

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**DIOGO BORIN BECKER**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE PAREDES COM CORTES UTILIZANDO O MÉTODO DOS  
ELEMENTOS DISCRETOS FORMADO POR BARRAS**

**Alegrete, RS**

**2025**

**DIOGO BORIN BECKER**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE PAREDES COM CORTES UTILIZANDO O MÉTODO  
DOS ELEMENTOS DISCRETOS FORMADO POR BARRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Luis Eduardo Kostas

**Alegrete, RS**

**2025**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

B395s Becker, Diogo Borin

Simulação numérica de paredes com cortes utilizando o  
método dos elementos discretos formado por barras / Diogo  
Borin Becker.

67 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA CIVIL, 2025.

"Orientação: Luis Eduardo Kostaski".

1. Alvenaria estrutural. 2. Cortes em paredes. 3. Escala  
natural. 4. Modelo numérico. 5. LDEM. I. Título.

**DIOGO BORIN BECKER**

**SIMULAÇÃO DE PAREDES COM CORTES UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS FORMADO POR BARRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 07 de julho de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. LUIS EDUARDO KOSTESKI - UNIPAMPA - Orientador

Prof. Dr. ALISSON SIMONETTI MILANI - UNIPAMPA

Profa. Dra. ANGÉLICA BORDIN COLPO - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO KOSTESKI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/07/2025, às 08:04, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALISSON SIMONETTI MILANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/07/2025, às 08:31, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ANGELICA BORDIN COLPO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/07/2025, às 08:34, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1777834** e o código CRC **7EA8F36C**.

---

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo de incrível que me proporcionou nesta caminhada. Todos os momentos, bons e nem tão bons, foram extremamente necessários para que eu chegasse até aqui.

Um agradecimento especial aos meus pais e à minha avó, Valnez, Renato e Margarida, pelo apoio incondicional ao longo desta jornada. Tudo isso é por vocês, para vocês, por tudo o que fizeram e continuam fazendo por mim.

Ao amor da minha vida, Maria Eduarda, meu muito obrigado por sempre me apoiar e me incentivar a ser a minha melhor versão. Sem você, eu não teria conseguido.

Aos amigos de São Pedro do Sul, Santa Maria, Alegrete, Pelotas e Santa Vitória do Palmar, minha gratidão. Cada churrasco, cada jogo de futebol, cada cerveja, cada conversa, cada viagem e cada risada serviram — e sempre servirão — como motivação para seguir em frente.

Ao professor Luís Eduardo Kosteski, meu sincero agradecimento. Sem o senhor, nada disso teria se tornado realidade. Obrigado pelo apoio, atenção, companheirismo e amizade de sempre. O senhor conquistou um admirador, não apenas como profissional, mas como ser humano, para o resto da vida.

Por fim, mas não menos importante, agradeço à UNIPAMPA e a todos que me auxiliaram ao longo desses anos, em especial ao grupo de Modelagem e Análise Experimental de Compósitos (MAEC).

Gratidão.

“Nenhum homem terá chance para desfrutar um triunfo permanente se não começar por olhar-se num espelho para descobrir a causa real de todos os seus erros”.

Napoleon Hill

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo representar numericamente ensaios experimentais em paredes de escala reduzida (1:5) e escala natural (1:1) com cortes horizontais e inclinados através do Método dos Elementos Discretos formados por barras (LDEM) implementado através do ambiente Abaqus/Explicit. No trabalho se analisa se a orientação dos cortes e suas respectivas profundidades influenciam de forma significativa o comportamento mecânico, a propagação de fissuras e o modo de ruptura das paredes. Todas as paredes analisadas foram submetidas a carregamentos centrados e reduções de 20%, 30% e 50% de suas espessuras. Com o intuito de obter a melhor representação possível através de um modelo numérico, foram utilizadas duas condições de contorno, sendo uma delas rotulada – engastada e a outra rotulada – rotulada. Os parâmetros utilizados para avaliar a eficiência do modelo numérico foram as resistências máximas, os deslocamentos no plano e fora do plano, e, por fim, o modo de falha. Como esperado, com um aumento das profundidades dos cortes as paredes apresentam resistências menores ao carregamento de compressão. Os modos de falha entre escala reduzida e natural de cada modelo se assemelham satisfatoriamente.

Palavras-chave: Alvenaria estrutural, cortes em paredes, escala natural, modelo numérico, LDEM.

## **Abstract**

This study aims to numerically simulate experimental tests conducted on small-scale (1:5) walls and full-scale (1:1) walls, featuring horizontal and inclined chases, using the Discrete Mesh Element Method (LDEM) implemented in the Abaqus/Explicit environment. The objective is to assess whether the orientation and depth of the chases significantly influence the mechanical behavior, crack propagation, and failure modes of the walls. All specimens were subjected to centered axial loading and reductions of 20%, 30%, and 50% of their original thickness. To ensure an accurate numerical representation, two boundary conditions were adopted: pinned–fixed and pinned–pinned. The effectiveness of the numerical model was evaluated based on peak compressive strength, in-plane and out-of-plane displacements, and failure mechanisms. As expected, increased chase depth resulted in lower load-bearing capacity. The crack patterns observed in both small-scale and full-scale models exhibited satisfactory agreement.

Keywords: Structural masonry, wall chases, full scale, numerical simulation, Discrete Mesh Element Method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Discretização utilizada no LDEM. a) Modelo cúbico básico, b) Geração do corpo prismático. ....	19
Figura 2 - Relações constitutivas elementares do LDEM - lei de Hillerborg. ....	20
Figura 3 - Modelo cúbico do LDEM com seções modeladas no Abaqus/Explicit. ....	21
Figura 4 - Modelo de tensão pós falha versus deslocamento vinculada à energia de fratura utilizada no Abaqus/Explicit. ....	22
Figura 5 - Pontos de medição de deslocamentos e deformações de a) Milani (2019) e b) Modelo numérico. ....	27
Figura 6 - Esquema das atividades realizadas na pesquisa. ....	31
Figura 7 - Modelo numérico da parede em escala natural. ....	34
Figura 8 - Exemplo do código no Matlab. ....	34
Figura 9 - Blocos em escala natural (1:1): a) modelo alusivo ao natural Milani (2019) e b) modelo numérico – dimensões em cm. ....	35
Figura 10 - Pontos de medição de deslocamentos e deformações do modelo alusivo ao natural Milani (2019). ....	36
Figura 11 - Configuração de cortes nas paredes simuladas: a) corte horizontal a meia altura (H) , b) corte horizontal superior (HS) e c) corte inclinado (I) - medidas em cm. ....	37
Figura 12 - Ensaio de tração à compressão do bloco: a) experimental e b) numérico. ....	38
Figura 13 - Modo de ruptura do bloco: a) experimental e b) numérico. ....	39
Figura 14 - Tensão x deformação específica a) numérico Ref. ; b) experimental Ref. Milani (2019). ....	42
Figura 15 - Tensão x deslocamento fora do plano a) numérico; b) experimental. ....	43
Figura 16 - Modos de falha paredes Ref. numérico. ....	44
Figura 17 - Tensão x deformação específica a) numérico HS20 e HS50 b) HS30 Milani (2019). ....	45
Figura 18 - Tensão x deslocamento fora do plano a) numérico HS20 e HS50; b) experimental Milani (2019). ....	45
Figura 19 - Modos de falha paredes HS20 numérico. ....	46
Figura 20 - Tensão x deformação específica a) numérico I20, I30, I50 e b) experimental Milani I30 e I50 (2019). ....	47

Figura 21 - Tensão x deslocamento fora do plano a) numérico I20, I30 e I50; b) experimental I30 e I50 Milani (2019) .....	48
Figura 22 - Modos de falha paredes I30 e I50 numérico. ....	48
Figura 23 - Comparações de tensões máximas entre modelos com desvios padrão experimentais expressos.....	49
Figura 24 - Tensão x a) deformação específica; b) Deslocamento fora do plano. ...	51
Figura 25 - Modos de falha paredes Referência numérico.....	52
Figura 26 - Tensão x a) deformação específica; b) Deslocamento fora do plano. ...	53
Figura 27 - Modos de falha paredes H20, H30 e H50 numérico. ....	53
Figura 28 - Tensão x a) deformação específica; b) Deslocamento fora do plano. ...	55
Figura 29 - Modos de falha paredes HS20, HS30 e HS50 numérico. ....	56
Figura 30 - Tensão x a) deformação específica; b) Deslocamento fora do plano. ...	58
Figura 31 - Modos de falha paredes I20, I30 e I50 numérico. ....	58
Figura 32 - Comparações entre tensões máximas dos modelos numéricos em escala natural. ....	60
Figura 33 - Tensões máximas atingidas entre modelos experimentais e numéricos (ROT-ROT), em escala reduzida (1:5) e natural (1:1). ....	61
Figura 34 - Tensões máximas atingidas entre modelos experimentais e numéricos (ROT-EG), em escala reduzida (1:5) e natural (1:1). ....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Propriedades dos materiais nos modelos experimentais e numéricos em escala natural e reduzida. ....	24
Tabela 2 - Modelos experimentais e numéricos dos blocos em escala natural e reduzida com suas reduções.....	25
Tabela 3 - Esquemas estruturais das paredes em escala reduzida com e sem cortes. ....	26
Tabela 4 - Tensões máximas obtidas nos modelos experimentais e numéricos em escala reduzida. ....	28
Tabela 5 - Propriedades utilizadas no modelo numérico.....	33
Tabela 6 - Calibração do modelo em escala natural. ....	39
Tabela 7 - Tensões máximas obtidas em escala reduzida.....	41
Tabela 8 - Tensões máximas obtidas em escala natural. ....	50
Tabela 9 - Condições de contorno ideais para modelos ensaiados em escala reduzida. ....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
LDEM	Método dos elementos Discretos Formado por barras
FEM ou MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
RCE	Relação Constitutiva Elementar
LVDT	Transdutor de deslocamento variável linear

## LISTA DE SÍMBOLOS

$L$	Comprimento do módulo cúbico do LDEM
$\varepsilon_p$	Deformação crítica de falha
$\varepsilon_r$	Deformação limite de falha
$E$	Módulo de elasticidade do material
$G_f$	Energia específica de fratura
$R_f$	Fator de falha
$\sigma_t$	Tensão de tração do modelo coesivo
$\sigma_{tu}$	Tensão de falha à tração do modelo coesivo
$u_n$	Deslocamento
$u_{n0}$	Deslocamento para o qual não são mais transmitidas tensões
$\rho$	Massa específica/Densidade do material
$\nu$	Coefficiente de Poisson do material
$\sigma_f$	Tensão de tração máxima da seleção constitutiva
$f_c$	Tensão de compressão
$f_{cm}$	Tensão de compressão média

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	OBJETIVO GERAL .....	17
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS FORMADOS POR BARRAS.....	18
2.2	IMPLEMENTAÇÃO DO LDEM NO AMBIENTE ABAQUS/EXPLICIT.....	20
2.3	ESTUDOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS DE CORTES EM PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL.....	22
3	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	30
3.1	DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES E MALHA UTILIZADA.....	32
3.2	CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	37
4	RESULTADOS.....	40
4.1	ESCALA REDUZIDA (1:5) .....	40
4.2	ESCALA NATURAL (1:1) .....	50
4.3	COMPARAÇÃO NORMALIZADA ENTRE ESCALAS .....	60
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	62
5.1	ESCALA REDUZIDA (1:5) .....	62
5.2	ESCALA NATURAL (1:1) .....	63
5.3	TRABALHOS FUTUROS.....	64
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	65

## 1 INTRODUÇÃO

Reconhecido mundialmente, o sistema construtivo em alvenaria estrutural é frequentemente empregado em diversos projetos de engenharia, suas propostas visam uma certa economia de modo geral. Neste sistema não são utilizados pilares ou vigas, o elemento responsável por transmitir e suportar esforços advindos das cargas atuantes são os próprios blocos, podendo estes serem feitos de material cerâmico ou de concreto. Outro fator de importante destaque é que, instalações hidráulicas e elétricas devem ser realizadas com total planejamento prévio, pois as mesmas devem ser alocadas através dos vazios encontrados na geometria dos blocos estruturais a fim de não comprometer a resistência em questão, porém, em alguns casos específicos onde não se encontram outras alternativas, cortes precisam ser feitos para que o projeto seja executável. Um problema recorrente, é que, por vezes, pessoas sem as devidas informações acreditam que cortes em paredes de alvenaria estrutural possam ser realizados com quaisquer dimensões, pois ao recorrerem as normas Brasileiras poucas informações são encontradas referentes a profundidades ou larguras máximas permitidas, algumas normas internacionais detêm maiores informações sobre recortes permitidos mas não são relevantes por conta que, diferentes materiais e métodos divergem de um país para outro, impossibilitando a correlação entre normas nacionais e estrangeiras.

No Brasil, a ABNT NBR 16868 (2020) é a norma mais atualizada em vigência, sendo esta a responsável por conter informações referentes a projetos em alvenaria estrutural, aplicável tanto para blocos cerâmicos quanto para blocos de concreto, consta no capítulo 10, diretrizes referentes a cortes em paredes. Porém, apenas menciona que todo e qualquer corte deve ser previsto com antecedência no projeto estrutural. Cortes verticais que excedam 60 cm de comprimento definem elementos distintos e que condutores de fluídos embutidos em paredes estruturais não são permitidos, exceto quando a manutenção não exigir corte. Outras duas normas não tão recentes, ABNT NBR 15812-1 (2010) e ABNT NBR 15961-1 (2011) tratam respectivamente sobre projetos de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e projetos de alvenaria estrutural de blocos de concreto, constam vagamente, sem demais informações, que não são permitidos cortes individuais horizontais que excedam o comprimento de 40 cm em paredes estruturais e que também não são permitidos em

uma mesma parede cortes horizontais que quando somados os comprimentos, ultrapassem  $1/6$  do comprimento total da parede em planta.

Com a crescente demanda deste sistema construtivo, estudos foram elaborados com o intuito de complementar as normas brasileiras a fim de orientar através de dados concretos o que poderia ou não ser feito de modo que os projetos apresentassem o melhor desempenho possível, deixando explícito a melhor localização, sentido, profundidades e larguras dos cortes.

Pesquisas relacionadas a influência dos cortes no comportamento mecânico da alvenaria começaram por Fisher (1973), posteriormente, Kirtsching e Metje (1986), Mojsilovic (2011), Reichel et al. (2013) e Milani (2019) elaboraram modelos em escalas naturais e reduzidas que, ao ensaiadas, variaram fatores como o tipo do bloco, esbeltez das paredes, localização, dimensão dos cortes e excentricidade ou não dos carregamentos. Neste segmento de pesquisa ensaios em modelos físicos apresentam dificuldades que retardam o avanço do tema, sendo elas, custos relativamente altos, complexa preparação e transporte, exigências para ensaios e elevada demanda de carregamento. Surge então uma alternativa com o intuito de sanar estes impasses, a utilização de métodos numéricos capazes de simular o comportamento da alvenaria através de uma premissa de maior produtividade e menores gastos.

Atualmente, poucos estudos relacionando métodos numéricos com ensaios experimentais em alvenaria estrutural com cortes são encontrados. Encontram-se trabalhos como o de Mojsilovic (2011) e Reichel et al. (2013) onde foram elaborados modelos numéricos através do método dos Elementos Finitos (MEF) com intuito de complementarem suas análises experimentais através de simulações do comportamento da alvenaria. Medeiros (2021) e Azzolin (2022) reproduziram numericamente os ensaios experimentais de Milani (2019) através do Método dos Elementos Discretos formados por barras (LDEM).

