

Modelagem computacional da fissuração em blocos e muretas de alvenaria de concreto celular autoclavado.

L. E. Fernández-Baqueiro^{1*} , L. R. Ceballos-Pérez¹ ,
J. A. Moreno-Herrera¹ , J. L. Varela-Rivera¹ 

* Autor de Contato: luis.fernandez@correo.uady.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i3.800>

Recebido: 12/03/2025 | Correções recebidas: 30/07/2025 | Aceito: 05/08/2025 | Publicado: 01/09/2025

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi estudar o processo de fissuração em blocos e muretas de alvenaria de concreto celular autoclavado (CCA) com modelos de fissura discreta do Método dos Elementos Finitos. Os resultados de um estudo experimental foram analisados para desenvolver modelos computacionais. Foram elaborados modelos dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral dos blocos e do ensaio de resistência à tração diagonal das muretas de alvenaria, de diferentes tamanhos. Os critérios de falha de Rankine e Mohr foram considerados para os elementos de interface. As cargas de fissuração foram determinadas. Concluiu-se que, com os modelos desenvolvidos, as cargas de fissuração e o mecanismo de fratura dos blocos e muretas de alvenaria de CCA são bem simulados em comparação com o que foi observado experimentalmente.

Palavras-chave: concreto celular autoclavado; alvenaria; resistência à tração; Método dos Elementos Finitos; modelo de fissura discreta.

Citar como: Fernández-Baqueiro, L. E., Ceballos-Pérez, L. R., Moreno-Herrera, J. A., Varela-Rivera, J. L. (2025), “Modelagem computacional da fissuração em blocos e muretas de alvenaria de concreto celular autoclavado.”, Revista ALCONPAT, 15 (3), pp. 230 – 248, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i3.800>

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor Fernandez-Baqueiro contribuiu com a ideia original (40%), metodologia (40%), coleta de dados (30%), modelagem computacional (40%), discussão dos resultados (30%), redação do artigo (40%) e revisão e edição do artigo (30%). O autor Ceballos-Pérez contribuiu com a ideia original (30%), metodologia (30%), coleta de dados (10%), modelagem computacional (60%), discussão dos resultados (30%), redação do artigo (30%) e revisão e edição do artigo (30%). O autor Moreno-Herrera contribuiu com a ideia original (10%), metodologia (20%), coleta de dados (30%), discussão dos resultados (20%), redação do artigo (15%) e revisão e edição do artigo (20%). O autor Varela-Rivera contribuiu com a ideia original (20%), metodologia (10%), coleta de dados (30%), discussão dos resultados (20%), redação do artigo (15%) e revisão e edição do artigo (20%).

Licença Creative Commons

Copyright (2025) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2026, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2026.

Computational modeling of cracking in autoclaved aerated concrete units and masonry wallets.

ABSTRACT

The objective of this research was to study the cracking process of autoclaved aerated concrete (AAC) units and masonry wallets with discrete crack models of the Finite Element Method. The results of an experimental study were analyzed to develop computational models. Models of the splitting tensile strength tests of units and the diagonal tensile strength test of masonry wallets, of different sizes, were developed. Rankine and Mohr failure criteria were considered for the interface elements. The cracking loads were determined. It was concluded that, with the developed models, the cracking loads and the failure mechanism of AAC units and wallets are well simulated compared to what was observed experimentally.

Keywords: autoclaved aerated concrete; masonry; tensile strength; Finite Element Method; discrete crack model.

Modelación computacional del agrietamiento en bloques y muretes de mampostería de concreto celular de autoclave.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue estudiar el proceso de agrietamiento en bloques y muretes de mampostería de concreto celular de autoclave (CCA) con modelos de grieta discreta del Método del Elemento Finito. Se analizaron los resultados de un estudio experimental para desarrollar modelos computacionales. Fueron elaborados modelos de bloques sujetos a tensión por compresión y muretes de mampostería, de diferente tamaño, sujetos a compresión diagonal. Los criterios de falla de Rankine y Mohr fueron considerados para los elementos de interfaz. Las cargas de agrietamiento fueron determinadas. Se concluyó que, con los modelos desarrollados, las cargas de agrietamiento y el mecanismo de falla de bloques y muretes de CCA se simulan bien en comparación con lo observado experimentalmente.

Palabras clave: concreto celular de autoclave; mampostería; resistencia a tensión; Método del Elemento Finito; modelo de grieta discreta.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

NOMENCLATURA

A_D	Área da diagonal da mureta
c	Coesão do material
D	Diagonal da mureta
D_{PA}	Porcentagem da diagonal da mureta que fatura no modelo computacional
E_{CCA}	Módulo de elasticidade do CCA
E_m	Módulo de elasticidade da alvenaria
f	Critério de falha de material
f_{CCA}	Resistência à compressão do CCA
f_t	Resistência à tração do material
f_{tCCA}	Resistência à tração por compressão diametral do CCA
f_{tCCAc}	Resistência à tração por compressão diametral do CCA computacional
G_{CCA}	Módulo de cisalhamento CCA
G_m	Módulo de cisalhamento da alvenaria experimental do ensaio de muretas
G_{mc}	Módulo de cisalhamento computacional de alvenaria para modelagem de muretas
H	Altura do bloco CCA
L	Comprimento da mureta
P_{crc}	Carga de fissuração computacional da mureta de CCA
P_{me}	Carga máxima experimental da mureta de CCA
P_{pe}	Carga máxima experimental do bloco CCA
T	Espessura do bloco ou da mureta de CCA
t_n	Tensões normais
t_t	Tensões de cisalhamento
ν_{CCA}	Razão de Poisson do CCA
ν_m	Resistência à compressão diagonal experimental
ν_{mc}	Resistência à compressão diagonal computacional associada à carga de fissuração da mureta
γ_2	Deformação angular produzida pela tensão de cisalhamento τ_2 da mureta
τ_1	Tensão de cisalhamento correspondente a 0,00005 deformação angular da mureta
τ_2	Força de cisalhamento correspondente a 40% da carga máxima da mureta
ϕ	Ângulo de atrito interno do material

1. INTRODUÇÃO

A alvenaria é amplamente utilizada na indústria da construção em todo o mundo (Hamid, 2018; Borah et al., 2023). O uso de elementos de argila e concreto na construção de elementos e estruturas de alvenaria é comum (por exemplo, GCM, 2023). No entanto, no México e em outros países, o uso de elementos de concreto aerado autoclavado (ACC) aumentou (Małyszko et al., 2017; van Boggelen, 2018; Varela-Rivera et al., 2018 e 2023). Isso ocorre porque o ACC é um material leve com excelentes propriedades de isolamento térmico (Costa et al., 2011). Além disso, o ACC oferece vantagens em termos de controle de qualidade na fabricação de blocos e construção de paredes em comparação com outros tipos tradicionais de alvenaria (Varela-Rivera et al., 2024). O CCA é um material composto de cimento Portland, cal, areia de sílica, gesso, água e pó de alumínio (ASTM C1693-11, 2017). O CCA pode ter uma resistência à compressão que varia dependendo de sua densidade e composição. Em geral, a resistência à compressão do CCA pode variar de 2 MPa a 6 MPa (ASTM C1693-11, 2017) e seu módulo de elasticidade entre 1300 MPa e 2500 MPa (TMS 402/602, 2022). O coeficiente de Poisson varia entre 0,15 e 0,25, sendo 0,20 um valor recomendado na ausência de dados experimentais (Aroni et al., 1993). Na ASTM C1693-11 (2017), os blocos de CCA são classificados de acordo com sua resistência à compressão como Classe 2, 3, 4, 5 e 6; por exemplo, um bloco CCA Classe 4 tem uma resistência à compressão de 4 MPa.

Em geral, as propriedades mecânicas da alvenaria são diferentes daquelas das peças individuais e argamassas que a compõem (Hamid, 2018). Portanto, ensaios individuais de peças, argamassas e alvenaria são necessários para determinar o comportamento constitutivo e avaliar a qualidade de cada um desses materiais em termos de sua resistência (Hamid, 2018). As propriedades mecânicas da alvenaria são usadas para prever a resistência de paredes de alvenaria (SENCICO, 2018; GCM, 2023). Por exemplo, a resistência ao cisalhamento de paredes de alvenaria confinadas é uma função da resistência à compressão diagonal da alvenaria (Riahi et al., 2009). Por outro lado, o Código de Projeto de Alvenaria dos Estados Unidos da América (TMS 402/602, 2022) considera as propriedades mecânicas dos membros para prever a resistência de paredes de alvenaria CCA. Entretanto, os códigos (por exemplo, SENCICO, 2018; TMS 402/602, 2022; GCM, 2023) não possuem equações de projeto para paredes de alvenaria confinada CCA.

