

Análise experimental e numérica do comportamento de prismas de blocos de concreto preenchidos com graute produzido com resíduo da construção civil

Experimental and numerical analysis of the behavior of prisms of concrete blocks filled with grade produced with residue from civil construction

DOI:10.34117/bjdv7n9-096

Recebimento dos originais: 07/08/2021

Aceitação para publicação: 08/09/2021

Luanna da Silva Diamantino

Mestre em Construção Civil e Materiais

Universidade FUMEC – FEA, Faculdade de Engenharia e Arquitetura – Rua Cobre,
200, Cruzeiro Belo Horizonte – Minas Gerais
luannadiamantino@gmail.com

Edna Alves Oliveira

Doutora em Engenharia de Estruturas pela UFMG/ UMinho (Portugal)

Universidade FUMEC – FEA, Faculdade de Engenharia e Arquitetura – Rua Cobre,
200, Cruzeiro Belo Horizonte – Minas Gerais
ednao@fumec.br

RESUMO

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo que vem se destacando no Brasil e no mundo, graças às suas vantagens executivas e estruturais. Contudo, como todo sistema construtivo, a alvenaria estrutural também contribui para geração de resíduos de construção civil (RCD). Na indústria de fabricação de blocos de concreto estruturais, o resíduo é gerado no momento da prensagem do bloco. Esse resíduo gerado possui granulometria similar a do agregado, normalmente utilizado na execução do concreto e micro concreto. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo principal analisar o desempenho mecânico de blocos de concreto estruturais, preenchidos com graute confeccionado a partir da substituição integral do agregado natural pelo resíduo gerado no momento da prensagem do bloco. Para análise do desempenho mecânico desse graute que foi utilizado no reforço de paredes de alvenaria estrutural, foram realizadas análises experimentais e numéricas em prismas de blocos de concreto. No estudo experimental foi feita a caracterização dos agregados naturais e do resíduo. Avaliou-se, também, as propriedades físicas e mecânicas do graute, da argamassa de assentamento, dos blocos e prismas. Para validar os resultados obtidos no estudo experimental, foram realizadas simulações numéricas através do método dos elementos finitos utilizando software Abaqus, sendo aplicado o modelo de Plasticidade por Dano de Concreto (Concrete Damage Plasticity – CDP) para simular o comportamento dos prismas. Os resultados obtidos no estudo experimental e numérico mostraram que o graute produzido a partir da substituição integral do agregado natural graúdo por resíduo, apresenta propriedades mecânicas adequadas para o reforço de paredes de alvenaria estrutural.

Palavras-chave: Alvenaria estrutural, resíduo da construção civil, graute, prismas, método dos elementos finitos.

ABSTRACT

The structural masonry is a constructive system that has been standing out in Brazil and in the world, thanks to its executive and structural advantages. However, like all construction systems, structural masonry also contributes to the generation of construction waste (RCD). In the manufacturing industry of structural concrete blocks, the residue is generated at the moment of block pressing. This generated residue has granulometry similar to that of the aggregate, usually used in the execution of the concrete and micro concrete. Thus, this work has as main objective to analyze the mechanical performance of structural concrete blocks, filled with grate made from the replacement integral of the natural aggregate by the residue generated at the moment of block pressing. In order to analyze the mechanical performance of this grate that was used in the reinforcement of structural masonry walls, experimental and numerical analyzes were performed on concrete block prisms. In the experimental study the characterization of the natural aggregates and the residue was made. It was also evaluated the physical and mechanical properties of grate, mortar, blocks and prisms. To validate the results obtained in the experimental study, numerical simulations were performed using the finite element method using Abaqus software, and the Concrete Damage Plasticity (CDP) model was applied to simulate the behavior of the prisms. The results obtained in the experimental and numerical study showed that the grate produced from the integral replacement of the heavy natural aggregate by residue presents adequate mechanical properties for the reinforcement of structural masonry walls.

Keywords: Structural masonry, construction waste, grate, prisms, finite elements method.

1 INTRODUÇÃO

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo que vem se destacando no Brasil e no mundo, devido às suas vantagens como construção racionalizada, quantidade reduzida de mão de obra, construção limpa e redução no tempo de sua realização. Porém, muitas vezes a sua utilização se baseia em métodos intuitivos, demonstrando que, embora muitos estudos tenham sido realizados, ainda há muito a ser pesquisado a fim de aprimorar o sistema de dimensionamento e a técnica construtiva (CAMACHO, 2006).

Assim como todo sistema construtivo, a alvenaria estrutural também contribui para geração de resíduos, seja na fabricação dos blocos, no transporte, na execução de um projeto não compatibilizado, ou na falta de treinamento da mão de obra para a sua execução. Podendo ainda, ser o sistema construtivo que mais gere resíduos na construção, devido, justamente, ao grande número de variáveis, mas que por sua vez, quando controlados e racionalizados, viabilizam o sistema no âmbito sustentável e econômico (MARTINS, 2012).

Esses resíduos gerados por construções e demolições (RCD) podem ser definidos pela mistura de rejeitos oriundos de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, sendo o seu armazenamento muitas vezes realizado de forma inapropriada onde, segundo John e Agopyan (2013), podem ser depositados em bota-fora clandestino, nas margens de rios e córregos ou em terrenos baldios.

No Brasil, a resolução n° 307 do conselho nacional do meio ambiente – CONAMA (2002) estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais.

A utilização de agregados de concreto reciclado é muito atraente do ponto de vista da redução dos custos e da sustentabilidade. É neste contexto que este trabalho se insere. Será avaliado o comportamento da alvenaria estrutural com blocos de concreto reforçados com graute produzido a partir da substituição integral do agregado graúdo por resíduos da fabricação de blocos de concreto.

2 MATERIAIS E METODOS

Com a finalidade de atingir os objetivos propostos, foi desenvolvido um programa experimental para avaliar as propriedades mecânicas da alvenaria e seus componentes. O estudo experimental foi constituído das seguintes etapas:

- coleta dos materiais: blocos, agregados naturais e resíduo;
- análise granulométrica dos agregados miúdo, graúdo e do resíduo;
- análise de traços de graute, disponíveis na literatura, para posterior avaliação da resistência à compressão axial do graute obtido a partir da substituição integral do agregado natural miúdo por resíduo, e do graute obtido a partir da substituição integral do agregado graúdo por resíduo;
- execução de corpos de prova cilíndricos com graute convencional (confeccionado com agregados naturais) e graute com resíduo (confeccionado com a substituição integral dos agregados naturais por resíduo gerado durante a fabricação de blocos de concreto);
- realização de ensaios em blocos, em corpos de prova cilíndricos de graute convencional e de resíduo, e em corpos de prova prismáticos de argamassa para determinação da resistência à compressão axial e do módulo de deformação;

- realização de ensaios em prismas com 2 (dois) blocos preenchidos com graute convencional e graute com resíduo para determinação da resistência à compressão axial e do módulo de deformação.

No estudo numérico, foram consideradas as seguintes etapas:

- definição do modelo constitutivo e dos parâmetros que descrevam o comportamento não linear do prisma através da macromodelagem;
- desenvolvimento do modelo numérico definindo as propriedades da malha e condições de contorno;
- análise de tensões e deformações nos prismas;
- comparação entre dados experimentais e modelo numérico.