A versão do LDEM utilizado neste trabalho consiste na discretização do contínuo por uma treliça espacial regular, onde massas equivalentes são concentradas nos nós, e a rigidez das barras são equivalentes ao contínuo que tentam representar (KOSTESKI, 2012). Deste modo, possibilitando simular o comportamento de paredes de alvenaria com cortes submetidas a compressão.

O modelo numérico foi criado através do software Matlab e introduzido posteriormente no ambiente Abaqus/Explicit em função dos diversos recursos nele

disponíveis. Em um primeiro instante, será validado um modelo numérico através de comparações com ensaios experimentais realizados por Milani (2019) e, após, serão apresentados os resultados numéricos encontrados por meio de simulações de ensaios em paredes com escalas 1:5 e 1:1.

## **1.1 OBJETIVOS**

Na sequência, serão indicados o objetivo geral e os demais objetivos específicos deste trabalho.

### **1.1.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo principal deste trabalho é, através de simulações numéricas utilizando o LDEM, analisar a influência de cortes em paredes de alvenaria estrutural.

### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Validação de um modelo numérico através da comparação de resultados experimentais obtidos em ensaios com paredes em escala reduzida.
- Através do LDEM, analisar os efeitos de carregamentos de compressão em paredes de alvenaria estrutural com cortes em escala natural;
- Analisar a relação entre a profundidade dos cortes horizontais/inclinados e a mudança no comportamento mecânico da alvenaria;
- Analisar os diferentes modos de ruptura através de imagens geradas pelo modelo numérico;
- Quantificar os parâmetros de deformações específicas, deslocamentos fora do plano e resistência máxima em função das diferentes profundidades de recorte;

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

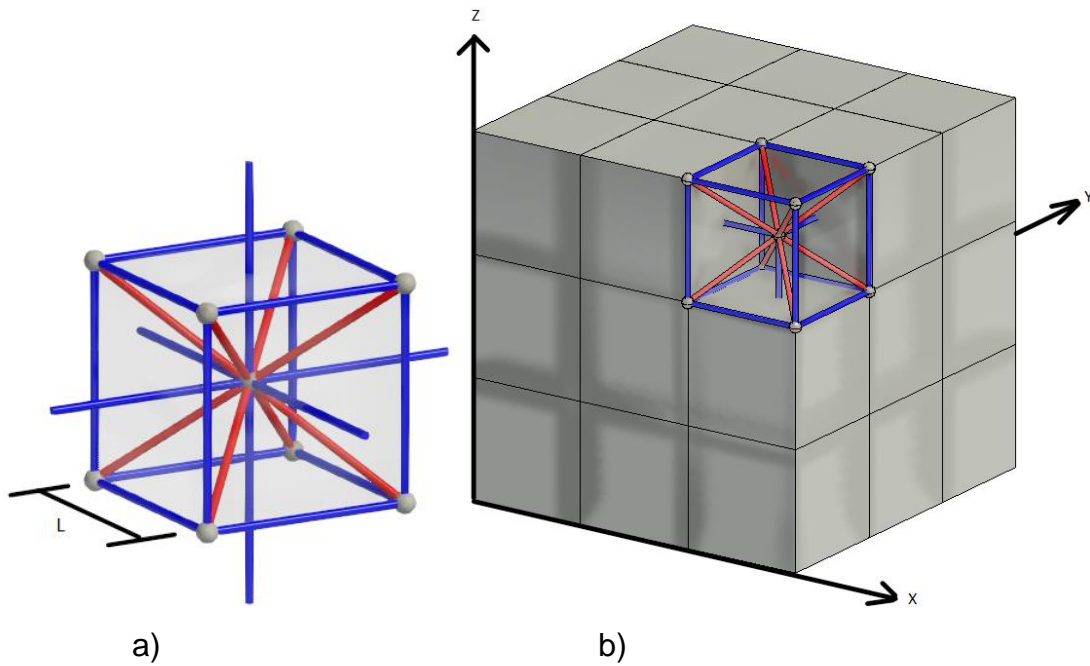
Neste capítulo, é apresentado um sucinto resumo dos estudos considerados significativos para o assunto e o detalhamento do método de análise numérica utilizado para a obtenção dos resultados. Informações mais específicas sobre os ensaios experimentais e numéricos podem ser encontrados em Milani (2019), Medeiros (2021), Medeiros et al. (2022) e Azzolin (2022).

### **2.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS FORMADOS POR BARRAS**

A seguir se apresenta um resumo da base teórica do Método dos Elementos Discretos formados por barras (LDEM) utilizado neste trabalho. Porém uma descrição mais detalhada pode ser encontrada em trabalhos como Kostaski et al. (2016), Colpo et al. (2017), Puglia et al. (2019), Silva et al. (2020) e Vidal et al. (2020), entre outros.

No Método dos Elementos Discretos formados por barras, o meio contínuo é representado por intermédio de um arranjo espacial de barras com a massa concentrada em seus extremos (Kostaski,2012). O módulo básico deste método é composto por vinte e seis elementos de barras e nove nós, cada nó com três graus de liberdade dados pelas componentes do vetor deslocamento em função das coordenadas globais, representando assim, um sólido contínuo através da repetição de um módulo cúbico básico, representado na Figura 1.

Figura 1 - Discretização utilizada no LDEM. a) Modelo cúbico básico, b) Geração do corpo prismático.



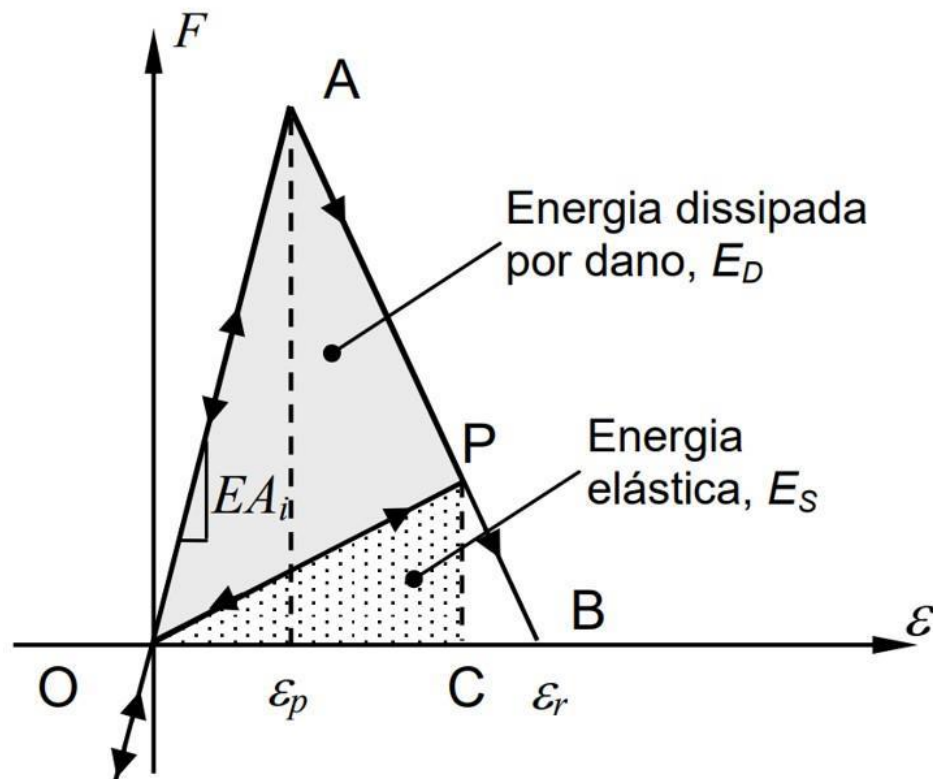
Fonte: Adaptada de Kostaski (2012).

Onde:

L – Comprimento do módulo cúbico.

Todos os elementos do LDEM possuem uma relação constitutiva bilinear, a qual é amplamente utilizada em simulações de comportamento de materiais quase frágeis. Esta lei bilinear considera fraturas frágeis e registra os efeitos da nucleação e propagação de fissuras considerando a carga e descarga do elemento tensionado. A relação constitutiva elementar (RCE) considerada relaciona as forças internas às deformações, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Relações constitutivas elementares do LDEM - lei de Hillerborg.



Fonte: Kostaski (2012).

A rigidez do elemento é obtida através do produto do módulo de elasticidade ( $E$ ) do material pela área da seção transversal ( $A_i$ ), com a deformação crítica de falha ( $\epsilon_p$ ) e a deformação limite ( $\epsilon_r$ ). Um certo ponto  $P$  na curva força – deformação, que apresenta uma descarga linear até a origem, (Figura 2) tem área  $OAP$  representando a densidade de energia dissipada por fratura. A área  $OPC$  representa a densidade de energia elástica, e área  $OAB$  está relacionada à energia necessária para fraturar o elemento que ao falhar e perder sua capacidade de carga tem sua energia dissipada por dano igual à energia de fratura do material.

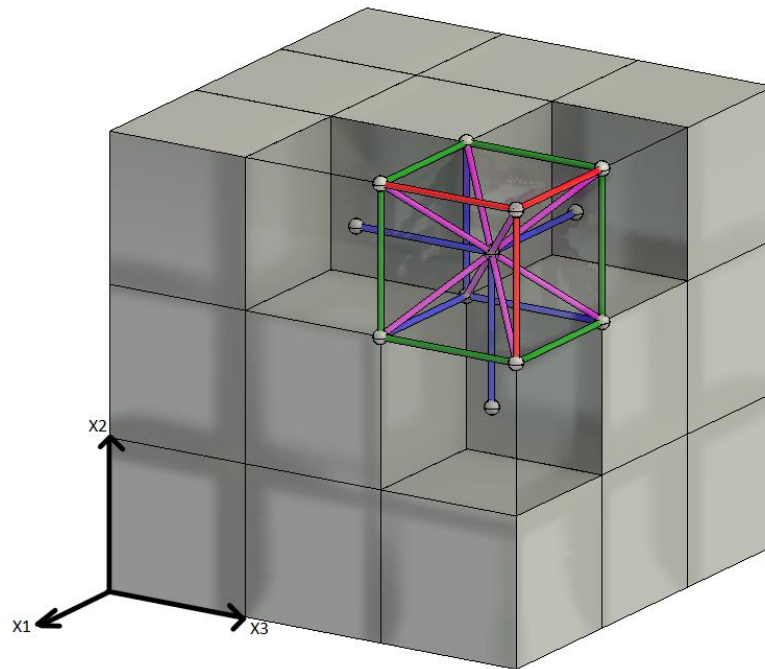
## 2.2 IMPLEMENTAÇÃO DO LDEM NO AMBIENTE ABAQUS/EXPLICIT

Com o intuito de reduzir custos computacionais, tempo de simulação ou poder criar modelos com condições de contorno mais complexas, são utilizados modelos mistos para que se possa aproveitar da melhor forma as qualidades individuais de

cada um. Assim, o LDEM é implementado no software comercial Abaqus/Explicit criando modelos mistos LDEM + FEM.

A implementação do modelo no Ambiente Abaqus/Explicit é realizada através da superposição de módulos básicos LDEM. Cada elemento se encontra associado a uma seção, e a cada seção atribui-se um tipo de material. Na disposição cúbica final encontram-se elementos de arestas ( $S_A$ ), faces ( $S_c$ ), internos ( $S_i$ ) e diagonais ( $S_d$ ), respectivamente representados nas cores vermelho, verde, azul e roxo no modelo global da Figura 3.

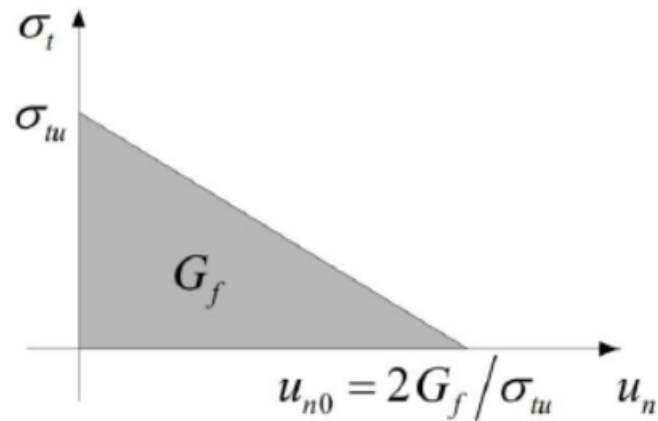
Figura 3 - Modelo cúbico do LDEM com seções modeladas no Abaqus/Explicit.



Fonte: Autoria própria.

O concreto pode ser representado no Abaqus/Explicit utilizando o modelo de fissuras distribuídas (Figura 4), muito semelhante à lei constitutiva bilinear do LDEM. O software utiliza o modelo de fissuras distribuídas para representar descontinuidades e o comportamento frágil do concreto, onde, é utilizada uma taxa de liberação de energia em Modo I  $G_f$  como parâmetro de fratura (SILVA,2018).

Figura 4 - Modelo de tensão pós falha versus deslocamento vinculada à energia de fratura utilizada no Abaqus/Explicit.



Fonte: Kostaski (2012).

Na Figura 4,  $u_n$ ,  $u_{n0}$ ,  $\sigma_t$  e  $\sigma_{tu}$  são respectivamente, deslocamento normal, deslocamento máximo do elemento, tensão de tração e tensão onde ocorre o primeiro dano do elemento.

### 2.3 ESTUDOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS DE CORTES EM PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL

Milani (2019) realizou ensaios experimentais referentes a compressão simples e tração na compressão em blocos estruturais, compressão simples em prismas de dois blocos e compressão em pequenas paredes tanto em escala reduzida (1:5) quanto em escala natural (1:1), até que, por fim, realizou ensaios de paredes com e sem cortes apenas em escala reduzida (1:5). Medeiros (2021), Medeiros et al. (2022) e Azzolin (2022) simularam numericamente através do LDEM parte dos ensaios sobre paredes com e sem cortes em escala reduzida (1:5) realizados por Milani (2019).

Referente aos ensaios experimentais de Milani (2019), paredes com e sem cortes, em escala reduzida (1:5) com dimensões de 24cm x 52cm (largura x altura) correspondente a uma parede em escala natural com dimensões de 1,20m x 2,60m, dois grupos de paredes foram elaborados, o grupo das paredes sem cortes correspondem a paredes íntegras consideradas como referência, enquanto que, o grupo de paredes com cortes dispõem de recortes variando de direção, posição e

profundidade, sendo elas reduções de 20%, 30% e 50% da própria espessura de parede, com carregamentos aplicados de forma excêntrica ou não. As nomenclaturas das paredes foram definidas através do padrão: Região de corte, profundidade de corte e carregamento. Por exemplo, HS30 é referente a parede com corte horizontal superior com 30% de redução da espessura e carregamento centrado. As nomenclaturas H e I referem-se às paredes com cortes horizontais e inclinados, respectivamente. Tratando-se das direções variadas, foram analisados cortes horizontais, verticais e inclinados com ângulo de 45°, os cortes horizontais ainda foram diversificados de posição em relação a altura com cortes horizontais na região central e no terço superior das paredes.

