obtidos para argamassa B.

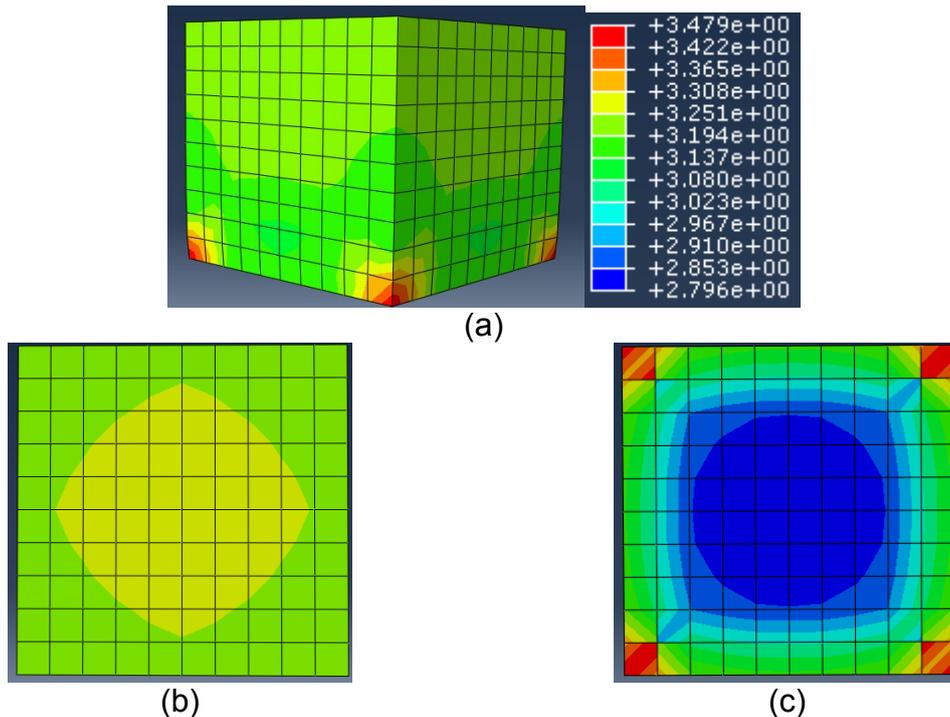
Corpo de Prova	Máxima Carga (N)	Resistência (MPa)
CP01	5328,9	3,33
CP02	6532,6	4,08
CP03	5362,0	3,35
CP04	6121,4	3,83
CP05	6382,5	3,99
CP06	5874,3	3,67
Média	3,71 ± 0,32	

Conforme esperado, a argamassa B apresentou os maiores parâmetros de resistência à compressão, uma vez que apresenta menor relação água/cimento.

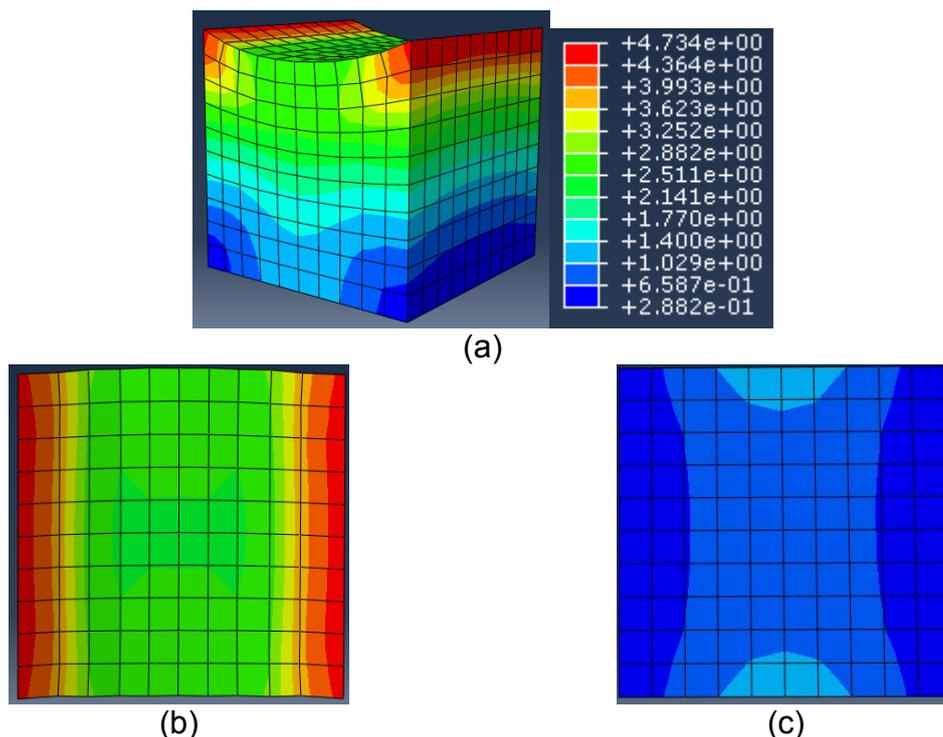
Os resultados das modelagens realizadas para a argamassa A são apresentados a seguir: a Figura 6 apresenta as repostas obtidas pelo modelo (i) e (iii), enquanto a Figura 7 indica os resultados obtidos para o modelo (ii) e (iv).