Com o intuito de representar o comportamento à compressão não linear da alvenaria executada com blocos de concreto, e por ausência de uma norma de alvenaria que descreva o comportamento não linear da alvenaria estrutural, adotou-se as relações tensão de compressão versus deformação proposta pela norma europeia EN 1992-1-1(2004) “Projeto de estruturas em concreto” para realizar as simulações numéricas

3 ESTUDO EXPERIMENTAL

Para realizar o estudo experimental foram utilizados Blocos estruturais vazados de concreto para amarração tipo “L” com dimensões nominais de 14 cm x 19 cm x 34 cm.

A argamassa de assentamento foi confeccionada com cimento CP IV E 32, cal hidratada e areia industrial de granulometria média. O traço em massa utilizado foi de 1:1:0,6 (cimento:cal:areia) respeitando uma junta de aproximadamente 1,0 cm de espessura entre os blocos de concreto assentados. A mistura dos componentes da argamassa foi realizada obtendo-se a condição plástica e a trabalhabilidade adequada com uma relação água/ cimento $a/c = 1,51$ em massa. Este traço foi adotado por ser usualmente utilizado em obras de alvenaria estrutural.

Para definir o traço que seria adotado na confecção do graute, foram analisados quatro traços, sendo estes dosados para a obtenção de resistência à compressão média de 15 ± 2 MPa. A adoção dessa resistência média se deve ao valor obtido na resistência característica à compressão dos blocos de concreto.

Após análises dos quatro traços, definiu-se o traço em massa do graute convencional e com resíduo de 1:2,21:2,40 (cimento: areia: brita) e relação água cimento (a/c) de 0,950. O cimento empregado na confecção dos grautes foi o mesmo utilizado na argamassa – cimento CP IV E 32.

Denomina-se graute convencional, neste trabalho, o graute confeccionado com brita nº 0 e areia natural, e com resíduo, o graute confeccionado com resíduos gerados na fabricação de blocos de concreto estruturais, provenientes de uma fábrica de blocos de concreto da região metropolitana de Belo Horizonte, MG.

Com o objetivo de analisar o desempenho mecânico da alvenaria reforçada com graute convencional e graute com resíduo foram confeccionados dois tipos de prismas. Em ambos foram utilizados blocos estruturais vazados de concreto para amarração tipo “L” com dimensões nominais de 14 cm x 19 cm x 34 cm. Esses blocos foram justapostos e unidos por juntas horizontais de argamassa para o seu assentamento. O primeiro tipo de prisma denominado “Prisma convencional”, foi preenchido com graute executado com agregados naturais miúdo e graúdo. O segundo tipo de prisma denominado “Prisma com Resíduo” foi preenchido com graute que teve a substituição integral do agregado graúdo natural por resíduo gerado durante a fabricação de blocos de concreto.

Para a realização do estudo foram confeccionados e ensaiados à compressão aos 28 dias, um total de 15 (quinze) prismas para cada tipo de graute. Os quinze blocos do traço convencional foram capeados com pasta de cimento e montados no dia seguinte. A execução dos passos para montagem dos 15 (quinze) prismas com resíduo seguiu os mesmos procedimentos dos prismas convencionais, porém como seria inviável realizar o rompimento dos 30 (trinta) prismas no mesmo dia, os mesmos foram capeados e montados um dia após a montagem dos prismas convencionais que podem ser observados na Figura 1.

Figura 1 - Montagem dos prismas



Fonte: A autora (2018).

Após aguardar o tempo de descanso mínimo de 16 (dezesesseis) horas, os alvéolos dos blocos de 15 (quinze) prismas foram preenchidos com graute convencional. O grauteamento foi realizado em duas camadas que recebiam 12 (doze) golpes em cada camada aplicados com a haste de socamento. Os quinze prismas preenchidos com graute com resíduo obedeceram ao mesmo procedimento de execução, porém foram realizados no dia seguinte em função da logística para realização dos testes de compressão axial.

O equipamento adotado para os testes de compressão e deformação dos corpos de prova cilíndricos foi acoplado a prensa, sendo a velocidade do carregamento comandada automaticamente por um computador. Foram instalados dois transdutores lineares de deslocamentos (LVDT - Transformador Diferencial Variável Linear) para análise das deformações dos grautes convencionais e com resíduo. A Figura 2 ilustra o conjunto de equipamentos e corpo de prova utilizados durante o ensaio.

Figura 2 – Equipamento utilizado no ensaio de compressão para determinar a deformação em corpos de prova cilíndricos



Fonte: A autora (2018).

Para a determinação do módulo de deformação dos prismas, foi desenvolvido um equipamento para auxiliar na fixação dos transdutores de deslocamentos (LVDT) e dos extensômetros analógicos. Foram utilizados dois LVDT's e dois extensômetros analógicos para leitura das deformações longitudinais. Para leitura das deformações transversais foram utilizados quatro extensômetros analógicos, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Equipamento desenvolvido para auxiliar na fixação dos LVDT's e extensômetros analógicos nos prismas



Fonte: A autora (2018).

Para obtenção das deformações fornecidas pelo LVDT, foi feita aquisição direta dos dados pelo computador. Para os extensômetros analógicos, as leituras foram feitas manualmente ao fim de cada intervalo de aplicação de carga.

Após a execução da leitura dos extensômetros, os prismas foram submetidos a carregamento até atingir ruptura, obtendo-se assim a resistência à compressão axial dos prismas.

4 ESTUDO NUMÉRICO DA ALVENARIA ESTRUTURAL

Neste estudo, por meio de simulações numéricas computacionais foi avaliado o comportamento mecânico (suas tensões e deformações) de prismas de bloco de concreto preenchidos com graute substituindo o agregado natural por RCD.

Para a criação e modelagem do comportamento mecânico da alvenaria, optou-se pela utilização do programa Abaqus (6.14) que permite realizar análise via método dos elementos finitos.

O pré-processador ABAQUS/CAE consiste em uma interface gráfica que permite a introdução das informações do modelo gerado, que podem ser feita através de ferramentas especiais que permitem verificar vários aspectos relacionados como a geometria do modelo (módulo PART), propriedades mecânicas dos materiais constituintes (módulo PROPERTY), agrupamento (módulo ASSEMBLY) e imposição da sequência de passos (módulo STEP) e de sua natureza – linear ou não linear, definição das condições de contorno e dos carregamentos (módulo LOAD), geração da malha de elementos finitos (módulo MESH) e finalmente obtenção do arquivo de entrada (módulo JOB) (SIMULIA, 2014).

O método de convergência utilizado para os prismas nas simulações numéricas dos prismas foi o Static General. O uso desse método é aconselhado em situações nas quais se deseja obter soluções de equilíbrio estática linear ou não linear (SIMULIA, 2014).

Na simulação numérica dos prismas adotou-se a macromodelagem, modelando os dois blocos, argamassa, graute e capeamento como um sólido – material monolítico, permitindo simular um comportamento generalizado da estrutura.

Para realizar a modelagem dos prismas, conforme ensaios experimentais são necessárias informações quanto ao modelo real para criação de um modelo numérico equivalente. A relação tensão-deformação e os correspondentes parâmetros de dano à

compressão e à tração dos prismas para os modelos utilizados neste estudo foram baseados em modelos definidos através da revisão bibliográfica.