Na América Latina e em outras partes do mundo, a alvenaria confinada é amplamente utilizada para a construção de moradias e outros tipos de edifícios devido ao seu baixo custo e facilidade de construção (Marques e Lourenço, 2019; Borah et al., 2023). Alguns pesquisadores estudaram o comportamento de paredes de CCA de alvenaria confinada submetidas a cargas no plano (Varela-Rivera et al., 2018 e 2023; Jasiński e Gąsiorowski, 2023). Nessas investigações, foram considerados blocos sólidos de CCA colados com argamassa de paredes finas. O comportamento de cisalhamento e flexão desses tipos de paredes foi estudado. No caso de paredes com comportamento dominado por cisalhamento, ocorreram dois eventos importantes: a carga lateral que produziu fissuras diagonais das paredes e a carga lateral máxima. Dois tipos de fissuras diagonais foram observados no painel da parede: fissuras de cisalhamento diagonais e fissuras de cisalhamento por flexão. As fissuras de cisalhamento diagonais são fissuras inclinadas que se formam no painel de CCA (Varela-Rivera et al., 2018 e 2023; Jasiński e Gąsiorowski, 2023). As fissuras de cisalhamento por flexão iniciam como fissuras de flexão horizontais nas paredes e se propagam como fissuras inclinadas no painel de CCA (Varela-Rivera et al., 2018 e 2023). Varela-Rivera et al. (2018 e 2023) desenvolveram equações de projeto para determinar as resistências ao cisalhamento e à flexão de paredes de CCA confinadas, que estão associadas às cargas que produzem a fissuração correspondente. Ao analisar a distribuição de tensões principais nas paredes testadas por Varela-Rivera et al. (2018) usando modelos de elementos finitos, observou-se que a orientação dessas fissuras iniciais é perpendicular à orientação das principais tensões de tração (Fernández-Baqueiro et al., 2021). Portanto, é necessário estudar o processo de fissuração por

tração em blocos e muretas de alvenaria de CCA para posteriormente modelar fissuras por cisalhamento e por flexão-cisalhamento em paredes de CCA confinadas.

Nos ensaios de paredes de alvenaria confinada CCA conduzidos por Varela-Rivera et al. (2018 e 2023), observou-se que fissuras de cisalhamento diagonais se propagavam através dos blocos. Por outro lado, nos ensaios conduzidos por Jasiński e Gąsiorowski (2023), observou-se que fissuras de cisalhamento diagonais se propagavam principalmente através de juntas de argamassa. A diferença na localização das fissuras pode estar associada ao tipo de argamassa de parede fina utilizada. Varela-Rivera et al. (2018 e 2023) utilizaram uma argamassa forte de parede fina que tinha uma alta resistência à compressão (15,9 MPa e 17,8 MPa, respectivamente) e estava em conformidade com a norma ASTM C1660-10 (2018). Em contraste, Jasiński e Gąsiorowski (2023) utilizaram uma argamassa fraca de parede fina com baixa resistência à compressão (6,1 MPa). Fissuras em juntas de argamassa também foram observadas em outros estudos em paredes de alvenaria de concreto armado (CAA) não reforçadas com juntas de argamassa de paredes finas e fracas (Ferretti et al., 2015; Jasiński e Drobiec, 2016).

Para estudar a resistência à tração de blocos de CCA, ensaios podem ser realizados em blocos submetidos a tensões de compressão (ASTM C1006-84, 2001). Para estudar a resistência à tração de alvenaria de CCA, podem ser ensaiadas muretas quadradas submetidas à compressão diagonal (NMX-C-464-ONNCCE, 2010; ASTM E519/E519M-22, 2022). A norma mexicana NMX-C-464-ONNCCE (2010) permite ensaiar muretas de pelo menos uma vez e meia a dimensão máxima da peça, enquanto a normativa dos Estados Unidos da América (ASTM E519/E519M-22, 2022) permite ensaiar muretas de pelo menos 120 cm x 120 cm.

Fissuras causadas por tensões de tração podem ser simuladas computacionalmente usando modelos não lineares do Método dos Elementos Finitos (MEF). Vários tipos de modelos foram desenvolvidos, incluindo o modelo de fissura discreta, o modelo de fissura distribuída e o modelo de fissura embutida (Fernández e Ayala, 2004). O modelo de fissura discreta usa elementos de interface para simular fissuras e, portanto, é usado quando a possível localização da fissura é conhecida (Shi et al., 2014). Por exemplo, no caso de estruturas de alvenaria em que a fissuração ocorre na junta de argamassa (Ahmed et al., 2019). O Modo I (abertura) e o Modo II (deslizamento de cisalhamento no plano) da Mecânica da Fratura (Anderson, 2017) podem ser modelados usando elementos de interface de um modelo de fissura discreta. No caso da alvenaria, sendo um material composto por peças unidas por argamassa, diversas estratégias de modelagem não linear têm sido utilizadas (D'altri et al., 2020), incluindo micromodelagem, mesomodelagem e macromodelagem (Lourenço et al., 1998; Milanesi et al., 2015). Na primeira, é feita uma representação das peças, da argamassa e da interface entre a argamassa e a peça. Na segunda, a peça e a junta são modeladas com elementos de interface. Na terceira, ela é modelada como um material compósito anisotrópico. Parker et al. (2007) estudaram a distribuição de tensões de tração que ocorrem em ensaios de bloco e muretas usando modelos elásticos do Método dos Elementos Finitos (MEF). Eles observaram que as tensões de tração ocorrem em ambos os ensaios; no entanto, a distribuição de tensões de tração no ensaio de bloco é mais uniforme do que no ensaio de mureta. Małyszko et al. (2017) estudaram o comportamento de tração do CCA usando ensaios de cilindro e cubo e modelos MEF não lineares usando a relação constitutiva de Mohr-Coulomb com plasticidade isotrópica. Eles determinaram o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson e analisaram os modos de falha observados nos diferentes ensaios. Ferretti et al. (2015) estudaram o comportamento de paredes de CCA de alvenaria não reforçada usando ensaios experimentais e modelos MEF não lineares. Eles observaram que a alvenaria CCA exibe um leve comportamento anisotrópico devido à argamassa de parede fina usada. Eles calibraram o macromodelo desenvolvido por Lourenço et al. (1998) para alvenaria tradicional. Milanesi et al. (2015) estudaram o comportamento de paredes diafragma de alvenaria não armada de concreto armado (CCA) em pórticos de concreto armado utilizando ensaios experimentais e modelos de fissuras distribuídas não lineares do MEF. Eles realizaram

modelagem da alvenaria e concluíram que o modelo calibrado reproduz satisfatoriamente o padrão de fissuração.

O objetivo desta pesquisa foi estudar o processo de fissuração em blocos e muretas de alvenaria de concreto celular autoclavado com modelos fissuração discreta usando o Método dos Elementos Finitos. Com base nos resultados de um estudo experimental no qual blocos e muretas de CCA foram testados (Fernández-Baqueiro et al., 2022), os mecanismos de falha observados foram analisados. Modelos de blocos foram desenvolvidos e a resistência à tração do material foi calibrada considerando um modo de fratura I. Modelos de muretas foram desenvolvidos considerando um modo de fratura I e diferentes tamanhos de muretas. Um modelo de mureta de 60 cm x 60 cm foi desenvolvido para simular os dois tipos de fissuração observados nos testes experimentais.

2. ESTUDO EXPERIMENTAL

Neste trabalho de pesquisa, foram utilizados os resultados de um estudo experimental das propriedades mecânicas do CCA, realizado por Fernández-Baqueiro et al. (2022), cujos detalhes podem ser encontrados na tese de Pérez (2019). Este estudo comparou as propriedades mecânicas de blocos de CCA e alvenaria. Foram considerados blocos maciços de 15 cm x 20 cm x 61 cm (espessura x altura x comprimento) e argamassa resistente de paredes finas com resistência à compressão de (17,8 MPa). Os blocos eram de Classe 4, segundo o fabricante.

Três cubos de CCA e três prismas retangulares foram testados sob compressão axial de acordo com ASTM C1693-11 (2017). A resistência à compressão do CCA foi determinada a partir dos cubos, e o módulo de elasticidade do CCA foi determinado a partir dos prismas retangulares. Os cubos tinham 10 cm de cada lado, e os prismas retangulares tinham 10 cm x 20 cm x 10 cm (espessura x altura x comprimento). Os testes foram realizados em uma máquina universal com capacidade de 600 kN. Uma célula de carga foi usada nos testes para fornecer suporte às cargas medidas pelo sistema da máquina universal. As deformações unitárias foram medidas usando dois potenciômetros lineares colocados nas laterais dos prismas retangulares.

Três pilares de CCA foram testados sob compressão axial de acordo com a norma NMX-C-464-ONNCCE (2010). Os pilares mediam 15 cm x 61 cm x 40 cm (espessura x altura x comprimento) e consistiam em três blocos sobrepostos unidos com juntas horizontais de argamassa de paredes finas de aproximadamente 3 mm de espessura. Os blocos empregados nos pilares foram aparados em seu comprimento, permanecendo 15 cm x 20 cm x 40 cm (espessura x altura x comprimento); isso tinha a intenção de garantir a aplicação de uma tensão de compressão constante no pilar. Os pilares foram testados em uma estrutura metálica, e as cargas foram aplicadas por um atuador hidráulico. Uma célula de carga e transdutores de pressão foram usados para registrar as cargas. A deformação axial foi medida em um comprimento calibrado de 40 cm usando dois potenciômetros lineares, um colocado em cada face. Observou-se que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade da alvenaria, obtidos no ensaio de pilares, foram semelhantes aos obtidos nos ensaios de cubo (f_{CCA}) e prisma retangular (E_{CCA}), respectivamente. A resistência à compressão média da CCA foi de 5,28 MPa e o módulo de elasticidade médio da CCA foi de 2138 MPa. A resistência à compressão média da alvenaria CCA foi de 5,22 MPa e o módulo de elasticidade médio da alvenaria CCA foi de 2,182 GPa.