Medeiros (2021), Medeiros et al. (2022) e Azzolin (2022) utilizaram modelos numéricos semelhantes, ambos possuem dimensões em escala reduzida de (1:5) com dimensões de 24 cm de largura e 52 cm altura, constituídas por blocos de 2,8 cm x 3,8 cm x 5,8 cm de largura, altura e comprimento, respectivamente, com juntas de argamassa de 2mm. Foram submetidos a carregamentos centrados nos ensaios com condições de contorno tanto rotulada-rotulada quanto rotulada-engastada, com o intuito de definir qual das duas mais se assemelha aos ensaios experimentais. As reduções dos cortes nos modelos seguem o modelo experimental de Milani (2019) com reduções de 20%, 30% e 50% da espessura das paredes.

Algumas diferenças entre os dois modelos numéricos citados acima podem ser destacadas, por exemplo, Medeiros (2021) e Medeiros et al. (2022) realizaram apenas cortes horizontais centrais nos seus modelos, Azzolin (2022), por sua vez, realizou cortes horizontais centrais, horizontais no terço superior e inclinados. Outra diferença é relacionada ao comprimento da malha de módulo cúbico do modelo numérico, Medeiros (2021) e Medeiros et al. (2022) utilizaram um comprimento de  $L = 2,8$  mm, devido aos bons resultados e viabilidade de esforços apresentados, enquanto que Azzolin (2022) utilizou um comprimento de  $L = 2,0$  mm.

Na Tabela 1 estão indicadas as propriedades dos materiais caracterizados por Milani (2019) experimentalmente, módulo de elasticidade representado por (E), densidade ( $\rho$ ), tensão máxima à compressão ( $f_c$ ), tensão máxima a tração ( $f_t$ ), e as respectivas propriedades utilizadas no modelo numérico de Azzolin (2022), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), deformação crítica ( $\epsilon_p$ ) e energia de fratura ( $G_f$ ). O modelo numérico de Medeiros (2021) utilizou exatamente as mesmas propriedades de Milani (2019).

Os campos da tabela que possuem a letra X em vermelho representam propriedades não utilizadas no modelo.

Tabela 1 -Propriedades dos materiais nos modelos experimentais e numéricos em escala natural e reduzida.

	Milani (2019)		Azzolin (2022)		
	Material 1 Bloco	Material 2 Argamassa	Material 1 Bloco	Material 2 Argamassa	
<b>ESC. NAT.</b>	E (MPa)	9448	7272	x	x
	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1800	x	x	x
	fc (MPa)	30,81	5,84	x	x
	ft (MPa)	2,04	1,74	x	x
	$\nu$	x	x	x	x
	$\epsilon_p$	x	x	x	x
	Gf (N/m)	x	x	x	x
	<b>ESC. REDUZ.</b>	E (MPa)	10449	7272	10449
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )		1900	x	1900	1900
fc (MPa)		39,28	5,84	39,28	5,84
ft (MPa)		3,87	1,74	14,71	1,74
$\nu$		x	x	0,25	0,25
$\epsilon_p$		x	x	1,407E-03*	2,393E-04
Gf (N/m)		x	x	65,00	17,00

\* Azzolin (2022) através de uma calibração no modelo numérico alterou o valor de  $\epsilon_p$  do bloco.

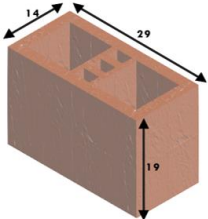
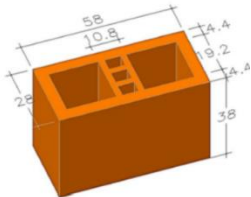
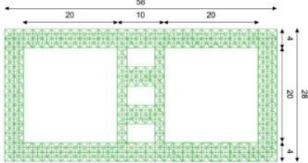






Fonte: Autoria própria.

A seguir na Tabela 2 encontram-se os modelos experimentais e numéricos dos blocos em escala natural e reduzida com suas reduções. Na Tabela 3 os modelos experimentais e numéricos em escala reduzida relevantes para este estudo, indicando condições de contorno, cortes/profundidades e tipo de carregamento.

Os campos da tabela que possuem a letra X em vermelho representam modelos não elaborados/ensaiados pelos autores. Na última linha da Tabela 3,

encontram-se as condições de contorno impostas aos modelos numéricos, podendo eles serem rotulado – rotulado representado pela letra R ou rotulado – engastado pela letra E.

Tabela 2 - Modelos experimentais e numéricos dos blocos em escala natural e reduzida com suas reduções.

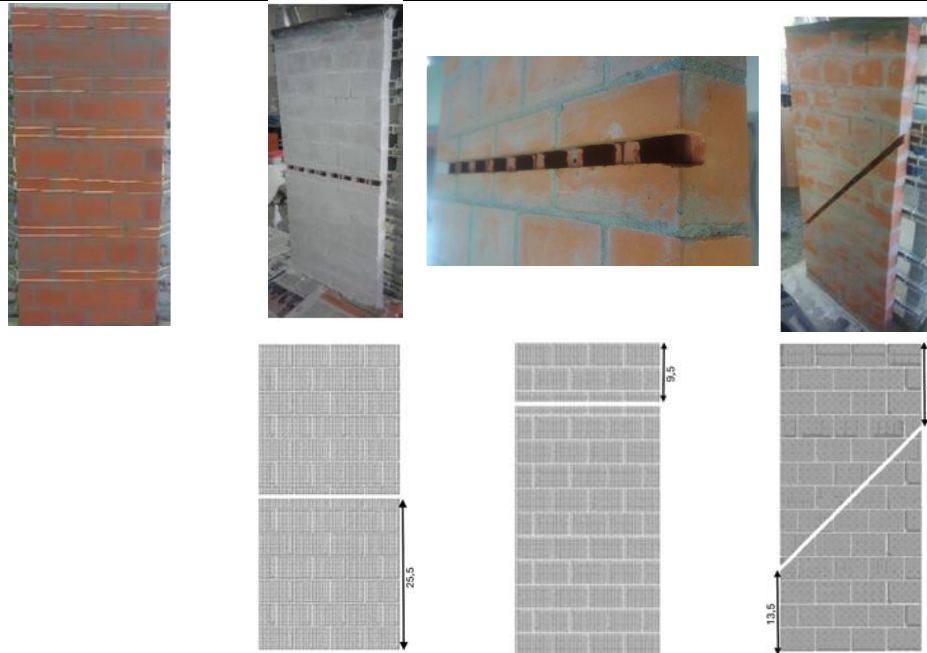
Redução (%)	Milani (2019)		Modelo numérico LDEM	
	ESC.NAT. (cm)	ESC. RED. (mm)	ESC. NAT. (cm)	ESC. RED. (mm)
REF (0%)			✘	
20%	✘		✘	
30%	✘		✘	
50%	✘		✘	

tc – redução da espessura

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 - Esquemas estruturais das paredes em escala reduzida com e sem cortes.

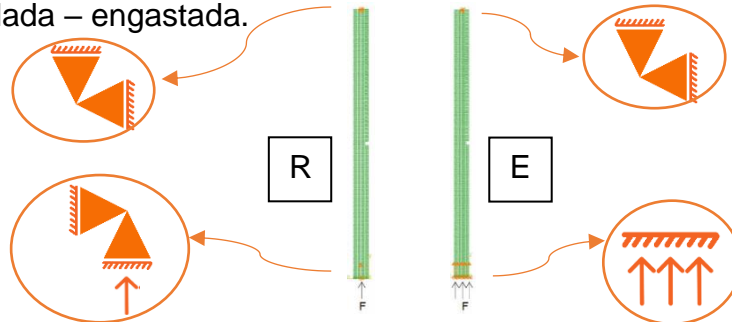
Cortes	Referência (REF)	Horizontal			Horizontal sup.			Inclinado 45°		
		(H)			HS			(I)		
Red.(%)	---	20	30	50	20	30	50	20	30	50
Milani (2019)	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✓
Medeiros (2021)*	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Azzolin (2022)**	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✓



Modelos  
(cm)

\*Medeiros (2021) ensaiou os modelos H20, H30 e H50 de forma rotulada – rotulada e, por fim, H50 rotulada – engastada;

\*\*Azzolin (2022) ensaiou os seus modelos com as duas condições, rotulada – rotulada e rotulada – engastada.

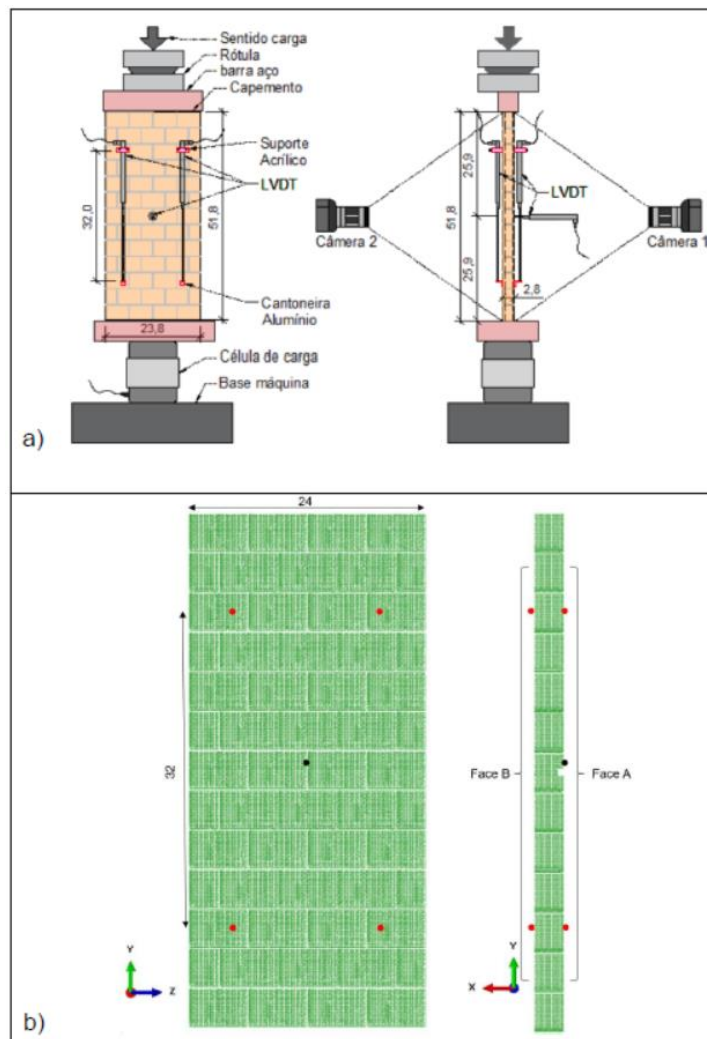


Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos por Milani (2019) e Azzolin (2022) resumem-se a parâmetros como tensão de ruptura, deformações específicas, deslocamentos fora do plano e modos de falha com a finalidade de relacionar as geometrias distintas dos cortes de cada modelo com a influência no comportamento mecânico da alvearia.

Para realizar as medições das deformações específicas e deslocamentos fora do plano, são analisados módulos do modelo numérico que coincidam com os pontos onde foram instalados os LVDTs no modelo experimental de Milani (2019). Na Figura 5, os pontos em vermelho mostram a localização dos módulos onde foram medidas as deformações específicas enquanto que os pontos em preto a determinação dos deslocamentos fora do plano.

Figura 5 - Pontos de medição de deslocamentos e deformações de a) Milani (2019) e b) Modelo numérico.



Fonte: Azzolin (2022).

As tensões máximas encontradas para os modelos em escala reduzida experimental e numérica estão indicadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Tensões máximas obtidas nos modelos experimentais e numéricos em escala reduzida.

Parede	Tensão máxima (MPa)				
	Experimental	Modelo numérico			
		Apoio1 (rot-eng)	Erro (%)	Apoio2 (rot-rot)	Erro (%)
H20	4,80	5,19	+8,1	4,57	-4,9
H30	3,49	4,61	+32,1	3,70	+6,0
H50	2,58	2,84	+10,0	1,63	-36,9
HS30	4,12	4,19	+1,8	3,85	-6,5
I30	5,00	4,42	-11,7	3,32	-33,5
I50	3,45	2,65	-23,3	1,89	-45,2

Fonte: Azzolin (2022).

Após analisados os resultados, Milani (2019) concluiu que em função das diferentes orientações e posições dos cortes, o caso que apresentou uma maior perda de resistência foram os com cortes horizontais centrais, a segunda maior perda de resistência foi através dos cortes horizontais superiores e por último, os cortes inclinados, todos apresentando diferenças significativas em relação as paredes de referência. Concluiu também que, logo, a profundidade dos cortes somados aos demais pontos citados acima, demandam uma atenção importante na realização destes cortes por estarem relacionados diretamente com as resistências das paredes em questão.

Azzolin (2022) concluiu que, na maioria das simulações os resultados encontrados em função do modelo 1 (rot-eng) mostram-se mais próximos dos experimentais. Ao analisar o comportamento mecânico das paredes concluiu-se que, foi afetado diretamente pela espessura dos cortes, reduzindo a resistência a compressão conforme a espessura aumentava. O modo de fratura dos ensaios

experimentais caracterizado por flexão apenas não foi obtido no modelo numérico com cortes inclinados (50%), onde a ruptura foi por cisalhamento.

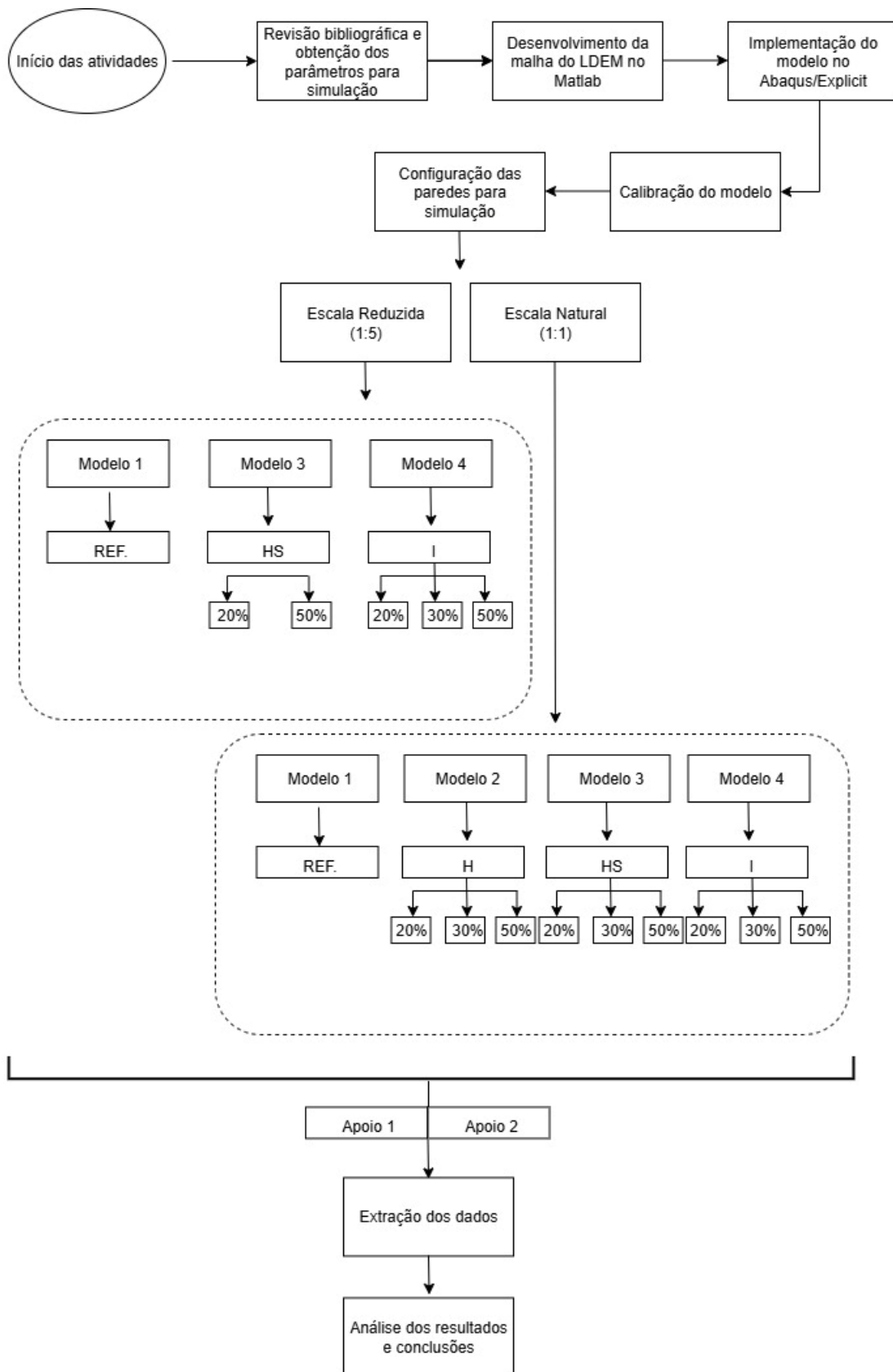
### 3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste capítulo será abordada a metodologia utilizada para a realização desta pesquisa, na qual foram realizadas simulações numéricas através do Método dos Elementos Discretos formados por barras de paredes de alvenaria estrutural com cortes em escala reduzida (1:5) e escala natural (1:1).