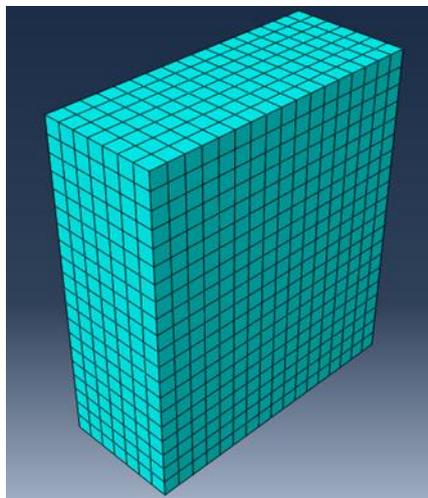
As informações de geometria, discretização da malha de elementos finitos, carregamento, condições de contorno e modelagem constitutiva fornecidas ao software Abaqus estão descritas a seguir.

4.1 GEOMETRIA E DISCRETIZAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

Consiste em informar ao programa a geometria do que será simulado. Nessa fase, o prisma foi modelado como um sólido de acordo com as dimensões dos blocos e da espessura da argamassa.

A discretização da malha de elementos finitos foi definida a partir dos testes numéricos realizados durante o processo de modelagem dos prismas, verificando a necessidade de ajustes no tamanho dos elementos finitos ou nas ferramentas de comando da malha. A partir dos testes de malha, decidiu-se por utilizar elementos com dimensão de 20 mm, como apresentado na Figura 4 que ilustra a distribuição dos elementos finitos ao longo do prisma.

Figura 4 - Malha de elementos finitos utilizada na discretização do prisma

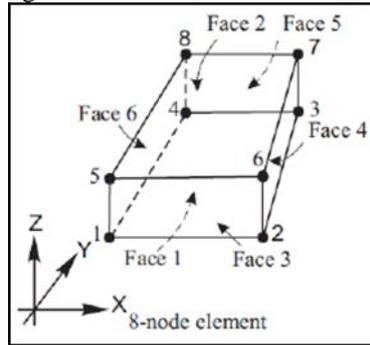


Fonte: A autora (2018).

Como resultado da discretização da malha foi obtido um modelo com 2.380 elementos e 3.024 nós.

O elemento finito utilizado para geração da malha foi o C3D8, que é um elemento sólido de oito nós com interpolação linear e integração completa, capaz de representar as translações nas direções principais x, y e z, uma vez que possui três graus de liberdade por nó (ver Figura 5).

Figura 5 - Elemento de malha C3D8



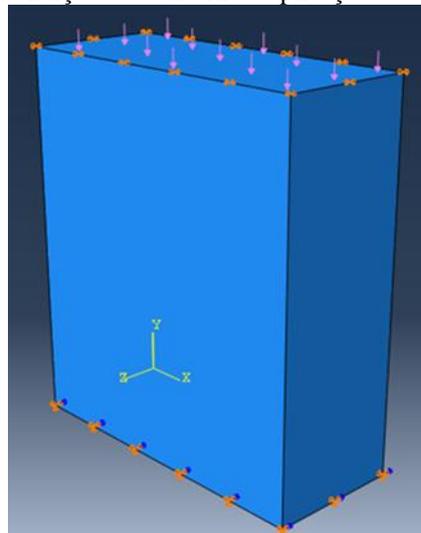
Fonte: Santos (2017).

4.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTOS

O carregamento é aquele que determina os principais esforços que surgem ao longo da estrutura do modelo. As condições de contorno são parte fundamental na simulação, pois são responsáveis por representar como a interação do elemento se desenvolve com o meio externo (JANUZZI, CRISTELI, et al., 2014).

As condições de contorno utilizadas para análise dos prismas foram realizadas a fim de se conciliar as mesmas condições experimentais, ou seja, a extremidade superior do prisma move-se na direção de carregamento, enquanto a extremidade inferior é limitada em relação a todos os graus de liberdade, conforme ilustra a Figura 6.

Figura 6 - Condições de contorno e aplicação do carregamento



Fonte: A autora (2018).

Para reproduzir as mesmas condições mecânicas do ensaio à compressão, foi aplicada uma tensão uniformemente distribuída no topo do prisma em Y, representando o carregamento do prisma.

4.3 MODELAGEM CONSTITUTIVA

De acordo com o modelo constitutivo adotado, é realizado o levantamento das características a serem consideradas de modo que melhor representem o modelo real. Para tal, as seguintes propriedades foram consideradas:

- módulo de elasticidade;
- coeficiente de Poisson;
- resistência à compressão;
- dano devido à compressão;
- resistência à tração;
- dano devido à tração.

4.4 MODELO DE PLASTICIDADE DE DANO

Para simular o comportamento dos prismas, o modelo de Plasticidade por Dano de Concreto (Concrete Damage Plasticity – CDP) do ABAQUS foi aplicado. Os dois principais mecanismos de falha que são fissuras por tração e compressão do concreto são assumidos, utilizando conceitos de dano isotrópico em combinação com plasticidade de tração e compressão isotrópica para representar o comportamento inelástico do concreto.

O modelo CDP tem a capacidade geral de modelar materiais com comportamento semi-frágil, como o concreto e a alvenaria, demonstrando através das modelagens os seus dois principais mecanismos de falha. Estas propriedades mecânicas podem ser implementadas no modelo através de leis constitutivas (OBAIDAT, EL EZZ e GALAL, 2017).

As leis constitutivas são definidas com base nos parâmetros do material e, para materiais frágeis, devem ser descritas para tração e compressão separadamente, visto que se comportam de forma diferente quando estão submetidos a estes esforços.

Além disso, quando se utiliza modelos de dano, é necessário também adotar leis para prever a evolução do dano. Dessa forma, nesse trabalho, foram adotados:

a) Parâmetros do material

Para o desenvolvimento do estudo numérico, foram realizadas investigações sobre os parâmetros utilizados para obter um modelo numérico que represente os tipos de materiais que foram desenvolvidos neste trabalho.

O modelo de dano plástico requer os parâmetros da plasticidade do dano do concreto e os valores do módulo de elasticidade, densidade e coeficiente de Poisson.

Alguns parâmetros numéricos do dano utilizados são necessários para modelagem da alvenaria estrutural. Entre esses parâmetros, citam-se: o ângulo de dilatância ($\psi = 36^\circ$), a excentricidade do potencial plástico ($\epsilon = 0,1$), a razão entre as resistências à compressão no estado biaxial e uniaxial ($\sigma_{b0}/\sigma_{c0} = 1,16$), a razão entre o segundo invariante de tensão do meridiano de tração e o segundo invariante de tensão no meridiano de compressão ($K = 0,667$) e o parâmetro de viscosidade que define a regularização visco plástica ($\mu_{vis} = 0,0001$) (OBAIDAT, ABO EL EZZ e GALAL, 2017).

b) Comportamento à compressão

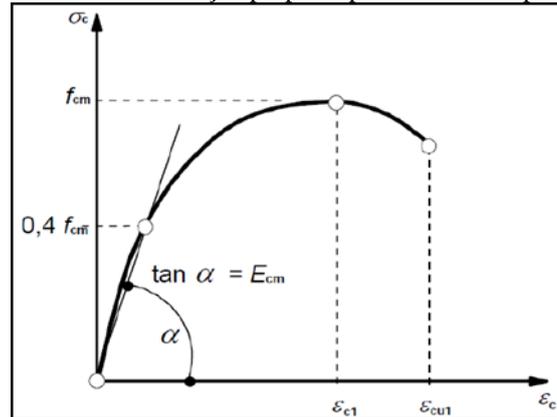
Com o intuito de representar o comportamento à compressão não linear da alvenaria executada com blocos de concreto, e por ausência de uma norma de alvenaria que descreva o comportamento não linear da alvenaria estrutural, adotou-se as relações tensão de compressão *versus* deformação proposta pela norma europeia EN 1992-1-1(2004) “Projeto de estruturas em concreto” para realizar as simulações numéricas, dada pela equação (1):

$$\sigma_c = f_{cm} \frac{K\eta - \eta^2}{1 + (K - 2)\eta}$$

Onde: f_{cm} = resistência média à compressão; $\eta = \epsilon_c/\epsilon_{c1}$; $k = 1,05E_{cm}(\epsilon_{c1}/f_{cm})$; ϵ_c é a deformação do concreto à compressão; ϵ_{c1} e $\epsilon_{cu1} ({}^0/{}_{00}) = 0,7f_{cm}^{0,31} \leq 2,8$ são as deformações do concreto obtidas através de formulações da tabela 3.1 da norma EN 1992-1-1(2004); E_{cm} é o módulo de elasticidade secante do concreto definido pela tangente à curva da Figura 7. Verificou-se após a realização do estudo numérico que a aplicação da norma referida apresentou boa similaridade com os resultados experimentais.