A resistência aos esforços de compressão do CCA foi determinada testando 5 blocos de acordo com a norma ASTM C1006-10 (2018) (Figura 1). A resistência à tração do CCA (f_{tCCA}) foi calculada usando a Equação (1), que é uma função da carga máxima (P_{pe}), da espessura do bloco (T) e da altura do bloco (H). A resistência à compressão média do CCA foi de 0,46 MPa, e a carga máxima média correspondente foi de 21,94 kN.

$$f_{tCCA} = \frac{2P_{pe}}{\pi TH} \quad (1)$$

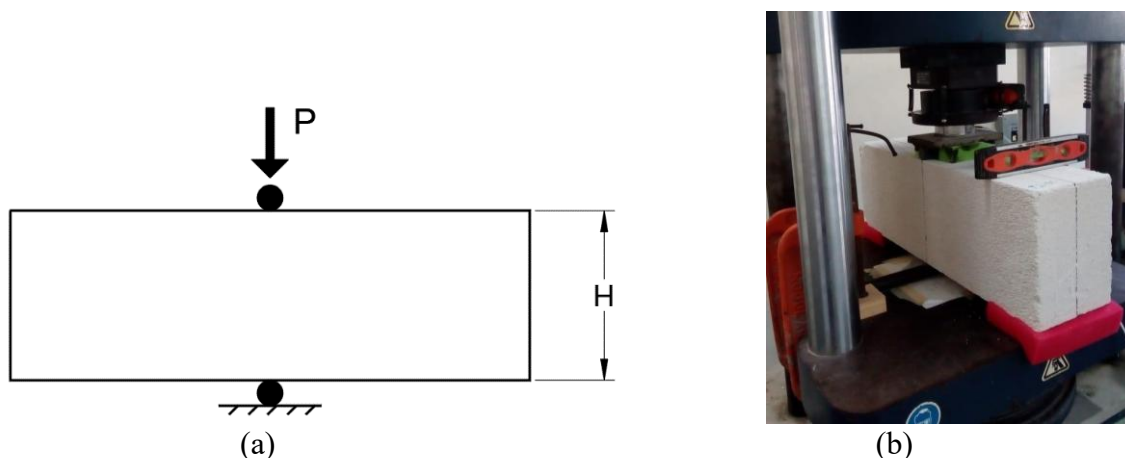


Figura 1. Ensaio para determinar a resistência à compressão do CCA. (a) Esquema de ensaio. (b) Vista do ensaio.

Uma mureta quadrada de 15 cm x 120 cm x 120 cm (espessura x altura x comprimento) foi testada para determinar a resistência à compressão diagonal da alvenaria de CCA, de acordo com a norma ASTM E519 (2022). A mureta foi construída com seis fiadas de altura e os blocos foram quadruplicados. Uma argamassa resistente de parede fina foi aplicada nas juntas verticais e horizontais, com uma espessura de aproximadamente 3 mm. Esta mureta falhou devido ao esmagamento do CCA no canto inferior (Figura 2a), localizado acima do suporte de aço. Posteriormente, muretas menores foram testadas para induzir fissuras relacionadas à tração e evitar falha por esmagamento. Cinco muretas de 15 cm x 60 cm x 60 cm (espessura x altura x comprimento) foram testadas, construídas em três fiadas de altura e com blocos quádruplos. Uma argamassa forte de paredes finas também foi colocada nas juntas verticais e horizontais. Todas as muretas foram testadas dentro de uma estrutura de aço, e as cargas foram aplicadas por um atuador hidráulico. Uma célula de carga e transdutores de pressão foram usados para registrar as cargas. As deformações nas diagonais foram medidas usando quatro potenciômetros lineares, dois em cada face. As dimensões das muretas são apresentadas na Tabela 1: comprimento (L), espessura (T) e diagonal (D), a área da diagonal (A_D), a média da carga máxima experimental (P_{me}), a média da resistência à compressão diagonal (v_m) e a média do módulo de cisalhamento (G_m). A resistência à compressão diagonal foi calculada utilizando a Equação (2). O módulo de cisalhamento foi calculado utilizando a Equação (3), de acordo com a norma NMX-C-464-ONNCCE (2010). A resistência à compressão diagonal da mureta de 120 cm de comprimento não é relatada porque a ruptura foi associada ao esmagamento do CCA e não pode ser comparada com a resistência à tração dos blocos.

$$v_m = \frac{P_{me}}{A_D} \quad (2)$$

$$G_m = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\gamma_2 - 0.00005} \quad (3)$$

Na Equação (3), τ_1 é o esforço de cisalhamento correspondente a 0,00005 da deformação angular, τ_2 é ao esforço de cisalhamento correspondente a 40% da carga máxima e γ_2 é a deformação angular produzida pela tensão τ_2 .

Tabela 1. Resultados de ensaios em muretas de alvenaria submetidas à compressão diagonal.

L(cm)	T(cm)	D (cm)	A_D (cm²)	P_{me}(kN)	v_m(MPa)	G_m(MPa)
120	15	169,7	2545,50	147,84	--	--
60	15	84,85	1272,75	112,84	0,89	698,63

A Figura 2b mostra um exemplo da fissuração final de uma mureta de 60 cm de comprimento. A Figura 3 mostra dois diagramas da fissuração final de muretas de 60 cm de comprimento. Essas figuras mostram dois tipos de fissuração. A primeira corresponde a fissuras verticais ao longo da diagonal. A segunda corresponde a fissuras inclinadas. Os ensaios mostraram que o mecanismo de falha final estava associado a fissuras inclinadas (Figura 2b). Em geral, a fissuração ocorreu nos blocos.

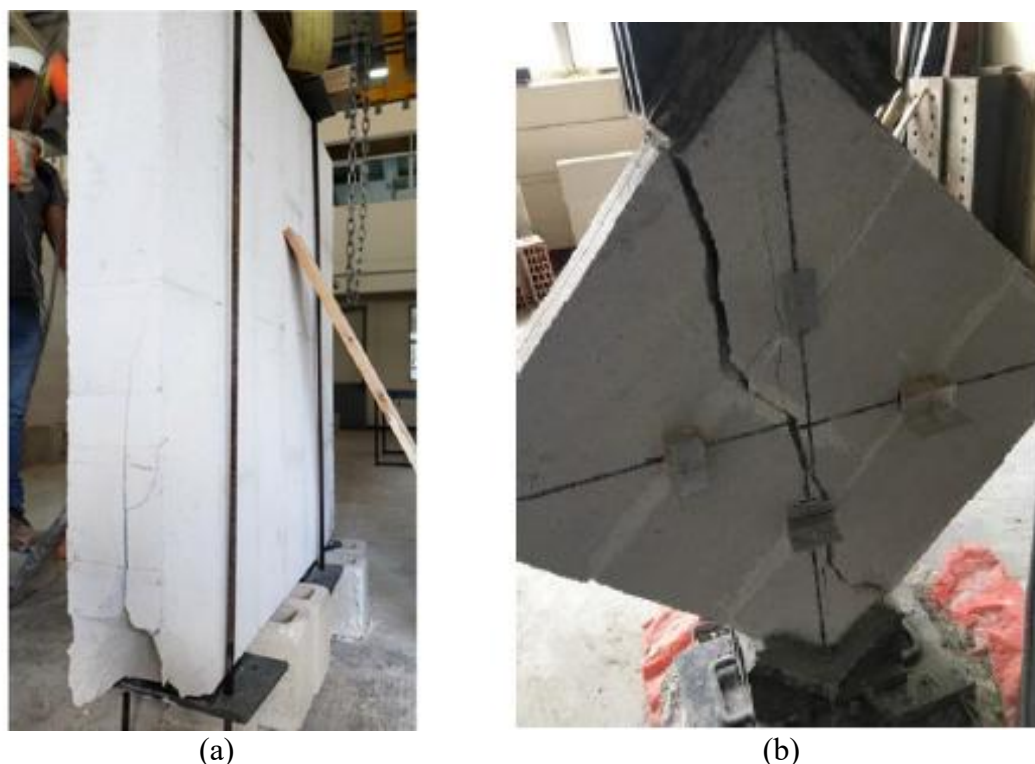


Figura 2. Ruptura de muretas de alvenaria de CCA. (a) muretas de 120 x 120 cm; (b) muretas de 60 x 60 cm.