Todas as simulações numéricas em escala reduzida (1:5) seguiram exatamente os mesmos padrões de elaboração/execução que Azzolin (2022), e podem ser encontradas na revisão bibliográfica deste estudo.

Foram analisados o comportamento mecânico de paredes com cortes horizontais a meia altura, superiores e inclinados a 45°. Estes cortes foram feitos com diferentes profundidades, definidas em relação a redução de 20%, 30% e 50% da espessura destas paredes. Em todos os casos foram aplicados carregamentos centrados e dois tipos de condições de contorno, sendo um deles o apoio tipo 1 (ROT-ENG) e o outro o apoio tipo 2 (ROT-ROT). Todos os parâmetros utilizados nas simulações foram baseados nos ensaios experimentais de caracterização dos materiais de Milani (2019). A Figura 6 esquematiza os procedimentos realizados para a execução das simulações dos modelos.

Figura 6 - Esquema das atividades realizadas na pesquisa.



Fonte: Autoria própria.

### 3.1 DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES E MALHA UTILIZADAS

- **Escala reduzida (1:5)**

Os parâmetros utilizados no modelo em escala reduzida podem ser encontrados na Tabela 1, foram os mesmos utilizados no modelo de Azzolin (2022).

A malha, dimensões do modelo, profundidades dos cortes e condições de contorno também foram as mesmas utilizadas no trabalho de Azzolin (2022).

Os modelos ensaiados neste trabalho em escala reduzida visam complementar os modelos feitos por Azzolin (2022), para que a comparação entre modelos numéricos e experimentais de Milani (2019) se torne ainda mais significativa. Através disto, foram ensaiados modelos de referência sem cortes, HS20, HS50, I20, I30 e I50.

Os resultados foram analisados da mesma forma que Azzolin (2022).

- **Escala natural (1:1)**

Os parâmetros utilizados no desenvolvimento do modelo em escala natural foram: Módulo de elasticidade ( $E$ ), densidade ( $\rho$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), deformação crítica de falha ( $\epsilon_p$ ), energia de fratura e fator de falha encontrados na Tabela 5. Considerado como valor limite no método dos elementos discretos formados por barras, o coeficiente de Poisson utilizado foi de 0,25. A massa específica considerada constante para toda a parede como  $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$  baseado nos resultados de caracterização do material de Milani (2019).

A deformação crítica ( $\epsilon_p$ ) de falha do modelo foi definida em função de:

$$\sigma_{tu} = E \epsilon_p . \quad (1)$$

Com os valores de resistência a tração do bloco em escala natural 1:1 ( $\sigma_{tu}$ ) sendo 2,04 MPa e o módulo de elasticidade ( $E_b$ ) igual a 9448 MPa, foi calculado um valor de deformação crítica do bloco  $\epsilon_{pb} = 2,159 \times 10^{-4}$ . De mesmo modo calculou-se para a argamassa, porém com valores de  $\sigma_{tu} = 1,74 \text{ MPa}$  e  $E = 7272 \text{ MPa}$ , resultando em uma  $\epsilon_{pa} = 2,393 \times 10^{-4}$ .

A energia de fratura  $G_f$  foi definida pela resistência a compressão conforme recomendado pela equação de CEB-FIP Model Code 1990 (1993):

$$G_f = 25 \left( \frac{f_c}{10} \right)^{0,7} . \quad (2)$$

Onde  $f_c$  corresponde ao valor resistente à compressão no bloco e na argamassa, sendo eles,  $f_{cb} = 30,81$  MPa e  $f_{ca} = 5,84$  MPa. Resultando em uma energia de fratura para o bloco de  $G_{fb} = 54,95$  N/m e para a argamassa  $G_{fa} = 17$  N/m. Considerando o valor da tensão de ruptura na compressão de cada material encontrado na tabela 1.

A tabela 5 indica as propriedades utilizadas nas simulações numéricas das paredes em escala natural, salvo que,  $\epsilon_p$  é uma propriedade da relação constitutiva,  $E$  e  $\sigma_{tu}$  propriedades do material, estes parâmetros serão melhor analisados durante a calibração do modelo.

Tabela 5 - Propriedades utilizadas no modelo numérico.

Propriedades	Material 1	Material 2
	Bloco	Argamassa
E (MPa)	9448	7272
$\nu$	0,25	0,25
$\rho$ (MPa)	1800	1900
$\epsilon_p$	2,159E-4	2,393E-04
$G_f$ (N/m)	54,96	17,00

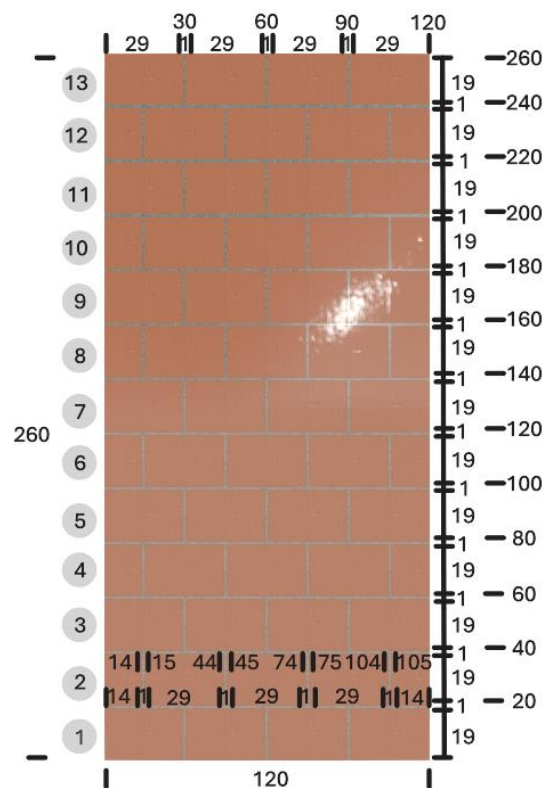
Fonte: Autoria própria.

A malha do modelo foi definida com o comprimento do módulo cúbico básico de 1cm, pois teve como base a obtenção de um modelo com medidas correspondentes ao experimental de Milani (2019).

Com a definição das propriedades tanto dos blocos quanto da argamassa é criado um programa no software Matlab, que gera o modelo que será posteriormente carregado no software Abaqus/Explicit.

Para auxiliar no processo da elaboração do código, foram predefinidos intervalos de distâncias com base nos eixos x, y e z, indicados na Figura 7, que facilitaram as definições de intervalos onde estão posicionados cada elemento. O código analisa a coordenada do centroide da barra e define se está dentro ou fora da posição informada, acrescentando elementos com material de argamassa ou bloco, nos eixos citados. Na Figura 8, um exemplo de inúmeros utilizados no código em questão.

Figura 7 - Modelo numérico da parede em escala natural.



Fonte: Autoria própria.

Figura 8 - Exemplo do código no Matlab.

```

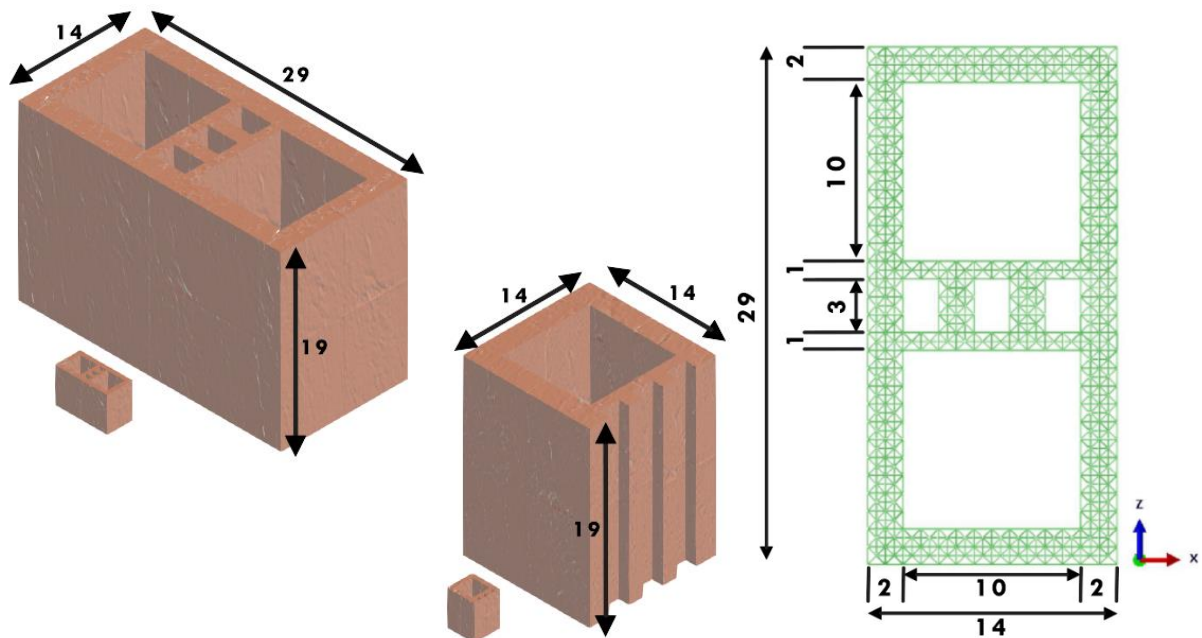
Editor - C:\Users\usuario\Desktop\TCC-II\DEM-ABQ - Parede ESC REAL\posicion3.m
inp_DEM.m  posicion3.m  +
34
35 %barras diagonais!
36 %diagonais horizontais (entre fiadas - na horizontal)
37 i=(M-1)*N*L+M*(N-1)*L+M*N*(L-1)+1;
38 Fin=i-1+(M-1)*(N-1)*(L-1)*8;
39 while i<=Fin
40     Coory=(conecty(2,Barras(i,1))+conecty(2,Barras(i,2)))/2/Lc;
41     Coorz=(conecty(3,Barras(i,1))+conecty(3,Barras(i,2)))/2/Lc;
42     intery=[19.5 39.5 59.5 79.5 99.5 119.5 139.5 159.5 179.5 199.5 219.5 239.5];
43
44     if any(abs(Coory-intery)<0.51)
45         Barras(i,3)=7;
46     end

```

Fonte: Autoria própria.

No Abaqus são definidos os carregamentos, condições de contorno, direções e profundidades dos cortes. Os modelos de paredes em escala natural 1:1 apresentam dimensões nominais de 120 cm de largura x 260 cm de altura, constituídas por blocos com 14 cm x 19 cm x 29 cm de largura, altura e comprimento, respectivamente. A argamassa de assentamento possui espessura de 1 cm. Medidas estas encontradas na Figura 7 e Figura 9, respectivamente.

Figura 9 - Blocos em escala natural (1:1): a) modelo alusivo ao natural Milani (2019) e b) modelo numérico – dimensões em cm.



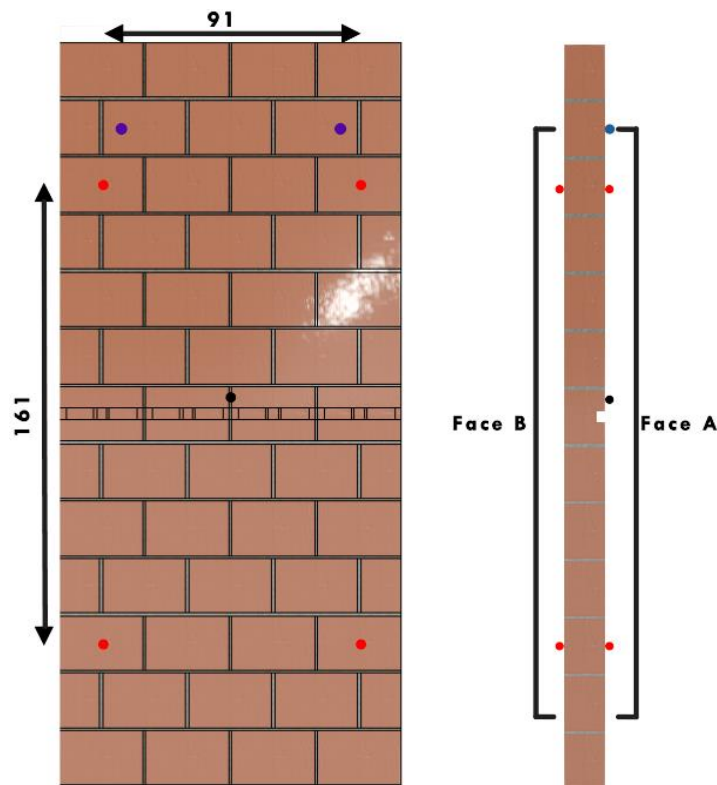
Fonte: Autoria própria.

O modelo numérico dos blocos em escala natural, possui medidas exatas ao modelo experimental, isto ocorre em função do comprimento do módulo cúbico utilizado, neste caso igual a 1 cm.

Nos ensaios experimentais realizados por Milani (2019), as paredes em escala reduzida foram ensaiadas a compressão e instrumentadas com LVDTs para que fosse possível medir as suas deformações fora do plano. Nas simulações numéricas, as medições das deformações específicas e deslocamentos fora do plano foram analisados através de módulos do modelo que coincidam com os pontos onde os LVDTs foram instalados. Na Figura 10 estão indicados quais seriam os pontos

utilizados por Milani (2019) se o mesmo tivesse realizado os ensaios em escala natural, levando em conta o modelo em escala reduzida realizado.

Figura 10 - Pontos de medição de deslocamentos e deformações do modelo alusivo ao natural Milani (2019).