A Figura 7 apresenta o diagrama sugerido pela norma europeia EN 1992-1-1 (2004) para o concreto submetido à compressão uniaxial. Esse diagrama obedece à Equação 1.

Figura 7 - Curva tensão versus deformação proposta pela norma europeia EN 1992-1-1 (2004).

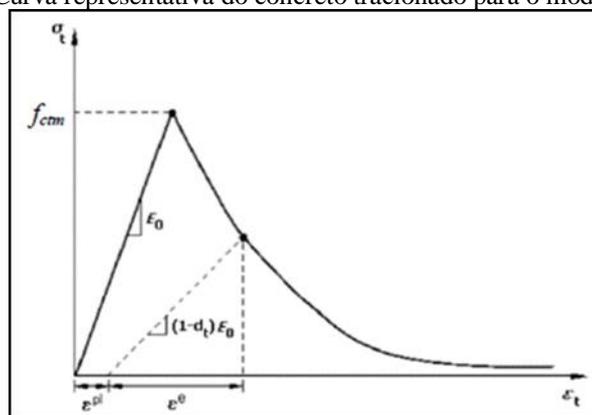


Fonte: EN 1992-1-1 (2004).

c) Comportamento à tração

Outro parâmetro necessário para modelagem no CDP é o comportamento do material quando submetido à tração. Conforme Figura 8, é possível perceber que o comportamento do concreto é elástico-linear até alcançar o valor da resistência média à tração (f_{ctm}), vindo a perder rigidez.

Figura 8 - Curva representativa do concreto tracionado para o modelo numérico



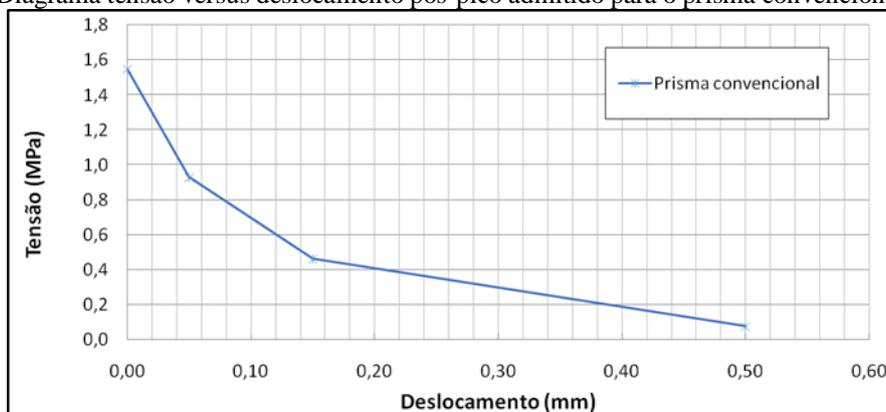
Fonte: Adaptado de Santos (2017).

De acordo com a documentação do ABAQUS, a utilização do gráfico da Figura 8, conduz à resultados mais sensíveis à malha e, por esse motivo, o ABAQUS disponibiliza critérios adicionais para definir o comportamento frágil do concreto após o valor da resistência média à tração (f_{ctm}) (SIMULIA, 2014).

Conforme estudo realizado por Silva (2013), o comportamento frágil do concreto na fase pós-pico, pode ser caracterizado por um diagrama tensão versus deslocamento ao contrário de um diagrama tensão versus deformação. Esse deslocamento é definido pela

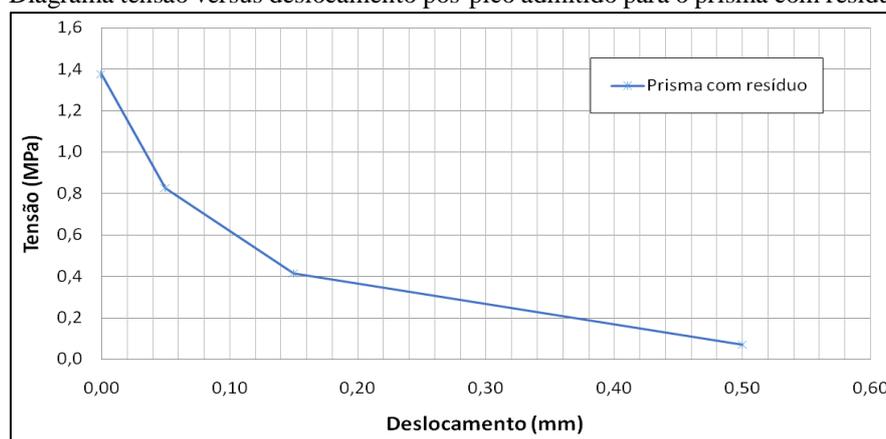
abertura de fissuras. O diagrama tensão versus deslocamento adotado neste trabalho, para a simulação do concreto tracionado, pode ser observado nas Figuras 9 e 10.

Figura 9 - Diagrama tensão versus deslocamento pós-pico admitido para o prisma convencional tracionado



Fonte: A autora (2018).

Figura 10 - Diagrama tensão versus deslocamento pós-pico admitido para o prisma com resíduo tracionado



Fonte: A autora (2018).

Os pontos utilizados nos diagramas acima foram definidos de acordo com o estudo de Silva (2013), conforme pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Pontos utilizados no diagrama tensão versus deslocamento pós-pico

σ_t (Mpa)	u (mm)
f_{ctm}	0,00
$0,6 f_{ctm}$	0,05
$0,3 f_{ctm}$	0,15
$0,05 f_{ctm}$	0,5

Fonte: Silva (2013).

Para realização do cálculo da resistência média à tração (f_{ctm}), foi utilizada a equação 2 da norma EN 1992-1-1(2004).

$$f_{ctm} = 0,3 f_{cm}^{2/3} \quad (2)$$

Onde: f_{cm} = resistência média à compressão

d) Evolução do dano

O modelo de dano com plasticidade permite a inclusão das variáveis de dano no concreto. Essas variáveis são responsáveis pela evolução da degradação da rigidez do material. Como nesse trabalho, considerou-se os prismas como um material homogêneo de concreto, o dano gerado na alvenaria é similar ao dano gerado no concreto (SANTOS, 2017).