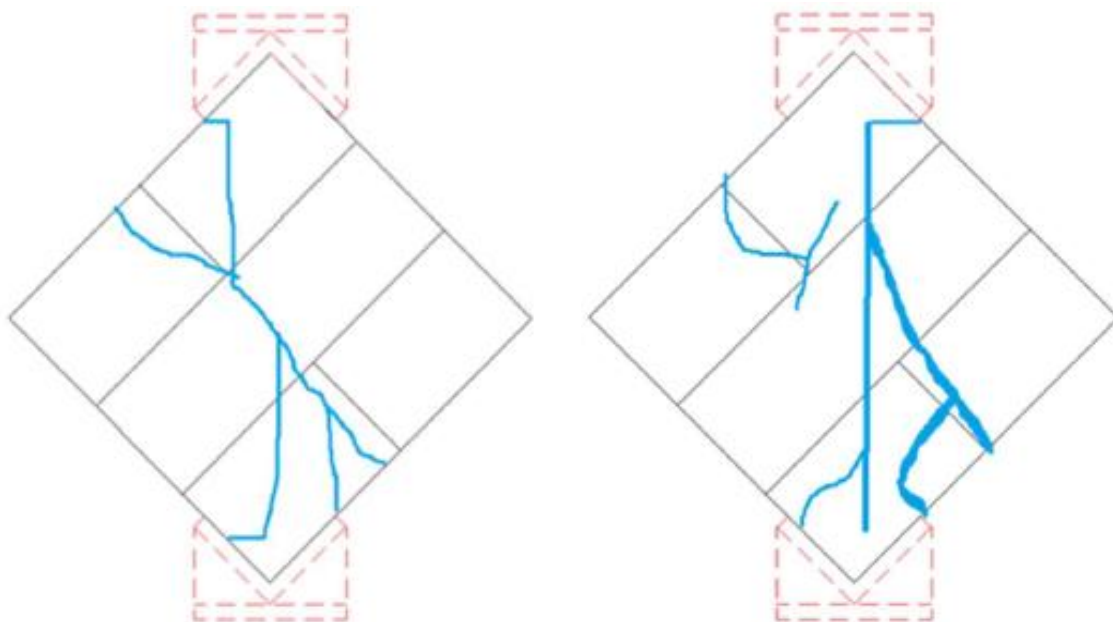


Figura 3. Exemplos de fissuração padronizada final em muretas de 60 cm x 60 cm.

3. METODOLOGIA

O processo de fissuração de blocos e alvenaria de CCA foi simulado usando modelos discretos de fissuração do MEF. O comportamento elástico linear foi assumido nos elementos de interface até a falha. Dois critérios de falha foram considerados: Rankine e Mohr. O critério de falha de Rankine (f) é definido pela Equação (4) e é uma função das trações normais (t_n) e da resistência à tração do material (f_t). O critério de falha de Mohr (f) é definido pela Equação (5) e é uma função das trações normais (t_n), das trações de cisalhamento (t_t), do ângulo de atrito interno (ϕ) e da coesão (c). De forma simplificada, o comportamento frágil foi considerado após atingir o critério de falha selecionado, uma vez que o CCA é um material poroso com baixa energia de fratura (Aroni et al., 1993) em relação ao concreto hidráulico normal (Wittmann e Gheorghita, 1984).

$$f = t_n - f_t = 0 \quad (4)$$

$$f = \sqrt{t_t^2} + t_n \tan \phi - c = 0 \quad (5)$$

Foi desenvolvido um modelo MEF não linear de um bloco CCA de 15 cm x 20 cm x 60 cm (espessura x altura x comprimento) submetido a tensões de compressão (ASTM C1006-84, 2001) (Figura 1). Foi utilizado o programa de computador DIANA (DIANA FEA BV, 2025). Foi determinada a resistência à tração computacional do CCA (f_{tCCA}), que permite prever a média da carga máxima experimental (P_{pe}) com o modelo. Foram utilizados elementos de tensão plana isoparamétricos quadrilaterais de quatro nós com dois graus de liberdade por nó. Foi utilizada uma malha estruturada com elementos finitos de 0,5 cm. O bloco CCA foi modelado considerando comportamento isotrópico com módulo de elasticidade de 2138 MPa e coeficiente de Poisson (ν_{CCA}) de 0,2. Os elementos de interface foram colocados em uma linha vertical no centro do bloco, onde ocorrem as tensões de tração máximas. Foram utilizados elementos de interface lineares com quatro nós e dois graus de liberdade por nó. Uma rigidez normal de 21.380 N/mm³ e uma rigidez

ao cisalhamento de 8.554,46 N/mm³ foram assumidas. Essas rigidezes foram calculadas considerando uma espessura de 1 mm do elemento de interface e as propriedades elásticas do CCA. Um critério de falha de Rankine com comportamento frágil foi considerado. Os graus de liberdade foram restritos ao centro do bloco na parte superior e inferior. Cargas controladas por deslocamento foram aplicadas no suporte superior do bloco. A malha de elementos finitos e as condições de suporte do modelo do bloco são apresentadas na Figura 4.

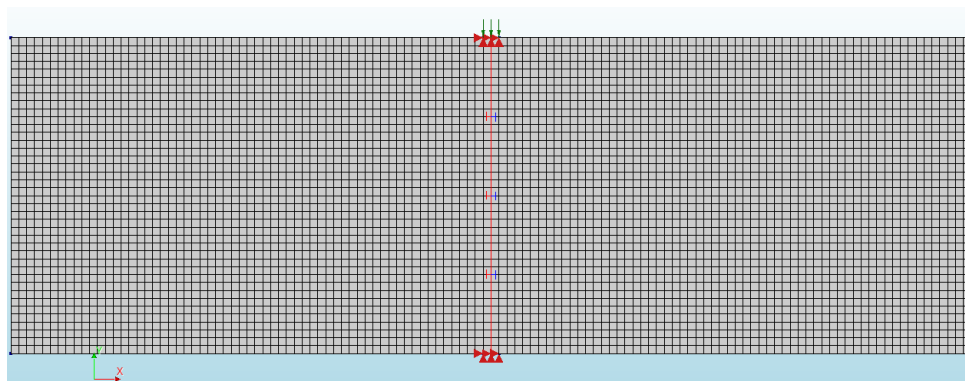


Figura 4. Malha de elementos finitos e condições de suporte do modelo de blocos.

Modelos MEF não lineares de muretas de CCA submetidas à compressão diagonal foram desenvolvidos considerando NMX-C-464-ONNCCE (2010) (Figura 2b). Muretas quadradas de diferentes comprimentos (60 cm, 80 cm, 100 cm e 120 cm) e 15 cm de espessura foram modeladas. O programa de computador DIANA (DIANA FEA BV, 2025) foi utilizado. A carga de fissuração computacional (P_{crc}) associada à resistência à tração computacional CCA (f_{tCCAc}) do bloco, obtida na etapa anterior, foi determinada. Elementos de tensão plana quadrilateral com as mesmas propriedades do modelo de bloco foram utilizados. Ou seja, um macromodelo da alvenaria CCA foi considerado, depreciando as juntas de argamassa de paredes finas, uma vez que foi observado que o módulo de elasticidade do CCA foi semelhante ao módulo de elasticidade da alvenaria CCA. As malhas foram geradas para serem estruturadas aproximadamente com elementos finitos de 2,5 cm. Os elementos de interface foram colocados em uma linha vertical ao longo da diagonal da mureta, onde ocorrem as tensões de tração máximas. As mesmas propriedades dos elementos de interface descritas no modelo de blocos foram consideradas. Os apoios de aço foram modelados considerando um módulo de elasticidade de 210.000 MPa e um coeficiente de Poisson de 0,3. As espessuras dos elementos finitos dos apoios de aço foram definidas com base nas características dos apoios usados nos ensaios experimentais descritos na norma ASTM E519 (2022). Os graus de liberdade foram restringidos na base do apoio de aço inferior. As cargas foram aplicadas com controle de deslocamento com um deslocamento linear vertical para o centro do apoio de aço superior. A malha de elementos finitos e as condições de apoio do modelo de mureta de 120 cm de comprimento são apresentadas na Figura 5a.

Um novo modelo MEF não linear de uma mureta de 60 cm de comprimento submetida à compressão diagonal foi desenvolvido com elementos de interface colocados em uma linha vertical ao longo da diagonal e em uma linha inclinada. Essas duas linhas de elementos de interface são propostas como uma aproximação simplificada dos dois tipos de fissuração observados nos testes experimentais (Figura 3). A coesão foi determinada para o critério de falha de Mohr, usado nos elementos de interface da linha inclinada, o que permite que a média da carga máxima experimental (P_{me}) seja prevista com o modelo computacional. O comportamento frágil foi considerado após atingir a superfície de falha. O ângulo de atrito interno foi assumido como $\phi = 17^\circ$ (Milanesi et

al., 2015). Todas as outras características do modelo são as mesmas dos modelos de muretas anteriores. A malha de elementos finitos e as condições de suporte do modelo da mureta de 60 cm de comprimento são apresentadas na Figura 5b.