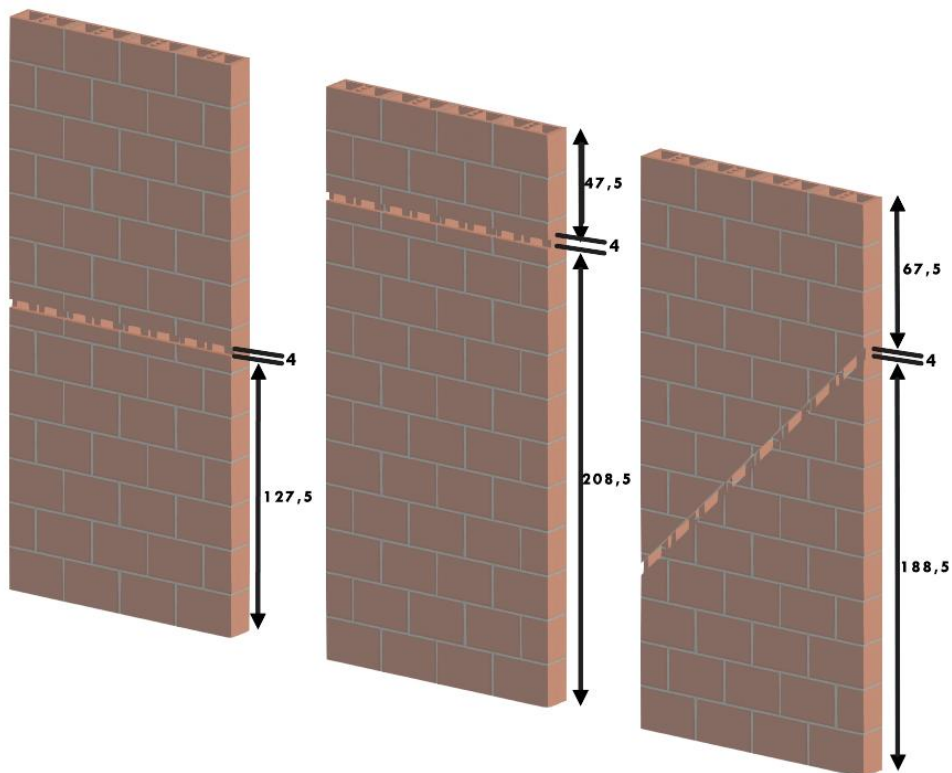
Fonte: Autoria própria.

Os pontos em vermelho representam a localização dos módulos onde foi determinada a deformação específica enquanto que o ponto em preto se refere a determinação do deslocamento fora do plano. Os pontos em azul, foram utilizados apenas para a determinação da deformação específica do modelo HS da face A, pois os pontos em vermelho da face A na parte superior da parede neste modelo coincidiram com o corte realizado.

Referente as condições de contorno, duas situações foram consideradas para todas as paredes em escala natural com cortes, as mesmas informadas na Tabela 3, onde, no modelo E o topo da parede foi considerado rotulado e a base foi considerada engastada e no Modelo R tanto o topo quanto a base foram considerados rotulados.

Em relação aos cortes, as paredes em escala natural foram simuladas de acordo com as configurações da Figura 11, onde estão representados cortes horizontais centrais (H), cortes horizontais superiores (HS) e cortes inclinados (I), todas com carregamento centrado. Na Tabela 2 encontram-se os percentuais de redução da espessura do modelo numérico em relação ao experimental de Milani (2019).

Figura 11 - Configuração de cortes nas paredes simuladas: a) corte horizontal a meia altura (H) , b) corte horizontal superior (HS) e c) corte inclinado (I) - medidas em cm.



Fonte: Autoria própria.

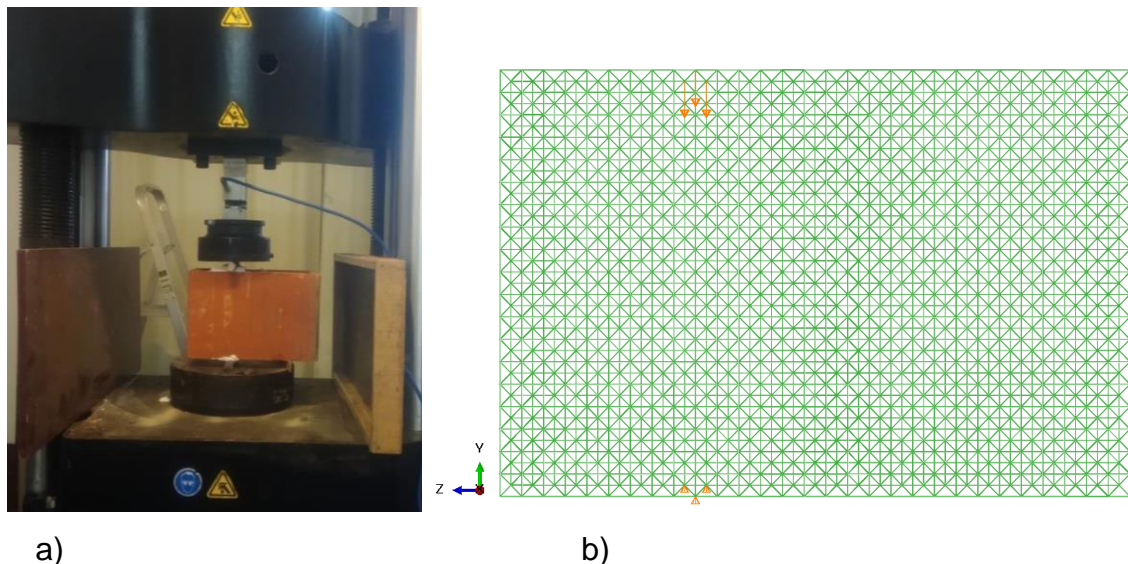
### 3.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO EM ESCALA NATURAL

Nesta seção foi calibrado o parâmetro correspondente da energia de fratura  $G_f$  através da simulação do ensaio de resistência a tração por compressão conforme realizado experimentalmente. Um único bloco foi submetido a simulação alterando apenas os valores de  $G_f$  e como consequência a força máxima resistente do elemento, mantendo os demais parâmetros da relação constitutiva inalterados. Nesta calibração

buscou-se a máxima semelhança possível entre a resistência a tração máxima e o modo de falha obtidos experimentalmente.

No ensaio experimental, o carregamento foi aplicado nos blocos em escala natural com uma distância igual a metade da altura medida a partir da extremidade do bloco. Adotando esta distância, o modelo numérico foi simulado na condição rotulado na base inferior e superior. As configurações do ensaio experimental de Milani (2019) e numérico estão apresentadas na Figura 12. No modelo numérico, os apoios foram aplicados a três módulos com o intuito de que ocorresse uma distribuição do carregamento semelhante às condições reais.

Figura 12 - Ensaio de tração à compressão do bloco: a) experimental e b) numérico.



Fonte: Autoria própria.

Milani (2019) obteve uma resistência à tração na compressão média de 2,04 MPa com um desvio padrão calculado de 0,28 MPa. Após testados diferentes valores de energia de fratura  $G_f$  (Tabela 6) a melhor resposta foi a que utilizou  $G_f = 135 \text{ N/m}$ , com  $\epsilon_{pb} = 2,159 \times 10^{-4} \text{ MPa}$ , correspondente a uma tensão máxima no elemento do LDEM de 2,04 MPa. Com estas propriedades o bloco simulado atingiu uma resistência à tração na compressão de 2,26 MPa, condizente com o intervalo do desvio padrão.

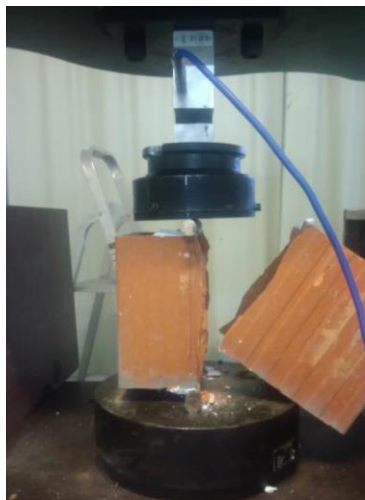
Tabela 6 - Calibração do modelo em escala natural.

<b>Simulação</b>	<b>Gf N/m</b>	<b><math>\sigma_f</math> MPa</b>	<b><math>\epsilon_p</math> -</b>	<b><math>\sigma_t</math> MPa</b>
<b>1</b>	55	2,04	2,159E10-4	0,79
<b>2</b>	123	2,04	2,159E10-4	1,41
<b>3</b>	135	2,04	2,159E10-4	2,26

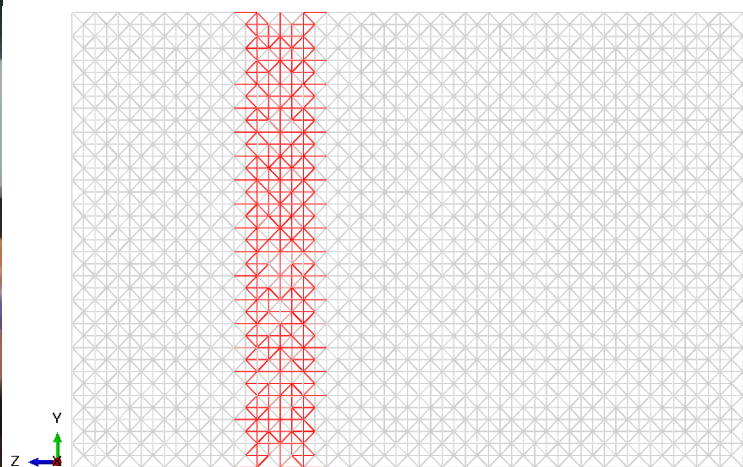
Fonte: Autoria própria.

Referente ao modo de falha, na Figura 13 é possível observar que mesmo com os ajustes nos parâmetros a simulação conseguiu representar o modo de falha do bloco experimental. Os elementos em vermelho na Figura 13 b) representam as barras que não resistiram, ou seja, por onde ocorre a ruptura no modelo.

Figura 13 - Modo de ruptura do bloco: a) experimental e b) numérico.



a)



b)

Fonte: Autoria própria.

## 4 RESULTADOS

Nos seguintes itens, serão apresentados os resultados obtidos para as tensões máximas atingidas, curvas de tensão x deslocamento fora do plano, curvas de tensão x deformação específica e modos iniciais de fissuras, primeiramente para as paredes em escala reduzida (1:5) e por fim, para as paredes em escala natural (1:1).

### 4.1 Escala reduzida (1:5)

A fim de explorar melhor o modelo numérico utilizado e validado por Azzolin (2022), foram realizadas simulações de modelos submetidos a compressão em paredes em escala reduzida com cortes. Estes modelos ficaram de fora do estudo de Azzolin (2022) porém foram realizados por Milani (2019). A finalidade destas simulações visou ampliar as comparações entre modelos em escala reduzida para facilitar decisões nos futuros modelos em escala natural, como, por exemplo, a condição de contorno que melhor representa o ensaio experimental em cada caso, pois Azzolin (2019) concluiu que a melhor condição de contorno varia em função dos modelos. As simulações foram realizados de acordo com as propriedades e condições impostas por Azzolin (2022).

As simulações contemplaram paredes REF (sem cortes), I20, I30, I50, HS20 e HS50. Todos estes submetidos a carregamentos centrados e ensaiados com duas condições de contorno diferentes, sendo uma rotulada-rotulada e a outra rotulada-engastada. As condições rotuladas-rotuladas foram representadas nos resultados através da letra R enquanto que as condições rotuladas engastadas pela letra E.

Os resultados analisados foram as tensões máximas atingidas, curvas de tensão x deslocamento fora do plano, curvas de tensão x deformação específica e modos iniciais de fissuras.

As tensões máximas atingidas em modelos experimentais e numéricos são encontradas na Tabela 7.

Tabela 7 - Tensões máximas obtidas em escala reduzida.

Parede	Milani (2019)		Azzolin (2022)		Resultados	
	Experimental	Desvio padrão	Rot-Rot	Rot-Eng	Rot-Rot	Rot-Eng
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
<b>REF</b>	8,53	0,21	--	--	8,27	8,28
<b>H20</b>	4,8	0,40	4,57	5,19	--	--
<b>H30</b>	3,49	0,29	3,70	4,61	--	--
<b>H50</b>	2,58	0,24	1,63	2,84	--	--
<b>HS20</b>	--	--	--	--	4,67	4,77
<b>HS30</b>	4,12	0,23	3,85	4,19	--	--
<b>HS50</b>	--	--	--	--	1,88	1,93
<b>I20</b>	--	--	--	--	3,88	5,02
<b>I30</b>	5	0,44	3,32	4,42	3,44	4,81
<b>I50</b>	3,45	0,17	1,89	2,65	2,1	3,03

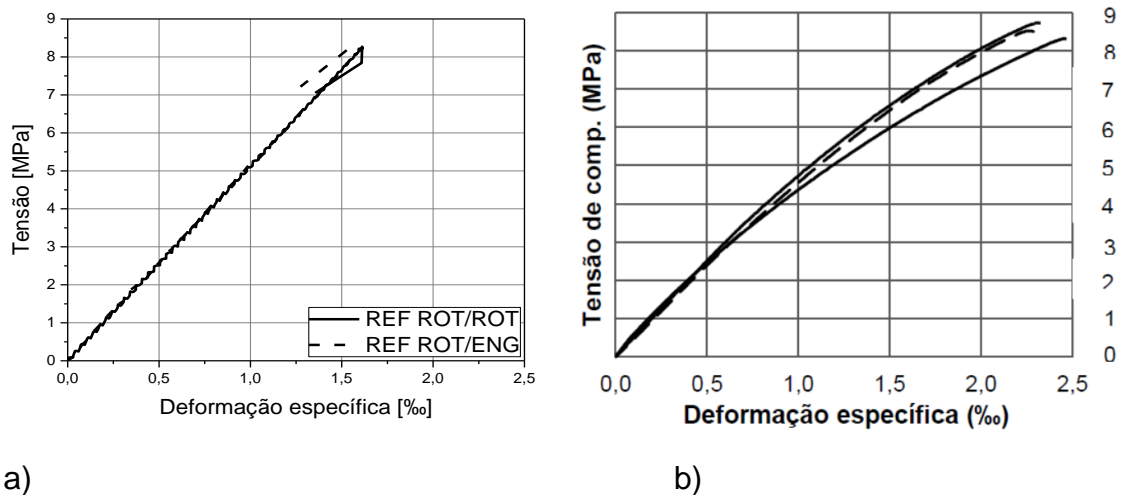
Fonte: Autoria própria.

A seguir, serão mostradas as curvas de tensão x deformação específica, tensão x deslocamento fora do plano e imagens referentes aos modos iniciais de fissuras em cada modelo.

- **Paredes Referência**

Na Figura 14 são comparados os resultados das deformações específicas em função da tensão das simulações numéricas e ensaios experimentais em escala reduzida, apresentadas as condições de contorno rotulado/ rotulado (R) e rotulado/ engastado (E).

Figura 14 - Tensão x deformação específica a) numérico Ref. ; b) experimental Ref. Milani (2019).



Fonte: Autoria própria.

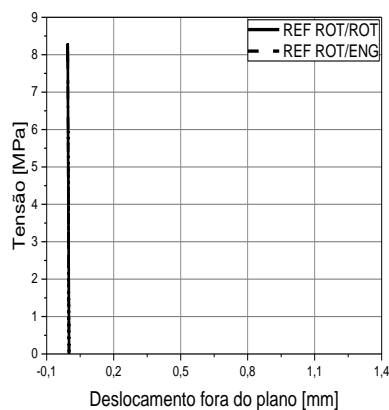
Os modelos numéricos R e E atingiram tensões próximas entre eles, sendo elas 8,27 e 8,28 MPa respectivamente. O modelo experimental atingiu  $8,53 \pm 0,21$  MPa. Nas tensões máximas atingidas, distanciaram-se 0,05 MPa e 0,05 MPa abaixo do desvio padrão experimental respectivamente entre os modelos R e E.