A lei de evolução do dano na alvenaria considerada como no concreto submetido à compressão e à tração que é governada por duas variáveis: d_c (dano à compressão uniaxial) e d_t (dano à tração uniaxial), que conforme Cardoso (2014) estão correlacionadas com a deformação do concreto submetido à compressão e deslocamento por abertura de fissura, respectivamente. As variáveis de dano são definidas conforme as equações 3 e 4:

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{f_c} \quad (3)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_{ct}} \quad (4)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Serão apresentados a seguir, os resultados dos estudos experimentais.

5.1.1 Determinação da resistência à compressão dos corpos de prova do graute

A determinação da resistência à compressão dos corpos de prova dos grautes foi realizada conforme as recomendações da norma NBR 5739 “Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos” (ABNT, 2007).

Foram executados seis corpos de prova para cada um dos quatro traços analisados. O traço 1, denominado traço piloto, foi confeccionado com agregados naturais e fator

água/cimento (a/c) igual a 0,76. Porém, este traço não obteve a consistência compatível para realização do preenchimento dos prismas de bloco de concreto.

Com o intuito de alcançar a consistência desejada, foram adicionados 190ml de água no traço piloto (denominado traço 2). O traço 3 foi confeccionado com a substituição integral do agregado graúdo pelo resíduo e relação a/c igual a 0,95. Quanto ao traço 4, foi substituído 100% do agregado miúdo pelo resíduo, com a/c = 0,95 – Tabela 2.

Os dados obtidos através do rompimento dos corpos de prova cilíndricos, aos 28 dias, tiveram a resistência à compressão aproximada à resistência dos blocos de concreto. A média das resistências à compressão obtida em cada traço analisado, dos seis corpos de provas ensaiados, encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Resistência média à compressão dos traços de graute

TRAÇO	CIMENTO (Kg)	AGREGADO MIÚDO (Kg)	AGREGADO GRAÚDO (Kg)	RESÍDUO (Kg)	FATOR a/c	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)
2	1	2,2	2,4	-	0,95	9,7
3	1	2,2	-	2,4	0,95	11,5
4	1	-	2,4	2,2	0,95	12,5

Fonte: A autora (2018).

Após analisar os resultados comparativos entre os ensaios de caracterização física dos agregados, e levando-se em consideração o objetivo do trabalho que é a produção de um graute que possua características de fluidez e plasticidade aceitáveis, considerou-se a substituição do agregado natural graúdo pelo resíduo da fabricação dos blocos de concreto estruturais, devido a maior semelhança do resíduo com o agregado graúdo. Com base nas análises dos resultados dos traços obtidos e nas considerações descritas acima, o traço 3 foi adotado para ser utilizado na presente pesquisa para o preenchimento dos prismas.

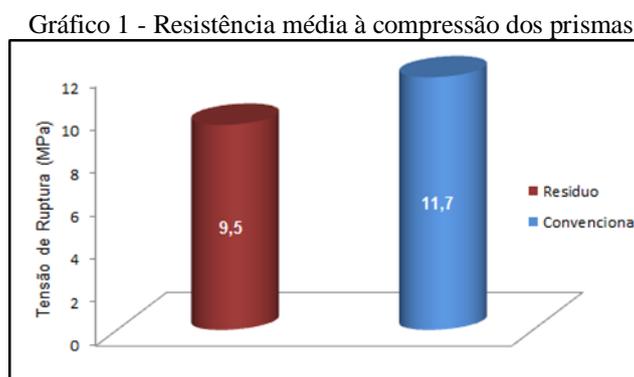
Apesar do traço 4 apresentar maior resistência média à compressão, de 12,5 MPa, a fluidez e a plasticidade não foram compatíveis com as exigidas para graute utilizado no preenchimento de blocos para alvenaria estrutural.

Após análise dos valores das resistências à compressão axial dos grautes apresentados, é possível afirmar que o graute com a substituição tanto do agregado graúdo, quanto do agregado miúdo pelo resíduo apresentaram maior resistência à compressão quando comparados ao graute confeccionado com agregado natural (convencional).

5.1.2 Determinação da resistência à compressão dos prismas

Conforme considerado nos resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova do graute, o traço definido para o preenchimento dos alvéolos dos prismas foi com 100% de resíduo em substituição ao agregado graúdo.

Com base nos valores das resistências à compressão axial dos prismas, pode-se dizer que, houve uma redução média da resistência mecânica à compressão de (20%) do prisma com resíduo em relação ao prisma preenchido com graute convencional, conforme pode ser observado no Gráfico 1.



Fonte: A autora (2018).

De acordo com os resultados obtidos nos testes experimentais de resistência à compressão do graute, esperava-se que os prismas confeccionados com a substituição do agregado graúdo pelo resíduo apresentassem melhor desempenho mecânico, mas verificou-se uma variação nos resultados. Acredita-se que este efeito tenha ocorrido por consequência da perda de água para os blocos e argamassa, podendo influenciar no fator a/c do graute conforme observa-se na Figura 11.

Além disso, conforme dito anteriormente, sabe-se que quanto maior o módulo de finura de um agregado, maior é o número de grãos por unidade de volume de suas partículas, aumentando a área de superfície destes, por consequência, a necessidade de água para envolver os grãos. Isto é, a composição granulométrica tem grande influência nas propriedades das argamassas e concretos. A realização da substituição do agregado graúdo que possui o módulo de finura maior que o agregado miúdo, que por sua vez é diferente do módulo de finura do resíduo, conforme caracterização granulométrica, pode ter influenciado na queda do desempenho mecânico dos prismas confeccionados com graute com resíduo.

Figura 11 - Absorção da água do graute pelo prisma



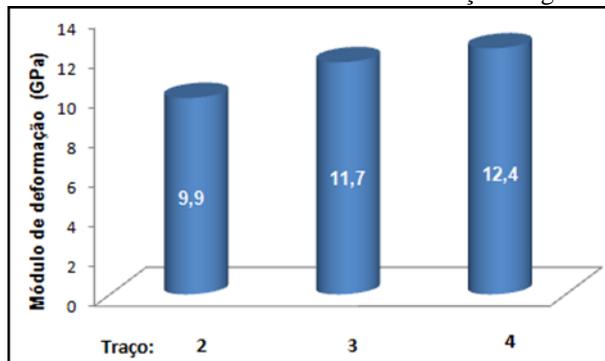
Fonte: A autora (2018).

5.1.3 Módulo de deformação do graute

Os valores para o módulo de deformação de cada traço foram obtidos através da média dos módulos dos corpos de prova cilíndricos. Os valores médios para os traços estão demonstrados no

Gráfico 22. Os traços 3 e 4 que foram confeccionados com a substituição do agregado natural pelo resíduo obtiveram módulo superior ao traço convencional (traço 2).

Gráfico 2 – Média do módulo de deformação do graute



Fonte: A autora (2018).

5.1.4 Módulo de deformação dos prismas

O valor do módulo de deformação longitudinal dos prismas confeccionados com graute convencional e com resíduo foram de 24,9 GPa e 11,6 GPa respectivamente. Na ausência de uma norma específica para determinar o módulo de deformação da alvenaria estrutural, adota-se a NBR 8522 (ABNT, 2008) que descreve o método de obtenção do módulo de deformação tangencial inicial, caracterizando a deformabilidade do concreto submetido às tensões entre 0,5 MPa e 30% da tensão característica de ruptura.