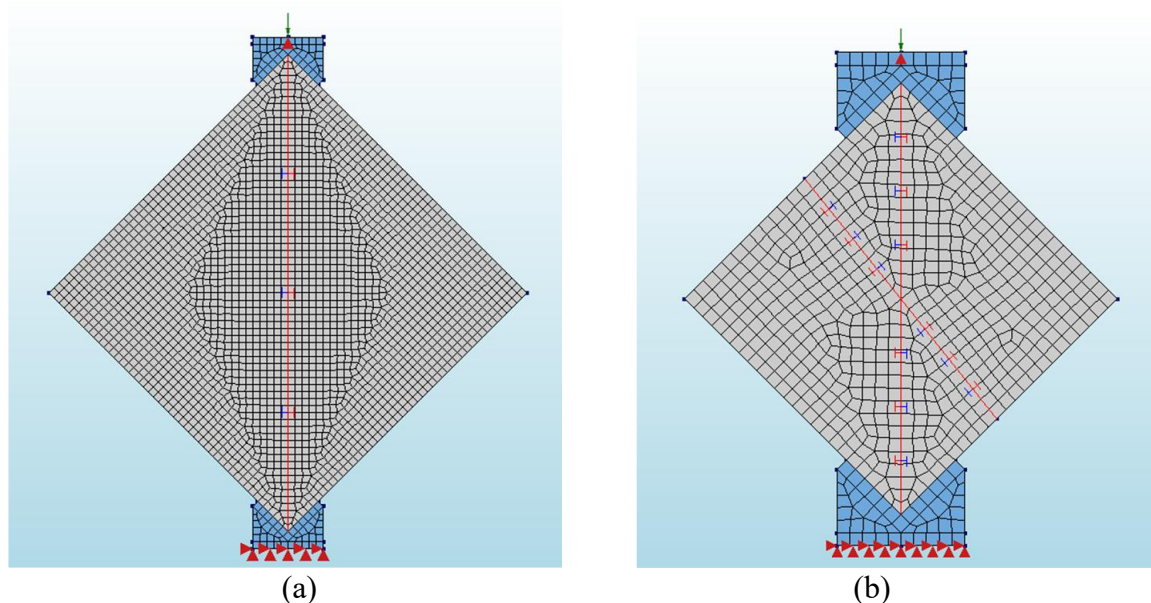


Figura 5. Malha de elementos finitos e condições de apoio para muretas. (a) Mureta de 120 cm x 120 cm; (b) Mureta de 60 cm x 60 cm.

4. RESULTADOS

4.1 Bloco de CCA

Uma resistência à tração CCA computacional (f_{tCCA}) de 0,45 MPa foi determinada para prever a carga experimental máxima média de 21,9 kN. A Figura 6a mostra a distribuição das tensões principais no centro do bloco antes da fissuração. As tensões compressivas principais são observadas como sendo verticais na direção. As tensões de tração principais ocorrem perpendicularmente a essas tensões, na direção horizontal. As tensões de tração principais não são distinguidas na Figura 6a porque a magnitude dos principais esforços de compressão é significativamente maior. A direção dos principais esforços de compressão corresponde à orientação da fissura. A Figura 6b mostra a distribuição das trações normais antes da fissuração, que foram obtidas dos elementos de interface. A Figura 7 mostra o mecanismo de falha final do modelo, que foi produzido pela fissuração por fratura modo I.

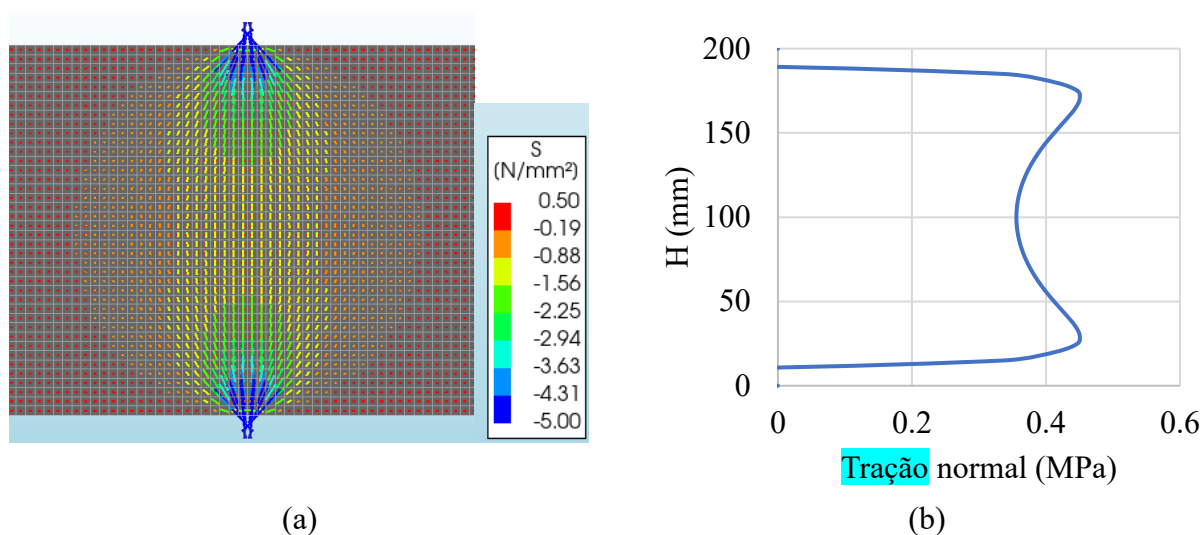


Figura 6. Distribuição de tensões no bloco antes da fissuração. (a) Tensões principais; (b) Tensões normais nos elementos de interface.

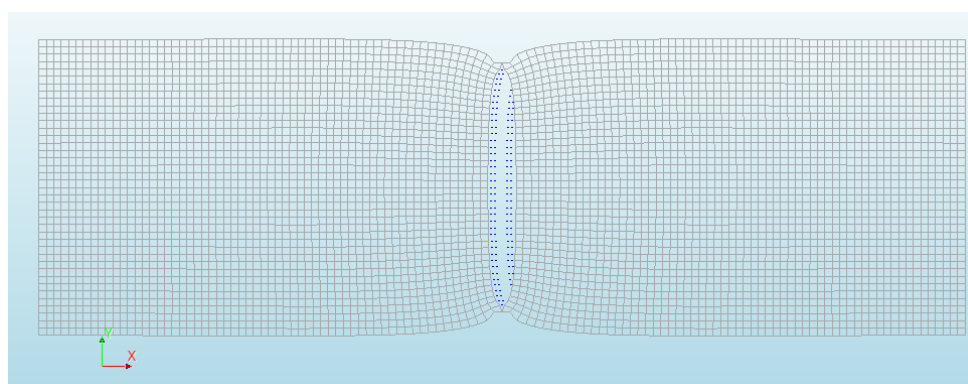


Figura 7. Mecanismo de falha do modelo de bloco.

4.2 Avenária CCA

A Tabela 2 apresenta o comprimento da mureta (L), a diagonal da mureta (D), a porcentagem da diagonal que fissa (D_{PA}), a carga de fissuração computacional (P_{crc}), a resistência à compressão diagonal computacional associada à carga de fissuração computacional (v_{mc}), e a razão v_{mc}/f_{tCCAc} . A carga de fissuração computacional foi determinada usando a resistência à tração CCA computacional ($f_{tCCAc} = 0,45$ MPa) e o modelo de muretas com elementos de interface na diagonal (Figura 5a). Neste modelo, apenas a fissuração ao longo da linha vertical foi considerada; ou seja, outros critérios de falha não foram incluídos de forma simplificada. A Figura 8a apresenta a distribuição das tensões principais da mureta de 120 cm x 120 cm antes da fissuração. Observa-se que as tensões principais de compressão estão na direção vertical. As tensões principais de tração são perpendiculares às tensões principais de compressão. As tensões principais de tração não são distinguidas na Figura 8a porque a magnitude das tensões principais de compressão é significativamente maior. A direção principal dos esforços de compressão corresponde à orientação da fissura. Muretas de outras dimensões apresentam distribuições de tensões semelhantes. A Figura 8b mostra a distribuição das tensões normais de tração ao longo da diagonal vertical antes da fissuração para os diferentes tamanhos de muretas. As tensões normais foram obtidas dos elementos de interface. Nesta figura, a posição (y) em relação à diagonal (D) foi normalizada. A Figura 9 mostra o mecanismo de falha final do modelo de mureta de 120 cm x 120 cm, correspondente a uma fratura de Modo I.

Tabela 2. Resultados associados à carga de fissuração computacional das muretas.