Por estar sujeito apenas a cargas de compressão, que não provocam momentos na argamassa estudada, os modelos considerando restrições de apoios do 2º gênero apresentaram compatibilidade estrutural com os modelos considerando apoios do 3º gênero, ou seja, o modelo (i) apresentou similaridade de análise com o modelo (iii), ao passo que o modelo (ii) apresentou os mesmos valores de tensão que o modelo (iv).

Com relação a restrição provocada pela argamassa na lateral da região de ensaio, é possível identificar que os modelos apresentaram divergência de valores. Com base no maior valor de tensão apresentado pelos modelos (i) e (iii), valendo 3,47 MPa, e os valores apresentados pelos modelos (ii) e (iv), de 4,73 MPa, é fácil perceber que o valor que mais se aproximou dos resultados encontrados experimentalmente foram os que não consideram restrições laterais. Logo, é possível concluir que as argamassas em excesso não contribuem para restringir a região de ensaio do corpo de prova em análise, que, portanto, apresenta liberdade para se movimentar horizontalmente, uma vez que foi esse modelo que apresentou maior ajuste quando comparado os valores obtidos experimentalmente, de 3,22±0,17 MPa. O erro associado a essa comparação varia numa faixa de 2,30% a 12,10%.

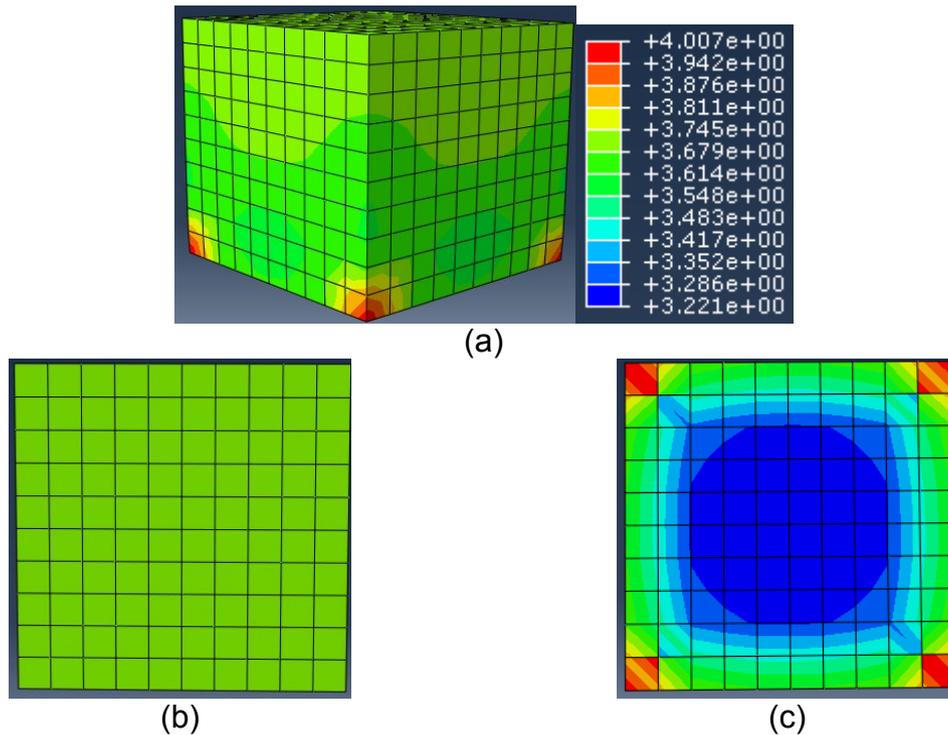


**Figura 6.** Modelo (i) e (iii) para a argamassa A: (a) vistas laterais do cubo; (b) vista da parte superior (região do carregamento); e (c) vista inferior (região do apoio).

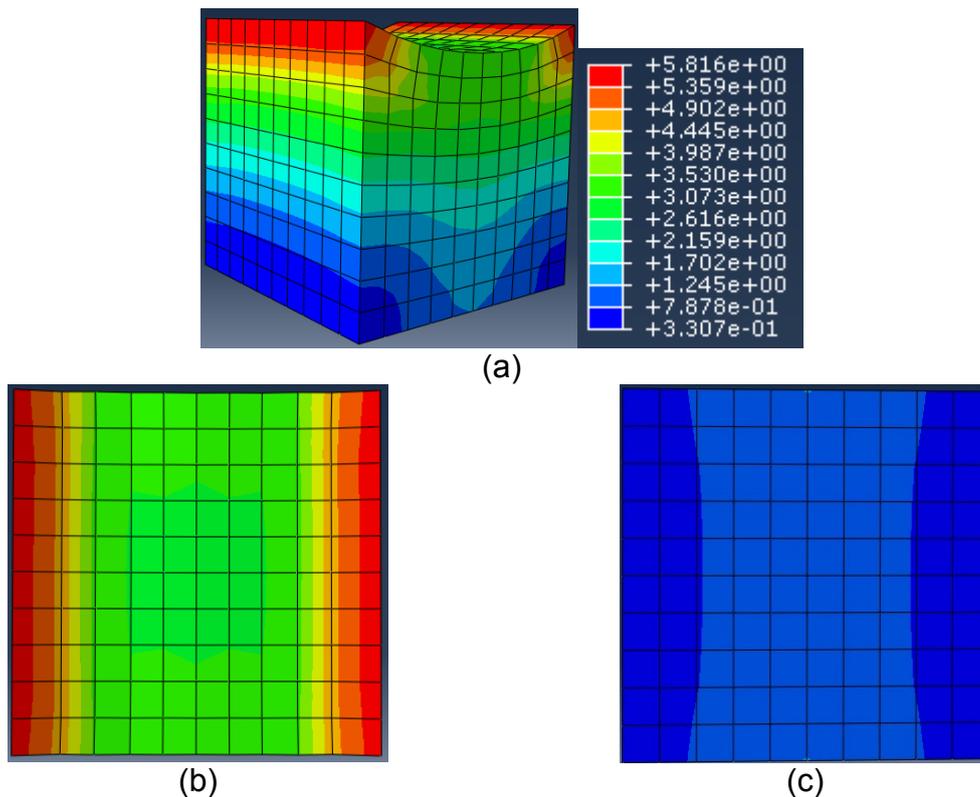


**Figura 7.** Modelo (ii) e (iv) para a argamassa A: (a) vistas laterais do cubo; (b) vista da parte superior (região do carregamento); e (c) vista inferior (região do apoio).

As Figuras 8 e 9 apresentam os modelos (i) e (iii) e os modelos (ii) e (iv) para a argamassa B, respectivamente. A mesma tendência obtida para a argamassa A foi encontrada para a argamassa B, onde os modelos (i) e (iii) apresentaram melhor ajuste.