Em comparação com o experimental, nota-se semelhança entre os inícios das curvas, porém, ao longo da simulação o modelo numérico não apresenta perda de linearidade da mesma forma que o experimental. Cabe salientar que no modelo numérico não foi implementado aleatoriedade nas propriedades do material sendo sempre linear elástico e sem danos até a carga máxima (ver a Figura 2 da lei constitutiva). Colocando aleatoriedade nas propriedades dos blocos cerâmicos e/ou da argamassa se pode conseguir esta resposta não linear. Porém não tem medições disponíveis para descrever a forma do campo aleatório e seu comprimento de correlação, motivo pelo qual se optou por um modelo mais simples como o adotado.

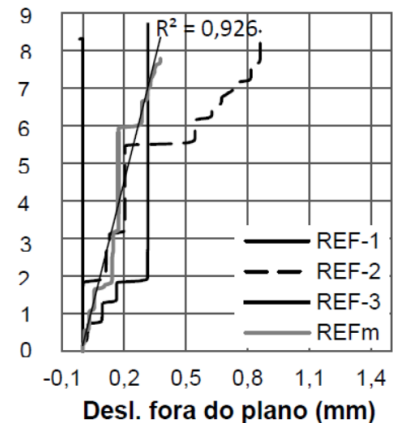
Caso contrário, seria necessário agregar um aumento significativo de simulações para ajustar os parâmetros.

Os resultados dos deslocamentos fora do plano em função das tensões dos modelos referência simulados estão indicados na Figura 15a. Na figura 15b se mostram os resultados experimentais de Milani (2019). Ele ensaiou 3 paredes referência, sendo elas, REF-1, REF-2 e REF-3, após, fez a média dos deslocamentos e acrescentou a curva REFm.

Figura 15 - Tensão x deslocamento fora do plano a) numérico; b) experimental.



a)



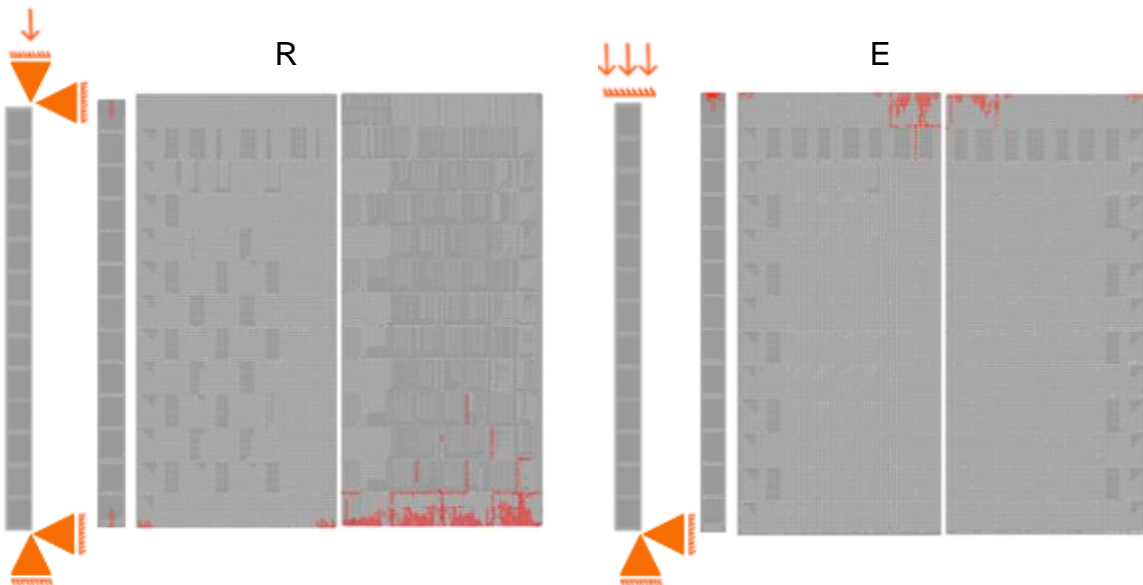
b)

Fonte: Autoria própria.

A curva encontrada através da simulação numérica se assemelha apenas à curva REF-1, esquerda do gráfico, próximo a uma reta. Entende-se que as demais curvas experimentais tenham sofrido influência de excentricidades devidas às imperfeições construtivas e/ou do ensaio. No modelo numérico e ideal, não apresentando nenhum tipo de excentricidade no carregamento nem imperfeições na geometria.

Na Figura 16 estão as configurações fissuradas, ou modos de falha, dos respectivos modelos das paredes referência numérico.

Figura 16 - Modos de falha paredes Ref. numérico.



Fonte: Autoria própria.

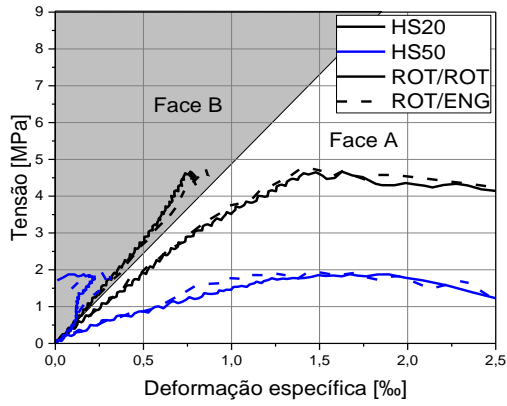
As fissuras no modelo R começaram a surgir na parte inferior da parede, no modelo E as fissuras começaram a surgir na parte superior.

Quando comparadas com os modelos experimentais de Milani (2019, notou-se este mesmo comportamento nos modelos REF-1 e REF-3, respectivamente.

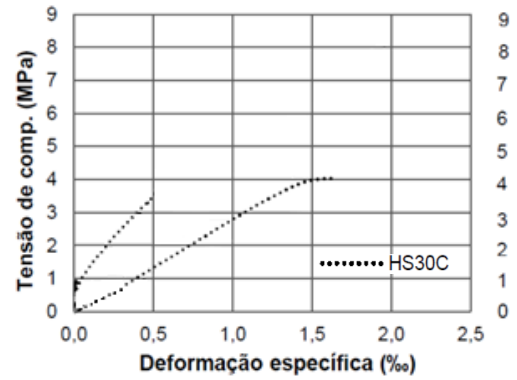
- **Paredes HS20 e HS50**

A Figura 17 compara os resultados das deformações específicas em função da tensão das simulações numéricas e ensaios experimentais em escala reduzida. Na Figura 17a, a face A é relacionada com a face onde foi realizado o corte, enquanto a face B é relacionada a face que permaneceu íntegra.

Figura 17 - Tensão x deformação específica a) numérico HS20 e HS50 b) HS30 Milani (2019).



a)



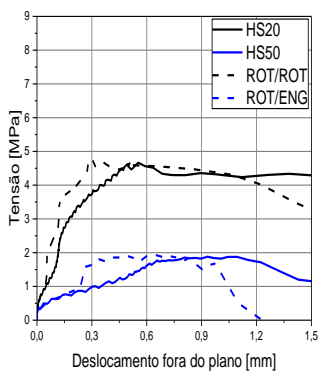
b)

Fonte: Autoria própria.

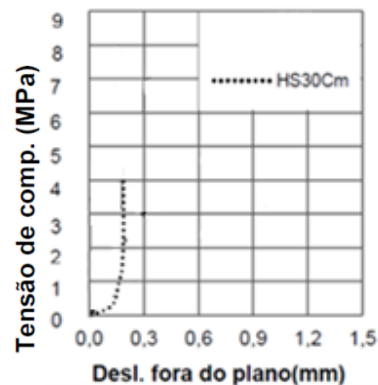
Neste caso, não foi possível a comparação direta entre modelos semelhantes, porém, observou-se que a curva experimental do modelo HS30 encontra-se abaixo da numérica HS20 e acima da numérica HS50, com uma inclinação semelhante e, tensão máxima condizente com o esperado, pois uma maior profundidade de corte diminui a tensão máxima suportada.

Os resultados dos deslocamentos fora do plano em função das tensões dos modelos da Figura 17 estão indicados na Figura 18.

Figura 18 - Tensão x deslocamento fora do plano a) numérico HS20 e HS50; b) experimental Milani (2019).



a)



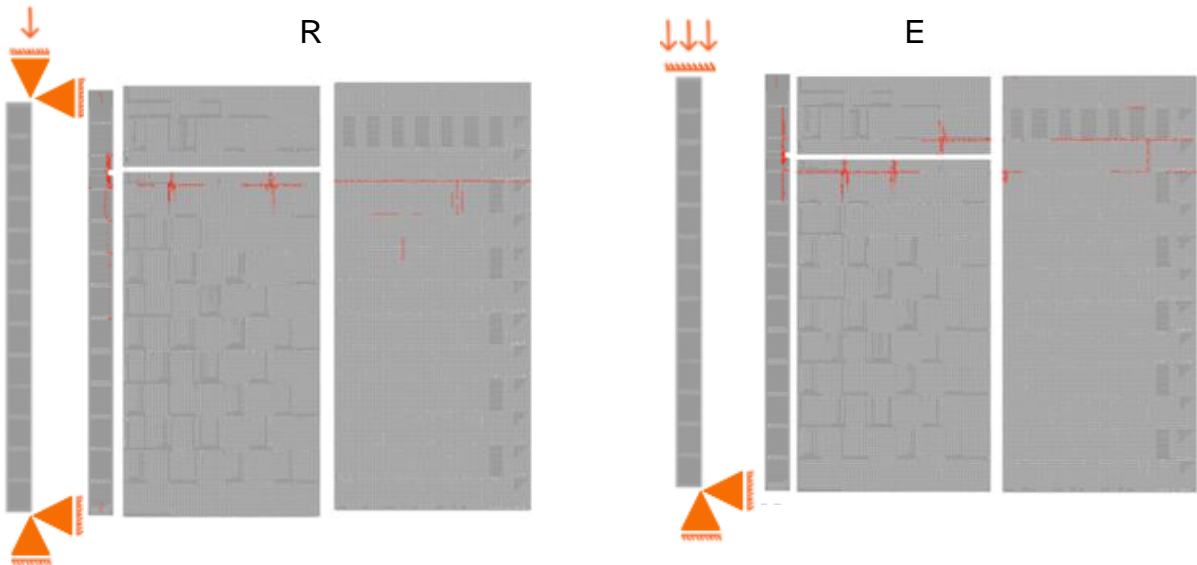
b)

Fonte: Autoria própria.

Oscilações observadas nas curvas da Figura 18a podem ser associadas a velocidade com que os carregamentos foram aplicados na simulação numérica.

A Figura 18 demonstra os modos de falha dos respectivos modelos numéricos.

Figura 19 - Modos de falha paredes HS20 numérico.



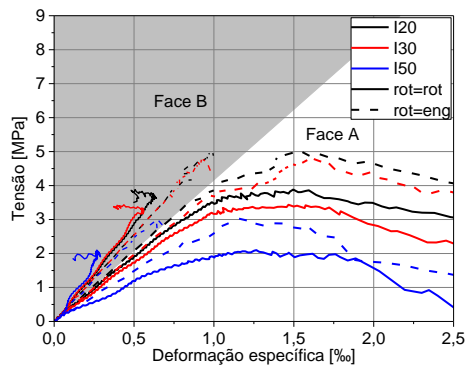
Fonte: Autoria própria.

Em ambos os modelos as fissuras tiveram início na parte superior das paredes, mais precisamente na região da argamassa abaixo dos recortes. Comparações feitas com os modelos experimentais comprovam que os modos de falha foram equivalentes entre o modelo numérico e experimental de Milani (2019).

- **Paredes I20, I30 e I50**

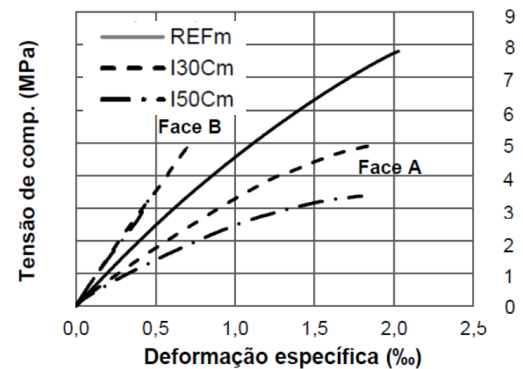
Na Figura 20 são comparados os resultados das deformações específicas em função da tensão das simulações numéricas e ensaios experimentais em escala reduzida.

Figura 20 - Tensão x deformação específica a) numérico I20, I30, I50 e b) experimental Milani I30 e I50 (2019).



a)

Fonte: Autoria própria.



b)

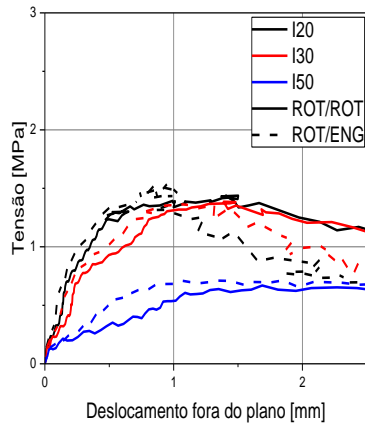
Analisando os resultados através da Figura 20, comparando diretamente as curvas dos modelos I30 e I50 numérico e experimental. Conclui-se que, como esperado, o modelo I20 numérico atingiu uma tensão máxima superior aos demais modelos sendo o I20 E 5,02 MPa e I20 R 3,88 MPa.

Na comparação entre o modelo I30 E e o modelo I30 experimental, nota-se que a tensão máxima se encontra dentro do desvio padrão encontrado por Milani (2019), o modelo numérico resistiu 4,81 MPa enquanto que o experimental suportou 5 MPa, com um desvio padrão de 0,438 MPa. O modelo I30 R apresentou uma resistência de 3,44 MPa, 1,12 MPa abaixo do desvio padrão do modelo.

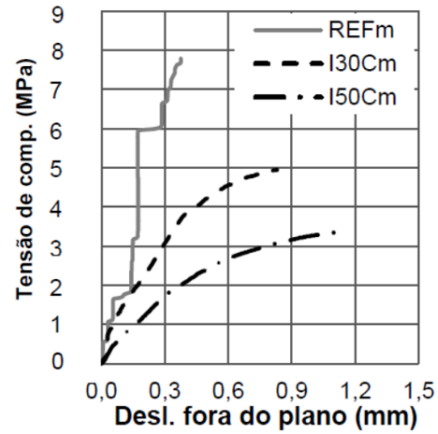
O modelo I50 E com sua tensão máxima atingindo 3,03 MPa chegou mais próximo do resultado I50 experimental de 3,45, porém 0,247 MPa abaixo do desvio padrão que é de 0,173 MPa. O modelo I50 R suportou apenas 2,1 MPa, ficando 1,18 MPa abaixo do desvio padrão do modelo.

Os resultados dos deslocamentos fora do plano em função das tensões dos modelos da Figura 20 estão indicados na Figura 21.