$L(\text{cm})$	$D(\text{cm})$	$D_{PA}(\%)$	$P_{crc} \text{ (kN)}$	$v_{mc}(\text{MPa})$	v_{mc}/f_{tCCAc}
120	169,70	85	171,28	0,67	1,46
100	141,42	79	142,81	0,67	1,46
80	113,13	69	119,52	0,70	1,53
60	84,85	53	99,72	0,78	1,70

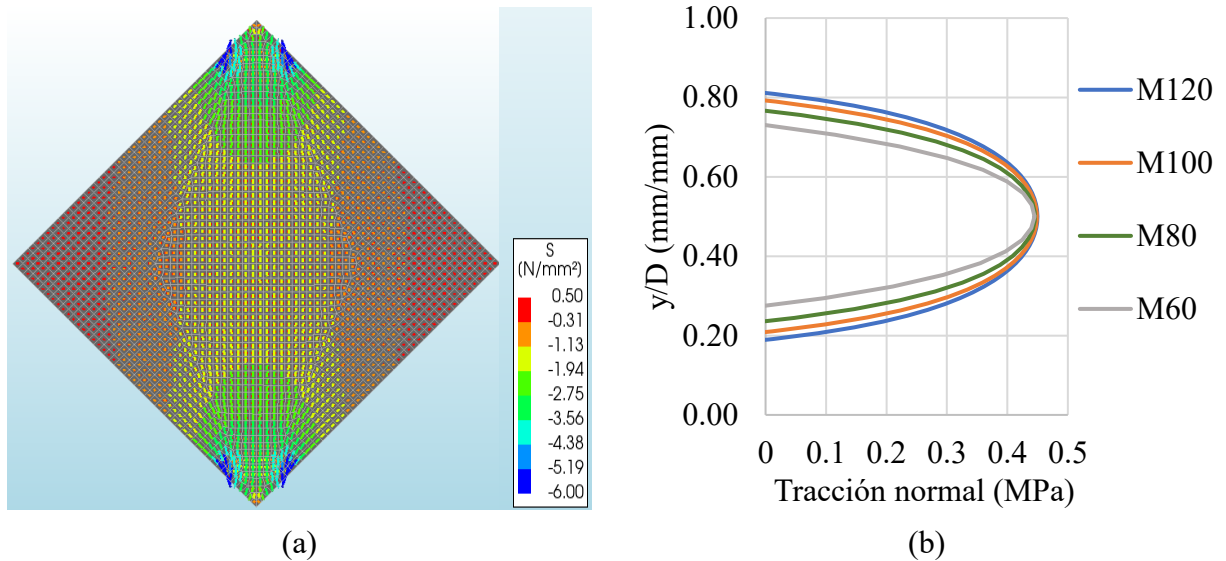


Figura 8. Distribuição de esforços nas muretas antes da fissuração. (a) Esforços principais; (b) Esforços normais nos elementos de interface.

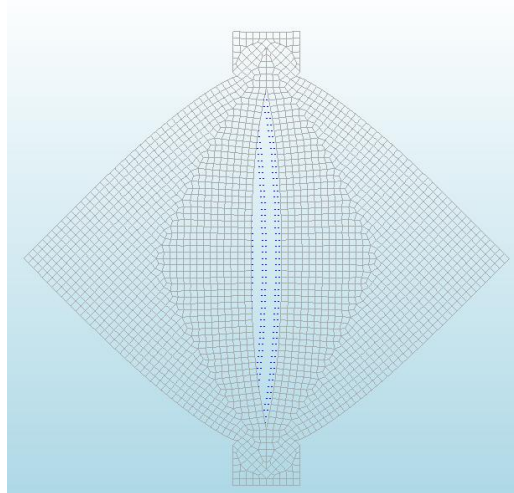


Figura 9. Mecanismo de falha do modelo de mureta de 120 cm x 120 cm.

Uma coesão de 1,06 MPa foi determinada para o critério de falha de Mohr para prever a carga experimental máxima média para as muretas de 60 cm x 60 cm. Este critério de falha é usado para os elementos de interface da linha inclinada da mureta (Figura 5b). As curvas de tensão de cisalhamento-deformação angular experimentais (M1 a M5) e computacionais (Mc) para as muretas de 60 cm x 60 cm são apresentadas na Figura 10. O modelo computacional exibe inicialmente comportamento elástico linear até a formação de uma fissura vertical na diagonal associada a uma tensão de cisalhamento de 0,78 MPa, correspondendo a 88% da resistência à

compressão diagonal experimental. A formação da fissura produz um aumento significativo nas deformações angulares; o modelo superestima a abertura da fissura vertical e suas deformações associadas. Posteriormente, o modelo continuou suportando cargas até que a fissura inclinada ocorresse a uma tensão de cisalhamento de 0,90 MPa, que é semelhante à resistência à compressão diagonal experimental. O mecanismo de falha final foi associado à formação da fissura inclinada, que apresentou fratura de Modo II. O módulo de cisalhamento computacional da alvenaria (G_{mc}), calculado com a Equação (3), foi de 640,90 MPa. G_{mc} foi calculado considerando os deslocamentos lineares nos nós próximos aos pontos de medição de deformação do ensaio experimental.

A Figura 11a mostra a distribuição das tensões principais na mureta de 60 cm x 60 cm após a formação da fissura vertical na diagonal e antes da formação da fissura inclinada. Observa-se que as tensões principais de compressão são verticais na direção, de modo que os elementos de interface na linha inclinada apresentam tração compressiva e cisalhante. A Figura 11b mostra o mecanismo de falha final do modelo, que corresponde a um modo de fratura I na fissura vertical na diagonal e um modo de fratura II na fissura inclinada.

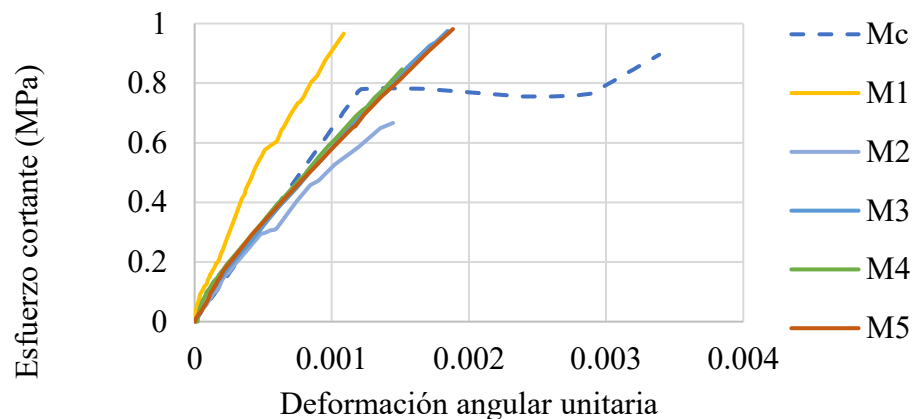


Figura 10. Curva de tensão de cisalhamento - deformação angular unitária de muretas de 60 cm x 60 cm.

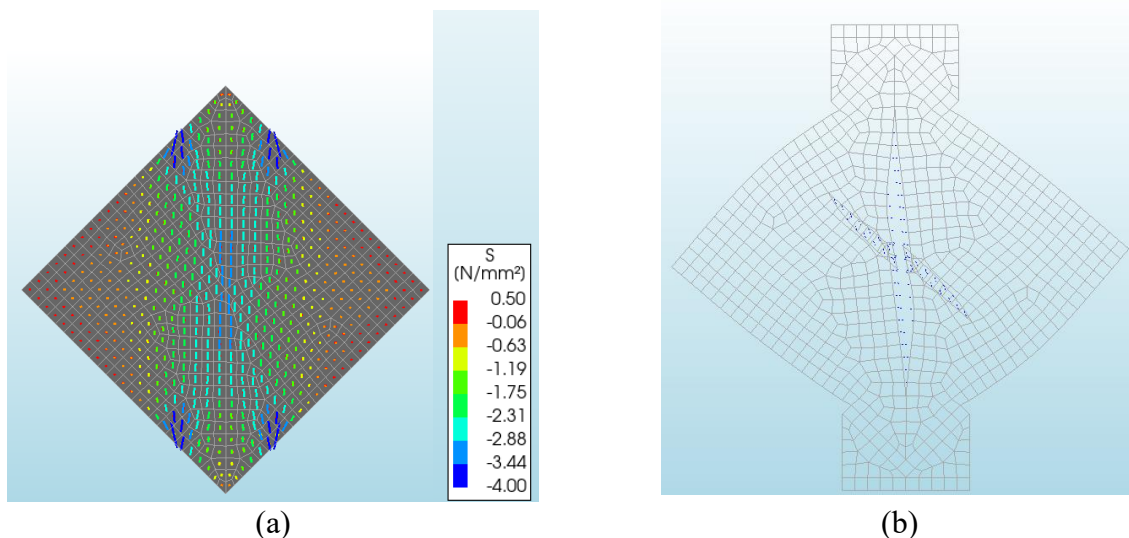


Figura 11. Distribuição das tensões principais e mecanismo de falha final da mureta de 60 cm x 60 cm. (a) Tensões principais; (b) Mecanismo de falha.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A resistência à tração computacional do CCA ($f_{tCCA} = 0,45$ MPa) foi semelhante à resistência à tração do CCA obtida experimentalmente, calculada usando a Equação (1) ($f_{tCCA} = 0,46$ MPa). Isso ocorre porque a Equação (1) é uma boa aproximação das tensões máximas de tração no bloco. Usando o modelo de trinca discreta MEF, considerando uma linha de elementos de interface verticais com um critério de falha Rankine, a carga de fissuração e o mecanismo de falha dos blocos CCA sob tensão compressiva são bem simulados em comparação com aqueles observados experimentalmente. O mecanismo de falha do bloco foi associado a uma fissura de fratura de modo I.