Verificou-se, a partir de realização de gráficos, que os prismas confeccionados com graute convencional apresentaram maior fragilidade, fato que é justificado por um

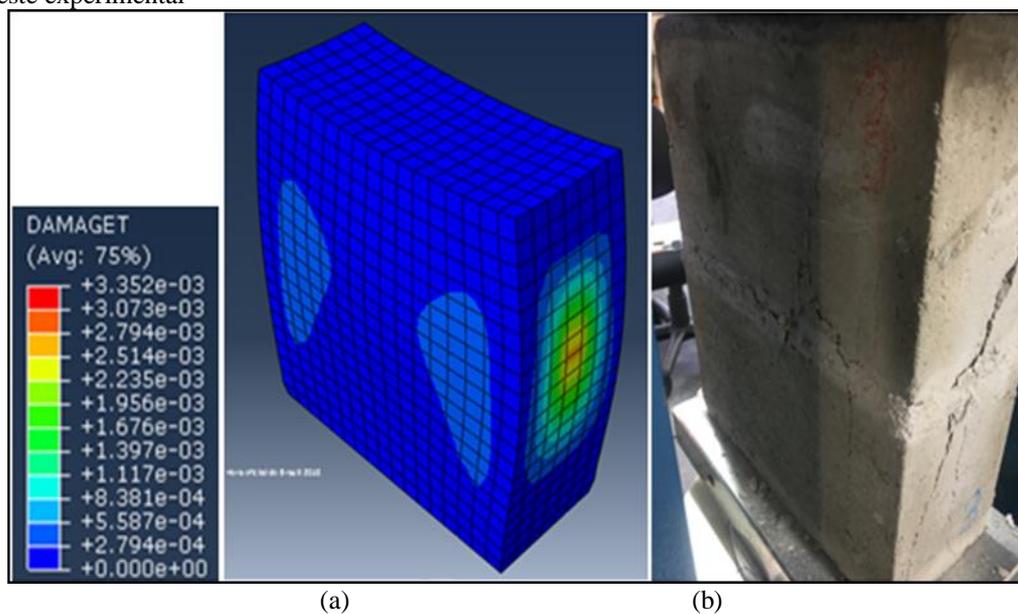
módulo de elasticidade elevado (25 GPa). Já as amostras dos prismas com graute com resíduo apresentaram maiores deformações.

5.2 ESTUDO NUMÉRICO

A seguir são apresentados os resultados obtidos a partir das modelagens numéricas e a comparação com os resultados obtidos experimentalmente. Verificam-se, também, o valor do dano à compressão e/ou à tração conforme o número de incrementos analisados, a fim de comparar com o modo de ruptura dos prismas observado durante os testes experimentais.

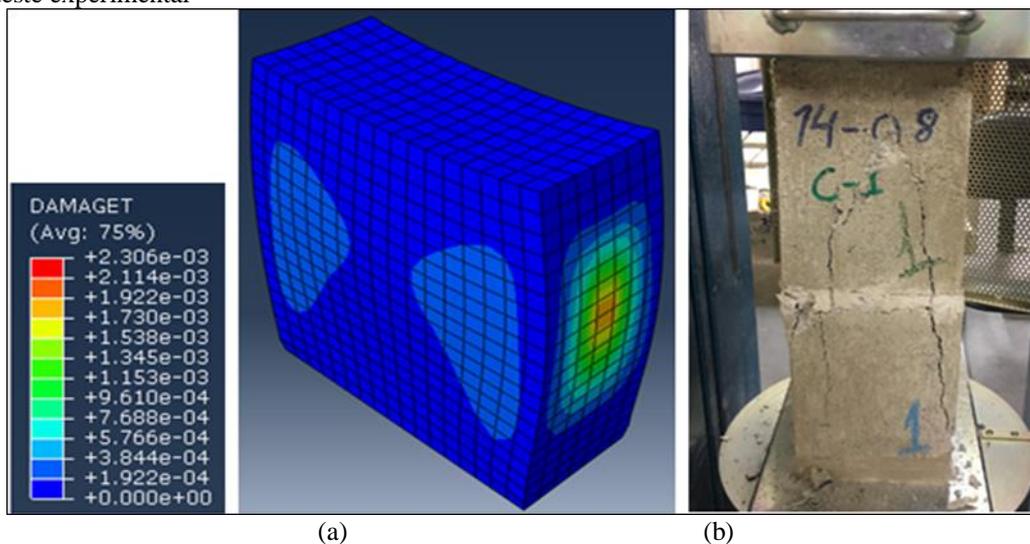
Foi possível verificar de forma clara que o colapso da estrutura se deu pelos esforços de tração no bloco ocasionados pelo esmagamento da argamassa conforme pode ser observado nas comparações entre os resultados numérico e experimental ilustrados na Figura 12 e 13.

Figura 12 - Modo de ruptura dos prismas confeccionados com graute convencional: (a) simulação numérica; (b) teste experimental



Fonte: A autora (2018).

Figura 13 - Modo de ruptura dos prismas confeccionados com graute com resíduo: (a) simulação numérica; (b) teste experimental



Fonte: A autora (2018).

Nota-se através dos resultados apresentados na Tabela 3 que os modelos numéricos dos prismas representaram bem o comportamento mecânico obtido experimentalmente, com relação a tensão de ruptura e deformação.

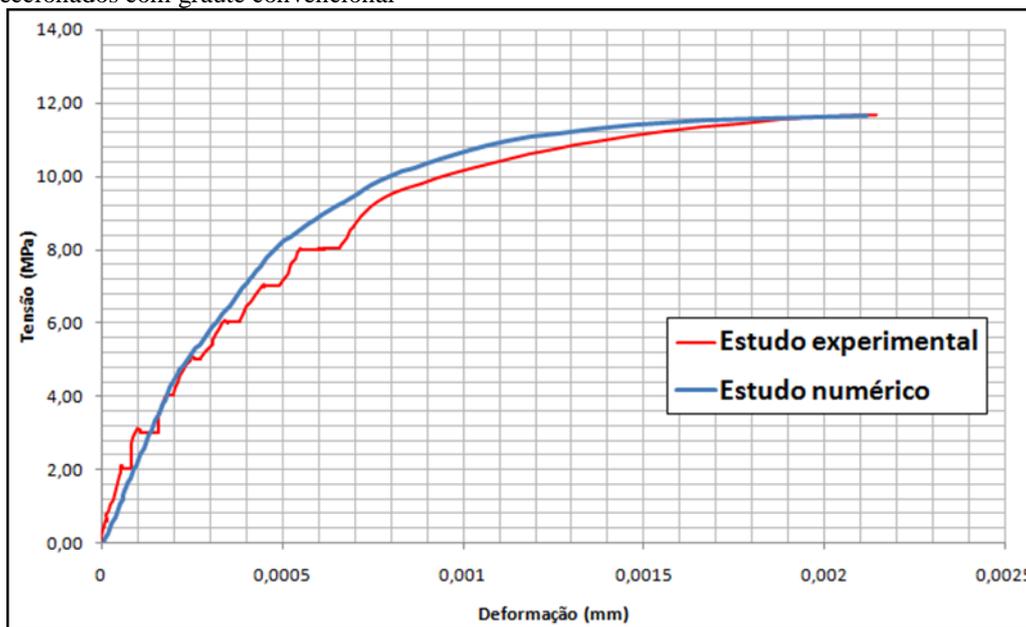
Tabela 3 - Tensão de ruptura obtida no estudo experimental e numérico

PRISMA:		DEFORMAÇÃO	
		TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	DE MÁXIMA (mm)
CONVENCIONAL	EXPERIMENTAL	11,7	0,0021430
	NUMÉRICO	11,65	0,0021145
RESÍDUO	EXPERIMENTAL	9,5	0,0020380
	NUMÉRICO	9,5	0,0020761

Fonte: A autora (2018).