Figura 21 - Tensão x deslocamento fora do plano a) numérico I20, I30 e I50; b) experimental I30 e I50 Milani (2019)



a)



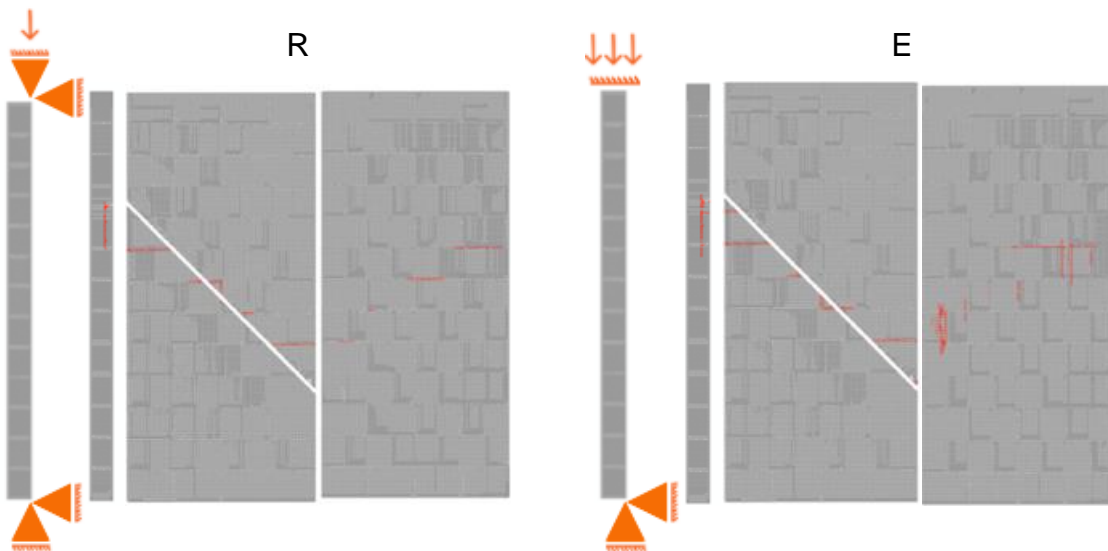
b)

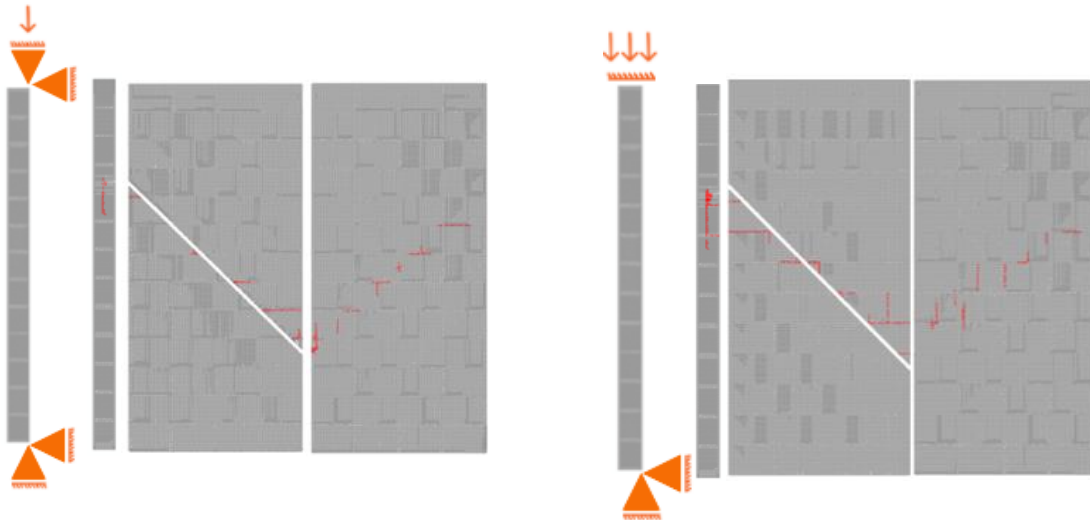
Fonte: Autoria própria.

Novamente, percebe-se oscilações nas curvas dos modelos numéricos que podem ser associadas à velocidade do carregamento definida.

Na Figura 22 estão os modos de falha dos respectivos modelos.

Figura 22 - Modos de falha paredes I30 e I50 numérico.



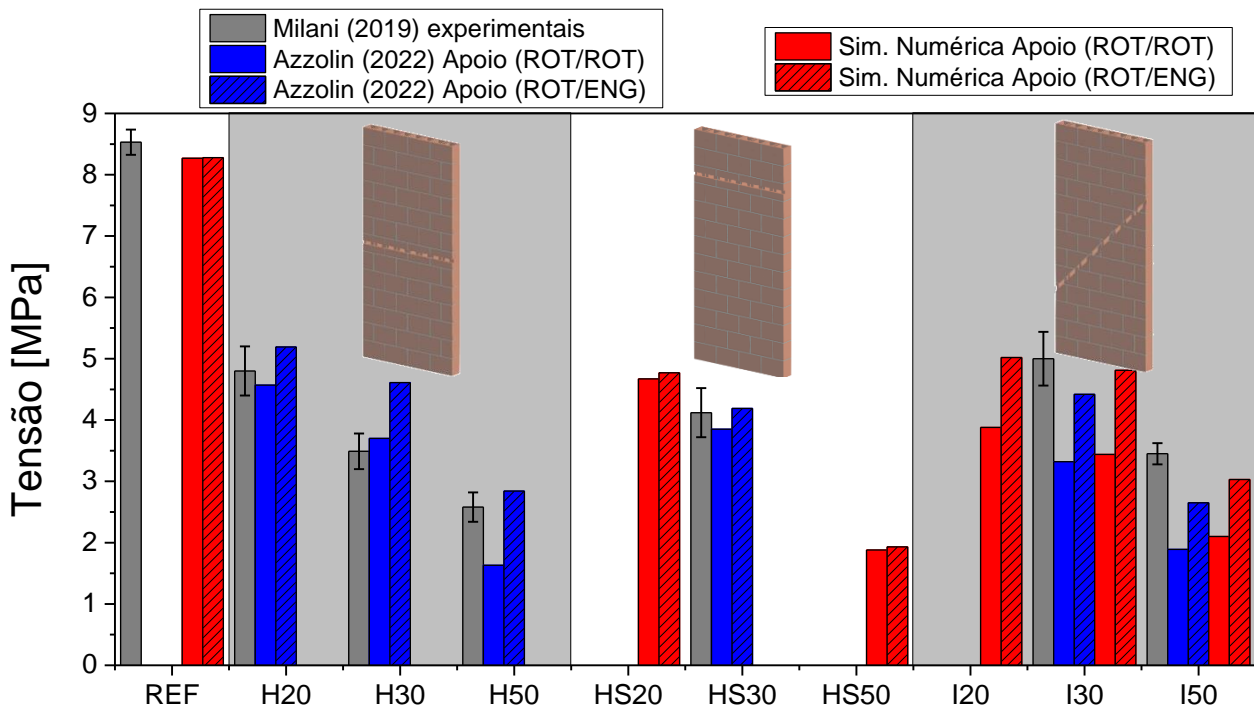


Fonte: Autoria própria.

Assim como no caso HS, em todos os cortes I as fissuras se deram ao longo da região do recorte, se expandindo através da argamassa. Mais uma vez, se assemelhando ao comportamento dos modelos experimentais de Milani (2019).

Analisando a Figura 23 é possível observar a comparação de tensões máximas entre os modelos experimentais e numéricos com seus respectivos desvios, acima de cada modelo está representada a configuração de recorte.

Figura 23 - Comparações de tensões máximas entre modelos com desvios padrão experimentais expressos.



Fonte: Autoria própria.

Observando a Figura 23, nota-se que a maioria das tensões máximas encontradas para os modelos numéricos estão dentro ou próximas dos desvios padrões das tensões máximas experimentais.

#### 4.2 Escala Natural (1:1)

Na sequência, serão apresentados os resultados obtidos nas simulações de modelos submetidos a compressão de paredes em escala natural com cortes. Os modelos ensaiados contemplaram paredes REF (sem cortes), H20, H30, H50, HS20, HS30, HS50, I20, I30 e I50. Todos estes submetidos a carregamentos centrados e ensaiados com duas condições de contorno diferentes, sendo uma rotulada-rotulada e a outra rotulada engastada. As condições rotuladas-rotuladas foram representadas nos resultados através da letra R enquanto que as condições rotuladas engastadas pela letra E.

Os resultados analisados foram os mesmos das paredes com cortes em escala reduzida.

As tensões máximas atingidas em modelos numéricos em escala natural são encontradas na Tabela 8.

Tabela 8 - Tensões máximas obtidas em escala natural.

<b>Parede</b>	<b>Rot-Rot [MPa]</b>	<b>Rot-Eng [MPa]</b>
<b>REF</b>	2,11	2,14
<b>H20</b>	1,66	1,66
<b>H30</b>	1,47	1,49
<b>H50</b>	0,73	0,81
<b>HS20</b>	1,62	1,64
<b>HS30</b>	1,53	1,49
<b>HS50</b>	0,72	0,75
<b>I20</b>	1,44	1,55
<b>I30</b>	1,39	1,38
<b>I50</b>	0,67	0,71

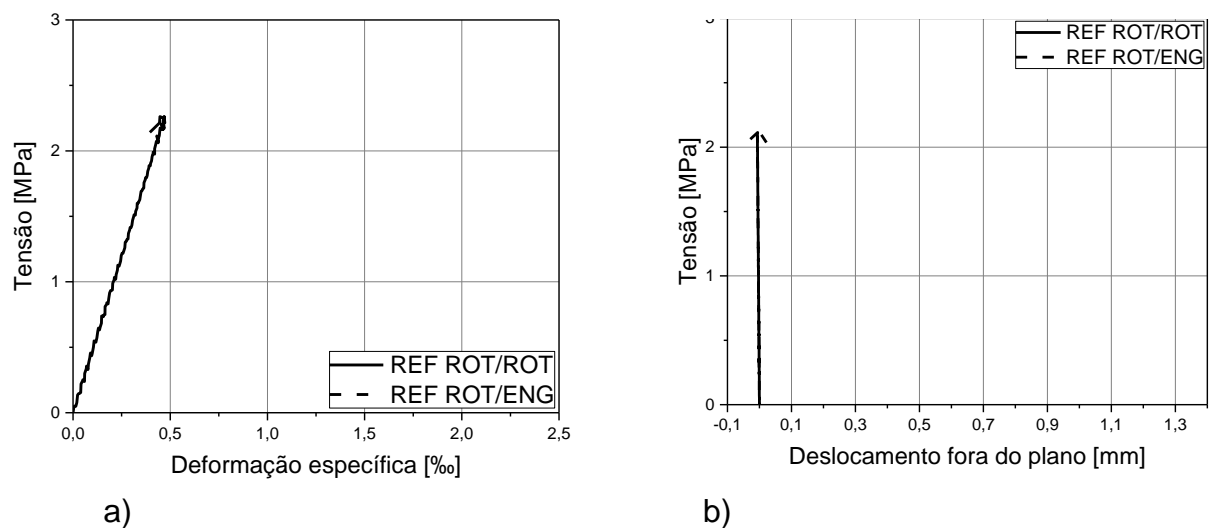
Fonte: Autoria própria.

De mesma forma que em paredes com escala reduzida, serão mostradas as curvas de tensão x deformação específica, tensão x deslocamento fora do plano e imagens referentes aos modos iniciais de fissuras em cada modelo.

- **Paredes Referência.**

A Figura 24a compara os resultados das deformações específicas em função da tensão das simulações numéricas enquanto que a Figura 24b compara os resultados dos deslocamentos fora do plano em função das tensões, ambos em escala natural, apresentadas as condições de contorno rotulado-rotulado (R) e rotulado-engastado (E).

Figura 24 - Tensão x a) deformação específica; b) Deslocamento fora do plano.

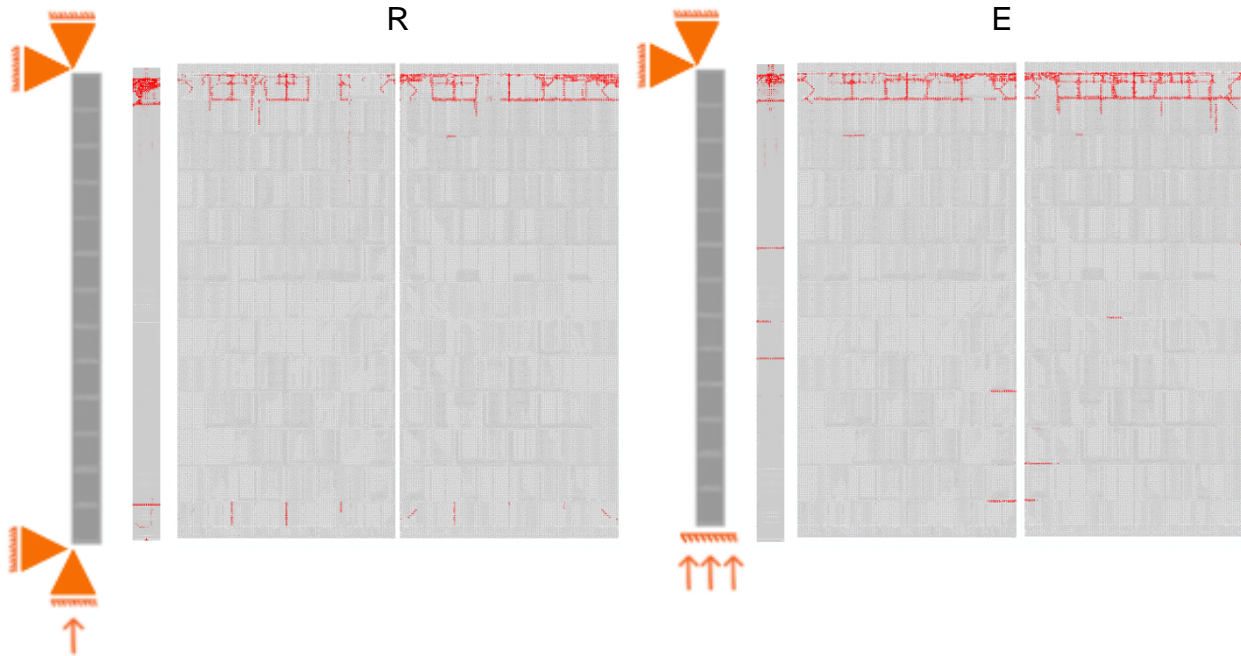


Fonte: Autoria própria.

Os modelos R e E atingiram respectivamente tensões máximas de 2,11 MPa e 2,14 MPa. Como ressaltado anteriormente, as curvas não apresentam influência de excentricidades devidas às imperfeições construtivas e/ou do ensaio. O modelo numérico é ideal, não apresentando nenhum tipo de excentricidade no carregamento nem imperfeições na geometria.

A Figura 25 demonstra os modos de falha dos modelos citados acima.

Figura 25 - Modos de falha paredes Referência numérico.