O ensaio de compressão diagonal de uma mureta induz tensões de tração na diagonal. Essas tensões podem formar uma fissura vertical associada a uma fratura de Modo I. Além disso, suportes metálicos geram tensões de compressão nas extremidades da diagonal. O aumento do tamanho da mureta aumenta a porcentagem do comprimento da diagonal que está em tração (Figura 8b) e o comprimento da diagonal sobre o qual a fissura pode se estender. Além disso, a razão v_{mc}/f_{tCCA} tende a 1,46 (Tabela 2). No ensaio experimental da mureta de 120 cm x 120 cm, foi observada uma ruptura por esmagamento do CCA no apoio a uma carga de 147,84 kN (Tabela 1). Com os modelos discretos de fissuras do MEF, obteve-se que a carga necessária para produzir a fissuração diagonal da mureta é de 171,28 kN (Tabela 2), que é maior que a carga experimental máxima. Conclui-se que não é possível determinar a resistência à compressão diagonal da alvenaria de CCA usando muretas de 120 cm x 120 cm conforme especificado pela norma ASTM E519 (2022), se forem construídas com blocos com resistência à compressão de 5,28 MPa e argamassa forte de paredes finas. Para aplicar esta conclusão a muretas feitos com blocos de outras classes, deve-se levar em consideração que a resistência à tração do CCA é função da raiz quadrada de sua resistência à compressão (TMS 402/602, 2022). Por exemplo, a mudança da Classe 4 para a Classe 2 reduz a resistência à compressão em 50% e a resistência à tração em 71%. Portanto, em muretas feitas com blocos de CCA com resistência à compressão semelhante ou inferior à considerada neste estudo (ou seja, Classes 2 a 5), também ocorrerão falhas por esmagamento do CCA.

À medida que o tamanho da mureta diminui, a porcentagem do comprimento diagonal em tração diminui (Figura 8b) e o comprimento diagonal sobre o qual a fissura pode se estender diminui; além disso, a proporção v_{mc}/f_{tCCA} varia (Tabela 2). Se a mureta for pequena (por exemplo, 60 cm x 60 cm), a fissura vertical se formará, mas não cruzará a mureta inteira. Nesse caso, a mureta será capaz de suportar carga adicional. Isso é semelhante ao que é observado em uma parede de alvenaria confinada, que é capaz de suportar carga adicional após a formação da fissura diagonal (Riahi et al., 2009). Se as fissuras diagonais no painel de alvenaria cruzarem os elementos confinantes, a parede confinada falhará (Varela-Rivera et al., 2018). Em uma mureta de 60 cm x 60 cm, um mecanismo de falha final associado a fissuras inclinadas que cruzam a mureta se desenvolverá. Utilizando o modelo de fissura discreta por MEF, considerando duas linhas de elementos de interface: uma linha vertical ao longo da diagonal com critério de ruptura de Rankine e uma linha inclinada com critério de ruptura de Mohr, a carga de fissuração e o mecanismo de ruptura de barragens de alvenaria de concreto armado de 60 cm x 60 cm são bem simulados em comparação com observações experimentais. O mecanismo de ruptura da barragem, que apresentou uma fissura vertical inicial no modo de fratura I, foi associado à fissura inclinada no modo de fratura II.

Recomenda-se que as equações de projeto para determinar a resistência ao cisalhamento de paredes de alvenaria confinadas com argamassa de paredes finas resistentes sejam baseadas na resistência à tração à compressão dos blocos de CCA. Isso ocorre porque a fissuração diagonal nesses tipos de paredes está associada a uma fissura de fratura de modo I que se propaga pelos blocos e é consistente com o mecanismo de falha obtido a partir de testes de blocos submetidos a tensões de

compressão. As equações desenvolvidas por Varela-Rivera et al. (2018, 2023, 2025) atendem a essa recomendação. Além disso, não é recomendado usar a resistência à compressão diagonal de muretas associada à fissuração de fratura de modo II. Além disso, testar blocos submetidos a tensões de compressão é mais econômico e fácil de executar do que testar uma única mureta. Essas recomendações modificam o paradigma de cálculo da resistência ao cisalhamento de paredes confinadas com base na resistência à compressão diagonal da alvenaria.

O módulo de cisalhamento do CCA (G_{CCA}) foi de 0,890 GPa, dado que $E_{CCA} = 2,138$ GPa e $\nu_{CCA} = 0,2$. G_{CCA} é calculado usando a Equação (6) (Oliver e Aleget de Saracíbar, 2002). Este valor do módulo de cisalhamento foi usado nos modelos MEF.

$$G_{CCA} = \frac{E_{CCA}}{2(1 + \nu_{CCA})} \quad (6)$$

O módulo de cisalhamento computacional da alvenaria de CCA obtido a partir do modelo de mureta de 60 cm x 60 cm ($G_{mc} = 640,9$ MPa) foi semelhante à média experimental para muretas do mesmo tamanho ($G_m = 698,6$ MPa). Ambos os valores foram calculados usando a Equação (3). Portanto, conclui-se que (a) o modelo aproxima bem o comportamento elástico das muretas; (b) as propriedades dos blocos de CCA podem ser usadas para modelar a alvenaria de CCA. Ou seja, a presença da junta de argamassa de parede fina na alvenaria de CCA pode ser desprezada; (c) o comportamento da alvenaria de CCA pode ser aproximado como um material isotrópico. Por outro lado, o fato de o módulo de cisalhamento utilizado nos modelos FEM ser diferente daquele medido nas muretas (experimental e computacional) mostra que o ensaio de compressão diagonal não é um ensaio de cisalhamento puro e que a Equação (3) é uma aproximação do módulo de cisalhamento da alvenaria. Em contrapartida, em ensaios de muretas de alvenaria tradicionais constituídas por peças de concreto e argila submetidas à compressão diagonal, observou-se que o módulo de cisalhamento é aproximadamente igual a 20% do módulo de elasticidade da alvenaria ($0,2E_m$) (GCM, 2023), sendo o valor teórico igual a 40% do referido módulo ($G_m = 0,4E_m$) ao considerar um coeficiente de Poisson de 0,25. Isso tem sido associado ao comportamento anisotrópico dessas alvenarias.

6. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, o processo de fissuração em blocos e muretas de alvenaria de concreto CCA foi estudado utilizando modelos discretos de fissuração, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Os resultados dos modelos computacionais forneceram subsídios para os resultados dos ensaios experimentais correspondentes. Com base nos resultados desta pesquisa, as seguintes conclusões são tiradas:

1. A carga de fissuração e o mecanismo de falha de blocos de CCA submetidos a esforços de compressão são bem simulados em comparação com observações experimentais utilizando o modelo de fissura discreta por elementos finitos (MEF). Este modelo considerou uma linha de elementos de interface verticais com um critério de falha de Rankine. O mecanismo de falha do bloco foi associado a uma fissura de fratura de Modo I
2. Utilizando os modelos de fissuras discretas por elementos finitos (MEF), constatou-se que a carga necessária para produzir fissuras diagonais nas muretas de 120 cm x 120 cm foi maior do que a carga experimental máxima que causou o esmagamento da alvenaria de concreto armado (CCA). Portanto, não é possível determinar a resistência à compressão diagonal da alvenaria de CCA utilizando muretas de 120 cm x 120 cm, conforme

especificado na norma ASTM E519 (2022). Esta conclusão é válida para muretas feitas com blocos de CCA correspondentes às Classes 2 a 5 e argamassa resistente de paredes finas.

3. A carga de fissuração e o mecanismo de ruptura de muretas de alvenaria de CCA de 60 cm x 60 cm são bem simulados em comparação com observações experimentais utilizando o modelo de fissura discreta por elementos finitos (MEF). Duas linhas de elementos de interface foram consideradas neste modelo: uma linha vertical ao longo da diagonal com um critério de ruptura de Rankine e uma linha inclinada com um critério de ruptura de Mohr. O mecanismo de ruptura da mureta, que apresentou uma fissura vertical inicial na fratura de modo I, foi associado à fissura inclinada na fratura de modo II.
4. Recomenda-se que as equações de projeto para determinar a resistência ao cisalhamento de paredes de alvenaria confinada de concreto CCA com argamassa de paredes finas e resistentes sejam uma função da resistência a esforços de compressão do bloco de CCA. Isso ocorre porque a fissuração diagonal nesses tipos de paredes está associada a uma fissura de fratura de modo I que se propaga pelos blocos e é consistente com o mecanismo de falha observado nos ensaios de blocos submetidos esforços de compressão. Esta recomendação modifica o paradigma de cálculo da resistência ao cisalhamento de paredes confinadas com base na resistência à compressão diagonal da alvenaria.