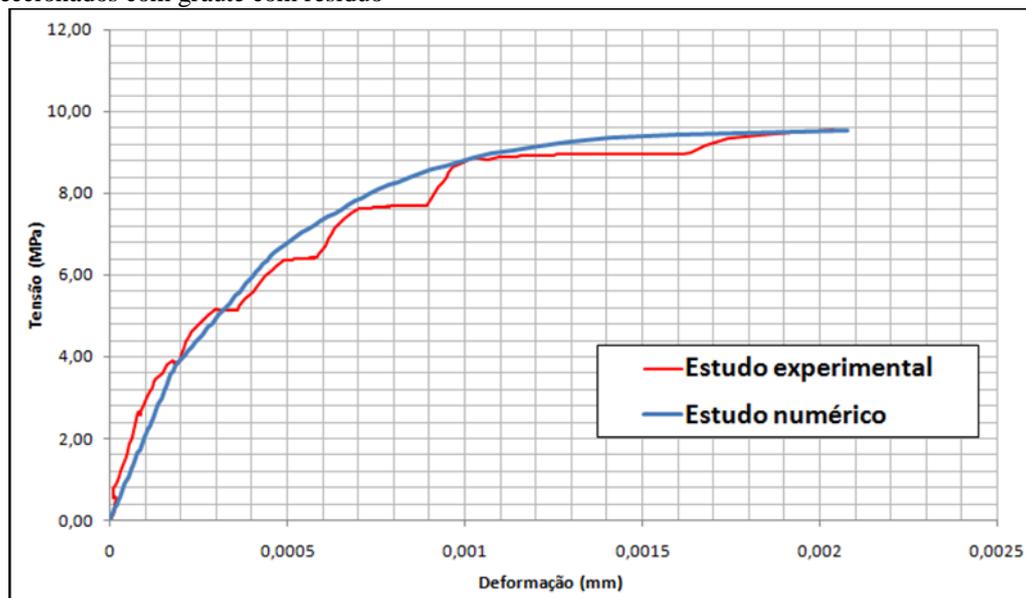
Nos Gráficos 3 e 4, são apresentadas as curvas tensão \times deformação do modelo numérico para os dois tipos de prismas analisados. Ambos os resultados são comparados com os obtidos experimentalmente.

Gráfico 3 - Curvas tensão x deformação obtidas no estudo experimental e simulação numérica dos prismas confeccionados com graute convencional



Fonte: A autora (2018).

Gráfico 4 - Curvas tensão x deformação obtidas no estudo experimental e simulação numérica dos prismas confeccionados com graute com resíduo



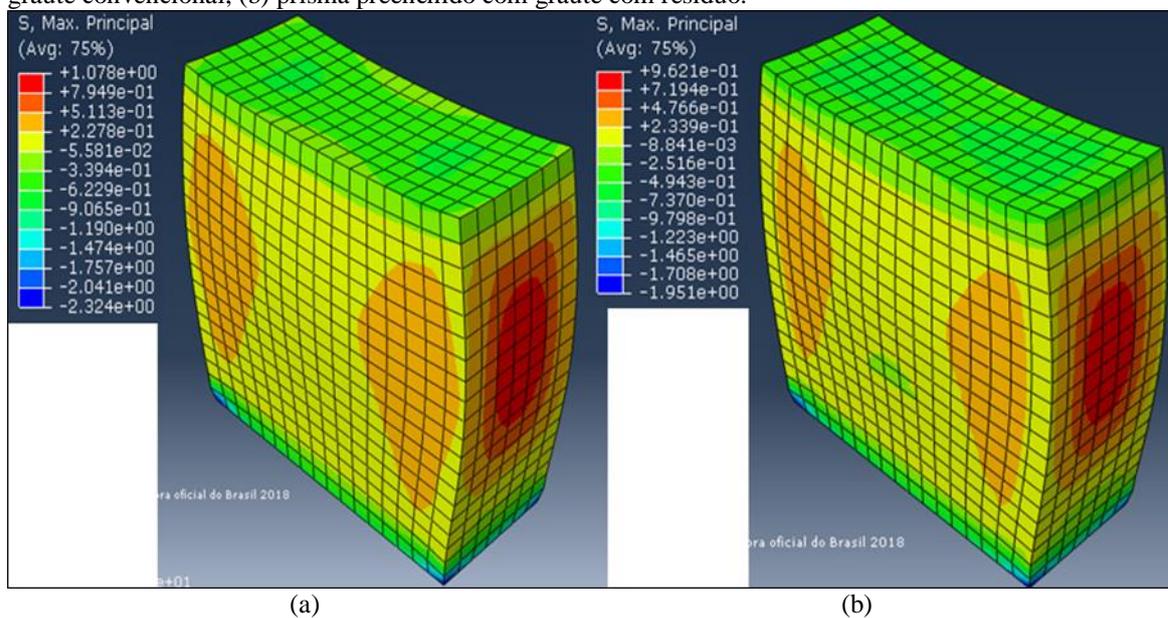
Fonte: A autora (2018).

Baseado nos resultados apresentados nos gráficos acima, é possível perceber que os dois tipos de prisma apresentaram comportamento não linear. Os dados obtidos na análise numérica mostraram-se adequados a esse comportamento. Pode-se constatar que houve um bom ajuste da curva numérica à curva experimental para os dois modelos.

Na Figura 14 é possível verificar as distribuições e acúmulo de tensões máximas nos prismas submetidos a esforços de compressão uniaxial, obtidos numericamente.

Ao analisar as tensões principais máximas atuantes nos prismas, nota-se que surgem tensões de tração, que se propagam ao longo da estrutura do prisma, principalmente, nas faces laterais, representando o processo que originou o colapso dos mesmos. Esse comportamento coincidiu com os resultados obtidos nos modelos experimentais, conforme será apresentado no próximo item.

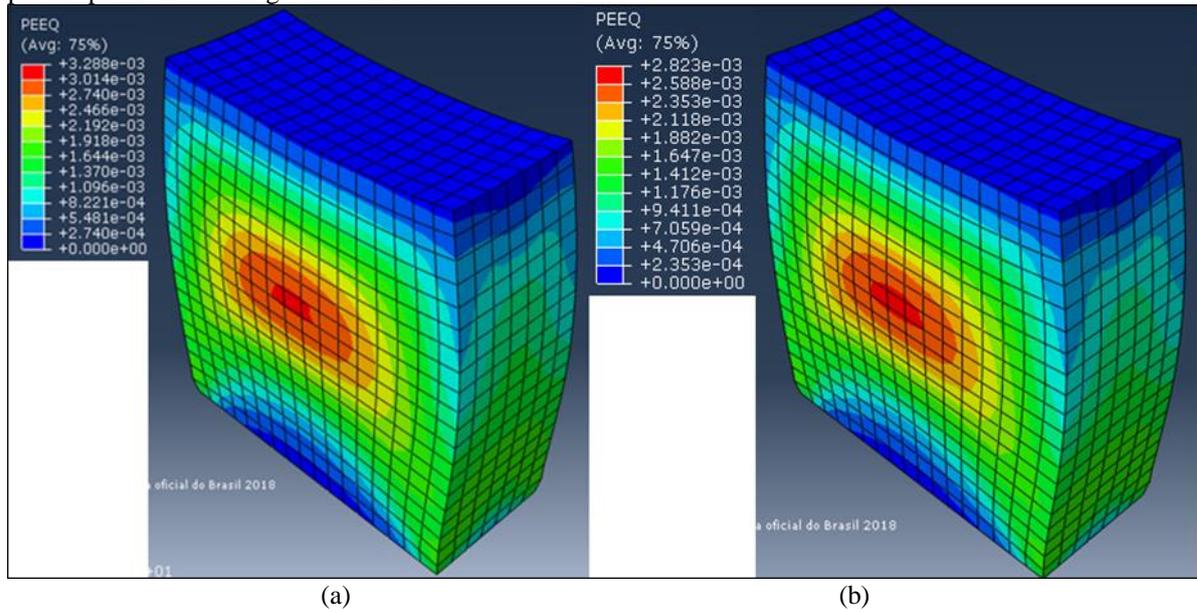
Figura 14 - Distribuição de tensões principais máximas obtidas numericamente: (a) prisma preenchido com graute convencional; (b) prisma preenchido com graute com resíduo.