**Figura 8.** Modelo (i) e (iii) para a argamassa B: (a) vistas laterais do cubo; (b) vista da parte superior (região do carregamento); e (c) vista inferior (região do apoio).



**Figura 9.** Modelo (ii) e (iv) para a argamassa B: (a) vistas laterais do cubo; (b) vista da parte superior (região do carregamento); e (c) vista inferior (região do apoio).

O resultado obtido experimentalmente para a argamassa B foi de  $3,71 \pm 0,32$ , enquanto o resultado obtido pela modelagem foi de 4,07 MPa. O intervalo de erro encontrado foi de 0,98% a 16,71%.

Destaca-se que o intervalo de erros foi obtido calculando os erros relativos entre o valor da modelagem pelo MEF e os valores mínimos e máximos experimentais. Assim, conclui-se que existe correlação entre os valores de resistência à compressão obtidos através do procedimento experimental da ABNT NBR 13279:2005 [9] e pela modelagem matemática utilizando o MEF, para as duas argamassas estudadas nessa pesquisa.

#### 4 CONCLUSÃO

Os resultados de resistência à compressão obtidos para as argamassas A e B de forma experimental e através da modelagem numérica apresentaram valores muito próximos.

O intervalo de erros encontrados foi de 2,30% a 12,10% para a argamassa A e de 0,98% a 16,71% para a argamassa B. Isso comprova a possibilidade da utilização de métodos numéricos, como é o caso do método dos elementos finitos, para previsão do comportamento mecânico de uma argamassa de múltiplo uso. Dessa maneira, o presente trabalho alcançou o objetivo proposto.

#### REFERÊNCIAS

- 1 A. Seitz, A. Popp, W. A. Wall. A semi-smooth Newton method for orthotropic plasticity and frictional contact at finite strains. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 285 (2015) 228–254.
- 2 A.P.C. Dias, A.L. Serpa, M.L. Bittencourt. High-order mortar-based element applied to nonlinear analysis of structural contact mechanics. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 294 (2015) 19–55.
- 3 A. Seitz, P. Farah, J. Kremheller, B. I. Wohlmuth, W. A. Wall, A. Popp. Isogeometric dual mortar methods for computational contact mechanics. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 301 (2016) 259–280.
- 4 S. Sitzmann, K. Willner, B. I. Wohlmuth. Variationally consistent quadratic finite element contact formulations for finite deformation contact problems on rough surfaces. *Finite Elements in Analysis and Design* 109 (2016) 37–53.
- 5 L. Shen, Q. Ren, L. Zhang, Y. Han, G. Cusatis. Experimental and numerical study of effective thermal conductivity of cracked concrete. *Construction and Building Materials* 153 (2017) 55–68.
- 6 B. V. Belleghem, R. Montoya, J. Dewanckele, N. Van den Steen, I. De Graeve, J. Deconinck, V. Cnudde, K. Van Tittelboom, N. De Belie. Capillary water absorption in cracked and uncracked mortar – A comparison between experimental study and finite element analysis. *Construction and Building Materials* 110 (2016) 154–162.
- 7 V. Nezerka, J. Antos, J. Litos, P. Tesárek, J. Zeman. An integrated experimental-numerical study of the performance of lime-based mortars in masonry piers under eccentric loading. *Construction and Building Materials* 114 (2016) 913–924.
- 8 E. Nasiri, Y. Liu. Development of a detailed 3D FE model for analysis of the in-plane behaviour of masonry infilled concrete frames. *Engineering Structures* 143 (2017) 603–616.
- 9 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 13279. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- 10 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 13276. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

- 11 V. G. Haach, R. Carrazedo, L. M.F. Oliveira. Resonant acoustic evaluation of mechanical properties of masonry mortars. *ConstructionandBuildingMaterials* 152 (2017) 494–505.
- 12 E.V.M. Carrasco, M.D.C. Magalhaes b, W.J.D. Santos, R.C. Alves, J.N.R. Mantilla. Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests. *ConstructionandBuildingMaterials* 131 (2017) 31–38.
- 13 N. G. da Silva, V. C. Campiteli. Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 21-35, out./dez. 2008.