7. AGRADECIMENTOS

O segundo autor agradece ao Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) pela bolsa de estudos concedida a ele para seu doutorado em Engenharia Estrutural na Faculdade de Engenharia da Universidad Autónoma de Yucatán. Os autores agradecem o trabalho realizado pela ex-aluna de pós-graduação Daisy Shamel Pérez Buenfil.

8. REFERÊNCIAS

- Ahmed, A., Shahzada K., Muhammad, A.S., Naeem, K.A., Ali, S.A. (2019), *Confined and unreinforced masonry structures in seismic areas: Validation of macro models and cost analysis*. Engineering Structures. 199, 109612. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109612>
- Anderson, T. L. (2017), “*Fracture mechanics: fundamentals and applications (4th ed.)*”. CRC Press, Florida, USA, p. 684.
- Aroni, S., de Groot, G. J., Robinson, M. J., Svanholm, G., Wittman, F. H. (1993), “*Autoclaved Aerated Concrete - Properties, Testing and Design*”. RILEM Technical Committees 78-MCA and 51-ALC. Taylor & Francis, UK, p. 424. <https://doi.org/10.1201/9781482271195>
- ASTM International. (2001), *ASTM C1006-84 Standard Specification for Splitting Tensile Strength of Masonry Units*. <https://www.astm.org/c1006-84r01.html>
- ASTM International. (2017), *ASTM C1693-11 Standard Specification for Autoclaved Aerated Concrete (AAC)*. <https://www.astm.org/c1693-11.html>
- ASTM International. (2018), *ASTM C1660-10 Standard Specification for Thin-bed Mortar for Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Masonry*. <https://www.astm.org/c1660-10.html>
- ASTM International. (2022), *ASTM E519/E519M-22 Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages*. https://www.astm.org/e0519_e0519m-22.html
- Borah, B., Kaushik, H. B., Singhal, V. (2023), *Analysis and Design of Confined Masonry Structures: Review and Future Research Directions*. Buildings. 13(5):1282. <https://doi.org/10.3390/buildings13051282>

- Costa, A. A., Penna, A., Magenes, G. (2011), *Seismic performance of autoclaved aerated concrete (AAC) masonry: from experimental testing of the in-plane capacity of walls to building response simulation*. Journal of Earthquake Engineering. 15(1): 1-31.
<https://doi.org/10.1080/13632461003642413>
- D'altri, A. M., Sarhosis, V., Milani, G., Rots, J., Cattari, S., Lagomarsino, S., Sacco, E., Talli, A., Castellazzi, G., De Miranda, S. (2020), *Modeling strategies for the computational analysis of unreinforced masonry structures: review and classification*. Archives of Computational Methods in Engineering. 27(4): 1153-1185. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09351-x>
- DIANA FEA BV (2025), “User’s Manual DIANA 10.10”. Netherlands.
<https://dianafea.com/diana-manuals/>
- Fernández, L. E., Ayala, G. (2004), *Constitutive modeling of discontinuities by means of discrete and continuum approximations and damage models*. International Journal of Solids and Structures. 41(5-6): 1453-1471. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2003.10.010>
- Fernández-Baqueiro, L. E., Chim-May, R. U., Varela-Rivera, J. L., Moreno-Herrera, J. A., Parra-Cardena, R. G. (2021), “Comportamiento a cortante de muros confinados de concreto celular de autoclave” en: Memorias del XXII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Aguascalientes, México, p. 14.
- Fernández-Baqueiro, L. E., Moreno-Herrera, J. A., Varela-Rivera, J. L., Pérez-Buenfil, D. S., Cruz-Escareño, E. E. (2022), “Propiedades mecánicas del concreto celular de autoclave” en: Memorias del XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Zacatecas, México, p. 10.
- Ferretti, D., Michelini, E., Rosati, G. (2015), *Mechanical characterization of autoclaved aerated concrete masonry subjected to in-plane loading: Experimental investigation and FE modeling*. Construction and Building Materials. 98:353-365.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.121>
- GCM – Gobierno de la Ciudad de México. (2023). *NTCM: Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería*. Ciudad de México, México.
- Hamid, A. (2018), “Masonry structures: behavior and design (4th ed.)”. The Masonry Society, Colorado, USA, p. 723.
- Jasiński, R., Drobiec, L. (2016), *Comparison research of bed joints construction and bed joints reinforcement on shear parameters of AAC masonry walls*. Journal of Civil Engineering and Architecture.10(12):1329-1343.
<https://www.davidpublisher.com/index.php/Home/Article/index?id=29682.html>
- Jasiński R., Gąsiorowski, T. (2023), *Comparative Studies of the Confined Effect of Shear Masonry Walls Made of Autoclaved Aerated Concrete Masonry Units*. Materials. 16 (17): 5885.
<https://doi.org/10.3390/ma16175885>
- Lourenço P. B., Rots J. G., Blaauwendraad, J. (1998), *Continuum Model for Masonry: Parameter Estimation and Validation*. Journal of Structural Engineering. ASCE.124(6):642–652.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1998\)124:6\(642\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:6(642))
- Marques, R., Lourenço, P. (2019), *Structural behaviour and design rules of confined masonry walls: Review and proposals*. Construction and Building Materials. 127:137-155.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.266>
- Małyszko L., Kowalska E., Bilko P. (2017), *Splitting tensile behavior of autoclaved aerated concrete: Comparison of different specimens’ results*. Construction and Building Materials. 157:1190–1198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.167>
- Milanesi R., Morandi P., Magenes G., Binici B. (2015), “FEM simulation of the experimental response of AAC masonry infills in RC frames” en: 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Isla de Creta, Grecia.
<https://www.eccomasproceedia.org/conferences/thematic-conferences/compdyn-2015/3711>

- Olivella, X. O., Aleget de Saracíbar, C. (2002), *“Mecánica de medios continuos para ingenieros”*. Ediciones UPC, Barcelona, España.
- ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación. (2010). *NMX-C-464-ONNCCE Industria de la Construcción - Mampostería - Determinación de la Resistencia a Compresión Diagonal y Módulo de Cortante de Muretes, así como Determinación de la Resistencia a Compresión y Módulo de Elasticidad de Pilas de Mampostería de Arcilla o de Concreto - Métodos de Ensayo*. Ciudad de México, México.
- Parker, C. K., Tanner, J. E., Varela, J. L. (2007), *Evaluation of ASTM Methods to Determine Splitting Tensile Strength in Concrete, Masonry, and Autoclaved Aerated Concrete*. Journal of ASTM International. 4(2):62-73. <https://www.researchgate.net/publication/333701275>
- Pérez, D. S. (2019). *Análisis de las propiedades mecánicas del concreto celular de autoclave*. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
- Riahi, Z., Elwood, K. J., Alcocer, S. M. (2009), *Backbone model for confined masonry walls for performance-based seismic design*. Journal of structural engineering. 135(6): 644-654. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000012](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000012)
- SENCICO - Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. (2018). *Norma Técnica E.070 Albañilería*. Lima, Perú.
- Shi, Z., Nakano, M., Nakamura, Y., Liu, C. (2014), *Discrete crack analysis of concrete gravity dams based on the known inertia force field of linear response analysis*. Engineering Fracture Mechanics. 115:122 -136. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.10.020>
- TMS - The Masonry Society. (2022). *TMS 402/602: Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures (Formerly ACI 530)*. Colorado, USA.
- van Boggelen, W. (2018), *History of Autoclaved Aerated Concrete. The short story of a long lasting building material*. AAC worldwide. <https://www.aircrete.com/aircrete-news/history-of-autoclaved-aerated-concrete-2/>
- Varela-Rivera, J., Fernandez-Baqueiro, L., Alcocer-Canche, R., Ricalde-Jimenez, J., Chim- May, R. (2018), *Shear and flexural behavior of autoclaved aerated concrete confined masonry walls*. ACI Structural Journal. 115(5):1453-1462. <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&id=51706828>
- Varela-Rivera, J. L., Fernández-Baqueiro, L. E., Moreno-Herrera, J. A. (2023), *Shear and flexural behavior of autoclaved aerated concrete confined masonry walls*. ACI Structural Journal. 120(3):207-215. <https://doi.org/10.14359/51738511>
- Varela-Rivera, J. L., Cacep-Rodríguez, J., Fernández-Baqueiro, L. E., Moreno-Herrera, J. A. (2024), *Comportamiento a cortante de muros de mampostería confinada de concreto celular de autoclave con diferentes escalas*. Revista ALCONPAT. 14(2):157-173. <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.725>
- Varela-Rivera, J. L., Cacep-Rodríguez, J., Fernández-Baqueiro, L. E., Moreno-Herrera, J. A. (2025), *Shear Strength of Coupled Autoclaved Aerated Concrete Confined Masonry Walls*. Journal of Structural Engineering. ASCE. 151(3):04024222. <https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-13764>
- Wittmann, F. H., Gheorghita, I. (1984), *Fracture toughness of autoclaved aerated concrete*. Cement and Concrete Research. 14(3): 369-374. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(84\)90055-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(84)90055-3)