Fonte: A autora (2018).

Na Figura 15 apresentam-se as distribuições das deformações equivalentes, obtidas numericamente, quando carregados uniaxialmente. Nota-se que os dois modelos apresentaram deformações similares.

Figura 15 - Distribuição de deformações equivalentes: (a) prisma preenchido com graute convencional; (b) prisma preenchido com graute com resíduo



Fonte: A autora (2018).

5.3 MODOS DE RUPTURA DOS PRISMAS

Após a realização do carregamento uniaxial nos prismas via estudo experimental e numérico, foi possível identificar que o modo de ruptura apresentou-se de acordo com o que foi exposto por Nalon, *et al.*, (2016).

Na Figura 16 é possível visualizar as imagens registradas após a ruptura de um dos prismas preenchidos com graute convencional e com resíduo. Foi possível perceber o esfacelamento da argamassa entre a junção bloco-argamassa. Este ocorreu de forma dispersa, com expulsão do material fragmentado em pontos localizados da junta. Ao fim dos ensaios, já havia ocorrido a microfissuração generalizada da argamassa. Também se notou o início do fendilhamento da superfície dos blocos na região próxima à junta de assentamento.

Este comportamento de esmagamento localizado da junta foi verificado em alguns prismas durante a realização dos testes experimentais. Pode-se dizer que, neste caso, no instante que os prismas atingem a carga de ruptura, alguns pontos da argamassa já haviam superado sua resistência à compressão confinada, gerando o esmagamento da junta. O esmagamento da argamassa causa concentração de tensões que geram fissuras nos blocos, conseqüentemente, surgem fissuras nas paredes, conforme se observa na Figura 16. A concentração de tensões nas paredes laterais dos prismas pôde ser observada, também, nos resultados obtidos numericamente, conforme ilustra a Figura 14.

Figura 16 - Rompimento dos prismas iniciando pela argamassa



Fonte: A autora (2018).

Na Figura 17 apresenta-se o mecanismo de ruptura observado, durante o aumento do carregamento. À medida que se aumentava o carregamento pôde-se escutar o som típico do esfarelamento do cordão de argamassa, mas o prisma continuou a resistir a cargas de compressão maiores. A seguir, fissuras verticais começaram a surgir nas paredes dos blocos. A ruptura ocorreu logo depois do aparecimento destas fissuras, quando o graute rompeu por compressão.

Figura 17 - Prisma com rompimento por compressão



Fonte: A autora (2018).

Como no caso do prisma anterior, indícios sonoros do esmagamento da argamassa puderam ser observados durante a execução do ensaio. Na maioria dos prismas, fissuras verticais surgiram nas paredes dos blocos nos instantes próximos à ruptura. Estas fissuras se justificam pelo surgimento de esforços de tração no bloco, gerados pela restrição de movimento da argamassa de assentamento, aliados com os esforços de tração no bloco gerados pela expansão do graute.

Em alguns prismas preenchidos com graute com resíduo, foi possível observar o descolamento de pedaços dos blocos, expulsando as suas paredes trincadas (Figura 8). Verificou-se que, durante o ensaio de compressão destes prismas, a expansão do graute causou tensões de tração nas paredes laterais do bloco; comportamento também evidenciado na análise numérica.

Figura 18 - Prismas com deslocamento das paredes laterais



Fonte: A autora (2018).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos nos testes experimentais, foi possível verificar que o graute produzido a partir da substituição integral do agregado natural gráudo ou miúdo apresentou comportamento mecânico adequado, quando se considera a resistência mecânica à compressão axial.

Quanto à simulação numérica, considera-se que o modelo de dano plástico (CDP) representou de forma adequada os componentes da alvenaria estrutural, por ter sido capaz de reproduzir o comportamento mecânico e o modo de ruptura dos prismas. Além disso, a macromodelagem aliada ao modelo de dano adotado foi capaz de representar a ruptura

dos prismas, que se deu por tração no bloco, ocasionada, principalmente, pelo esmagamento da argamassa. Esse comportamento foi exatamente igual ao que foi observado nos ensaios experimentais. Pode-se concluir que o modelo numérico foi capaz de representar de forma adequada o modelo experimental do prisma, com relação ao valor de resistência à compressão e deslocamento.

AGRADECIMENTOS

Universidade FUMEC - Faculdade de Engenharia e Arquitetura da FUMEC.

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS– ABNT. NBR 5739/2007: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS– ABNT. NBR 8522/2017: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

CAMACHO, J. S. Projeto de edifícios de Alvenaria Estrutural. Ilha Solteira: [s.n.], 2006.

CARDOSO, H. S. Estudo Teórico-Experimental de Parafusos Utilizados como Dispositivos de Transferência de Carga em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto. Dissertação (Mestrado). UFMG, Belo Horizonte, 2014.

CONAMA. Resolução CONAMA n ° 307 Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução Nº 307, Brasília, 05 Julho 2002.

EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium, 2004.

JANUZZI, R. V. et al. Estudo do comportamento mecânico de blocos produzidos com escória de aciaria elétrica visando à aplicabilidade em alvenaria estrutural. IBRACON, 2014.

JOHN, V. M.; AGOPYAN,. Reciclagem de resíduos da construção. Seminário Reciclagem de Resíduos Domiciliares, São Paulo, 05 Abril 2013.

MARTINS, D. D. G. Utilização de resíduos gerados na fabricação de blocos de concreto, no momento da prensagem, para confecção de micro concreto. Dissertação (Mestrado). UFMG, Belo Horizonte, 2012.

NALON, G. et al. Análise dos mecanismos de ruptura de prismas de blocos de concreto submetidos à compressão axial. IBRACON, Outubro 2016.

OBAIDAT, A. T.; ABO EL EZZ, A.; GALAL, K. Compression behavior of confined concrete masonry boundary elements. ScienceDirect (Elsevier B.V.), v. 132, p. 562-575, Fevereiro 2017. ISSN 0141-0296.

SANTOS, C. F. R. et al. Numerical and experimental evaluation of masonry. Ibracon Structures and materials journal, v. 10, p. 477 - 508, Abril 2017. ISSN 1983-4195.

SANTOS, L. R. Análise Numérica de Conectores Parafusos em Pilares mistos Circulares Preenchidos com Concreto. Dissertação (Mestrado). UFMG, Belo Horizonte, 2017.

SILVA, H. P. Simulação Numérica do Comportamento de Conectores de Cisalhamento Tipo Crestbond. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

SIMULIA (2014). Software ABAQUS 6.14. Dassault Systèmes, USA