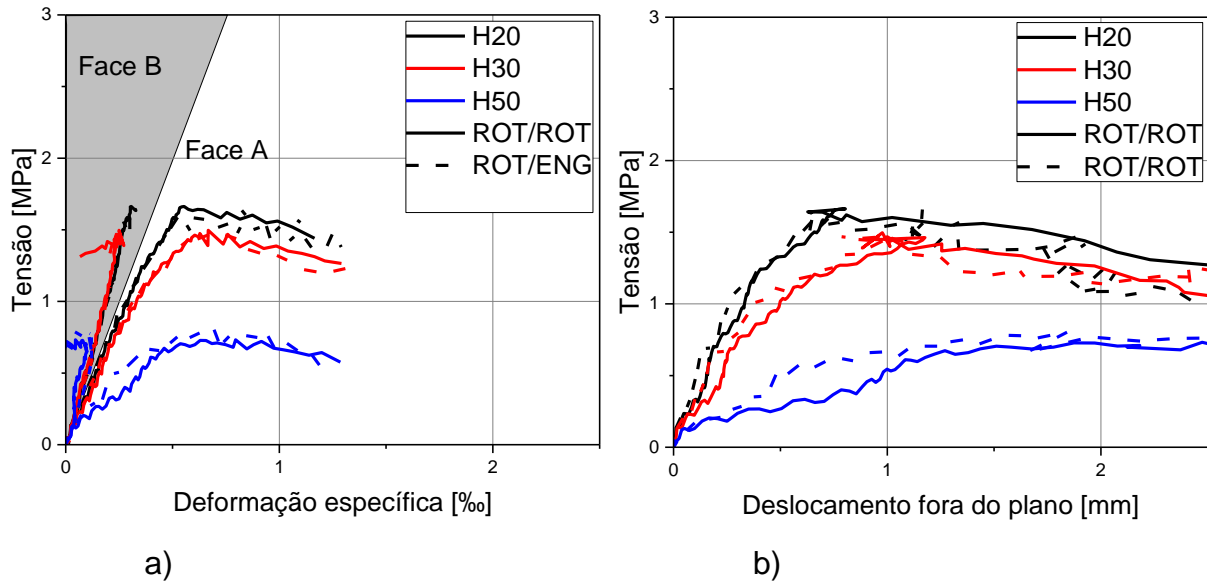
Fonte: Autoria própria.

Os modelos R e E não apresentaram grandes diferenças entre si nos modos de ruptura, em ambos as fissuras começaram pela parte superior das paredes.

- **Paredes H20, H30 e H50**

Na Figura 26a é feita a comparação entre os resultados das deformações específicas em função da tensão das simulações numéricas enquanto que a Figura 26b compara os resultados dos deslocamentos fora do plano em função das tensões, ambos em escala natural.

Figura 26 - Tensão x a) deformação específica; b) Deslocamento fora do plano.

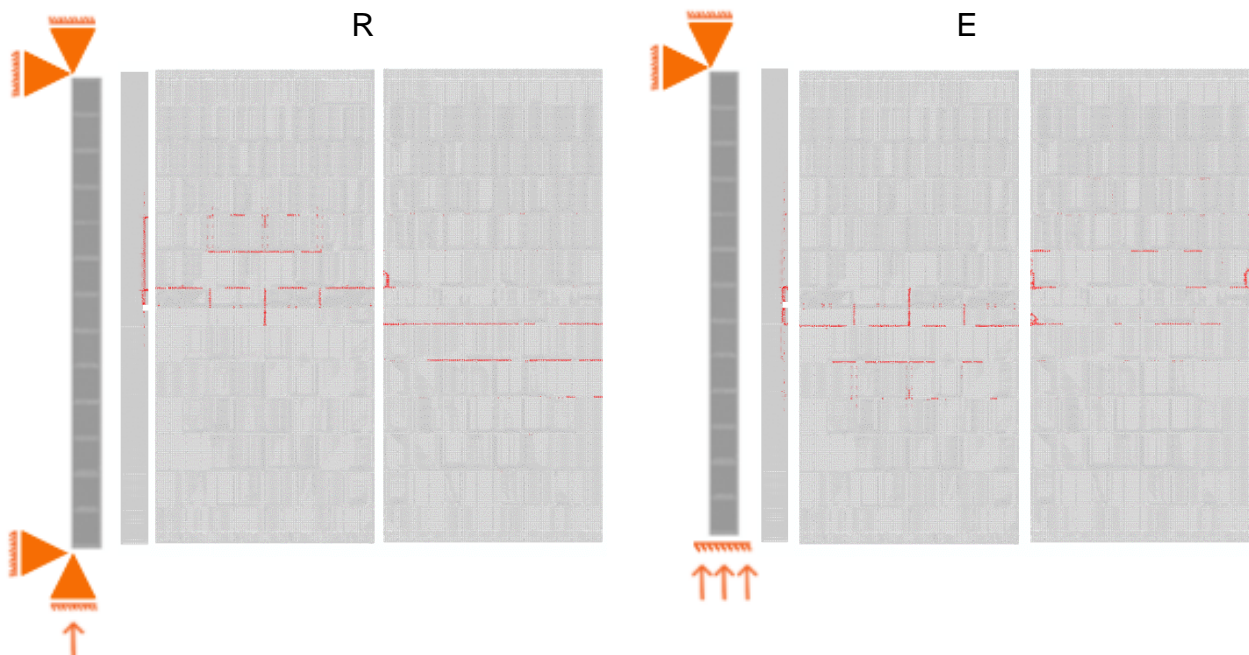


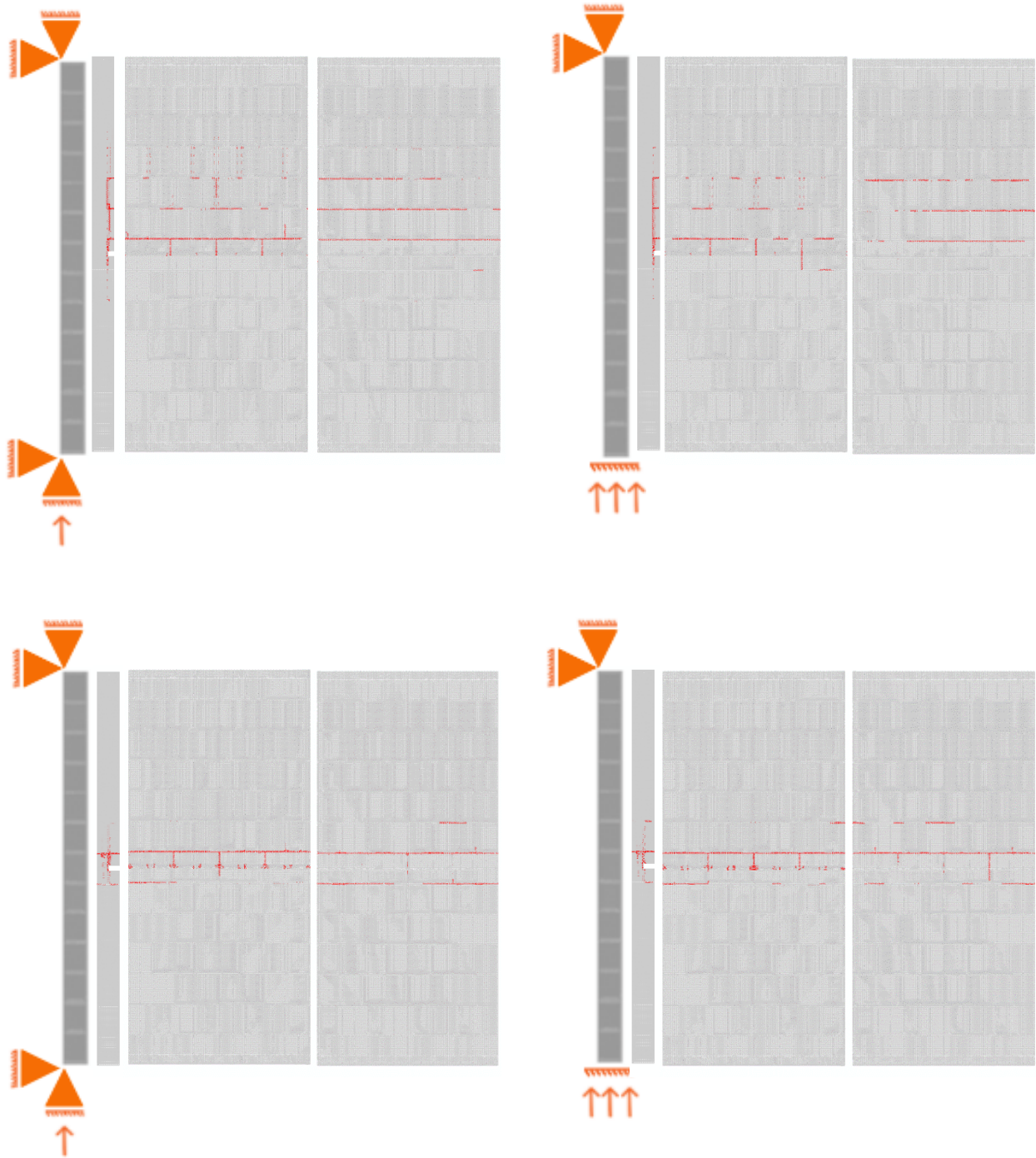
Fonte: Autoria própria.

Os modelos R e E H20 atingiram tensões máximas de 1,66 MPa. Os modelos R e E H30, respectivamente 1,47 MPa e 1,49 MPa e por fim os modelos R e E H50 0,73 MPa e 0,81 MPa. Seguiram o mesmo padrão que os demais modelos, quanto maior a profundidade do corte, menor a tensão máxima atingida.

Na Figura 27 é demonstrado os modos de falha dos modelos.

Figura 27 - Modos de falha paredes H20, H30 e H50 numérico.





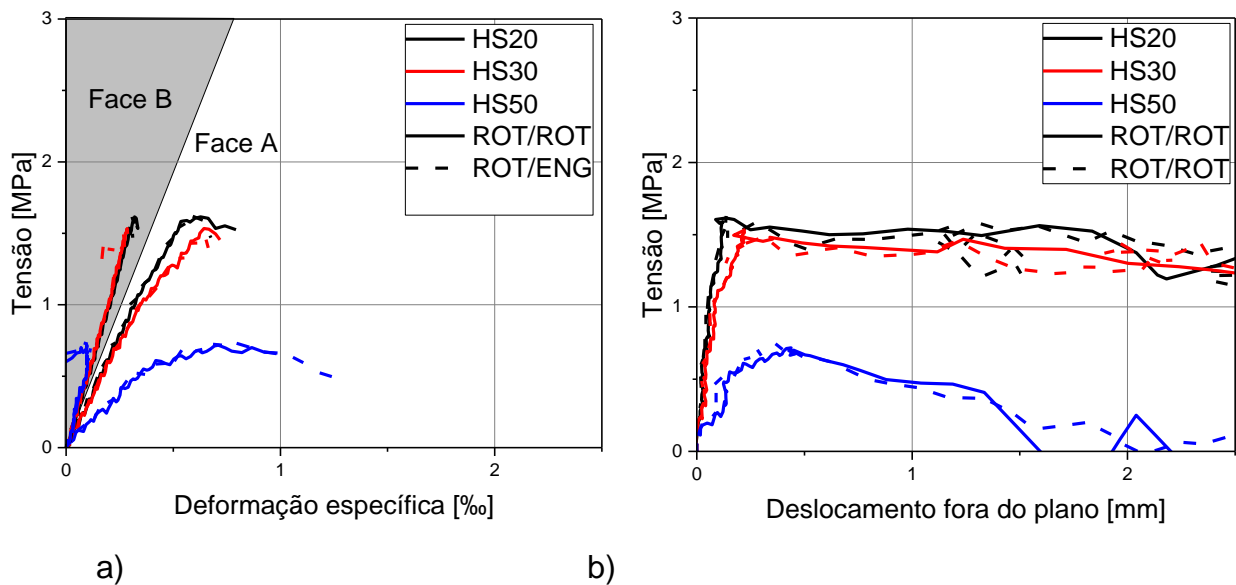
Fonte: Autoria própria.

Assim como esperado, em todos os casos deste modelo as fissuras tiveram início na seção onde foi executado o recorte, propagando-se através da argamassa. Quando comparado ao modelo experimental em escala reduzida, observou-se o mesmo comportamento.

- **Paredes HS20, HS30 e HS50**

Na Figura 28a é feita a comparação entre os resultados das deformações específicas em função da tensão das simulações numéricas enquanto que a Figura 28b compara os resultados dos deslocamentos fora do plano em função das tensões.

Figura 28 - Tensão x a) deformação específica; b) Deslocamento fora do plano.

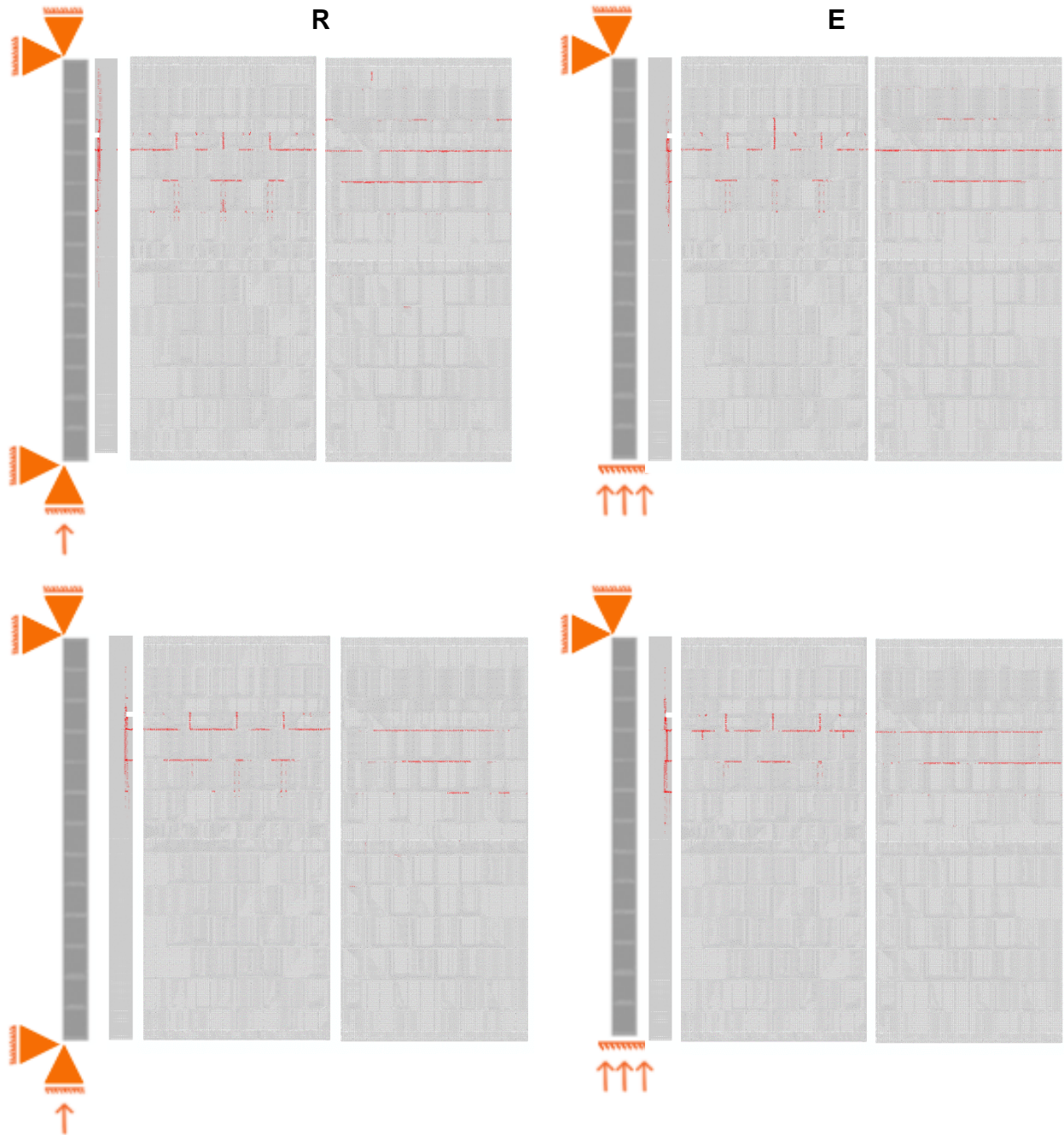


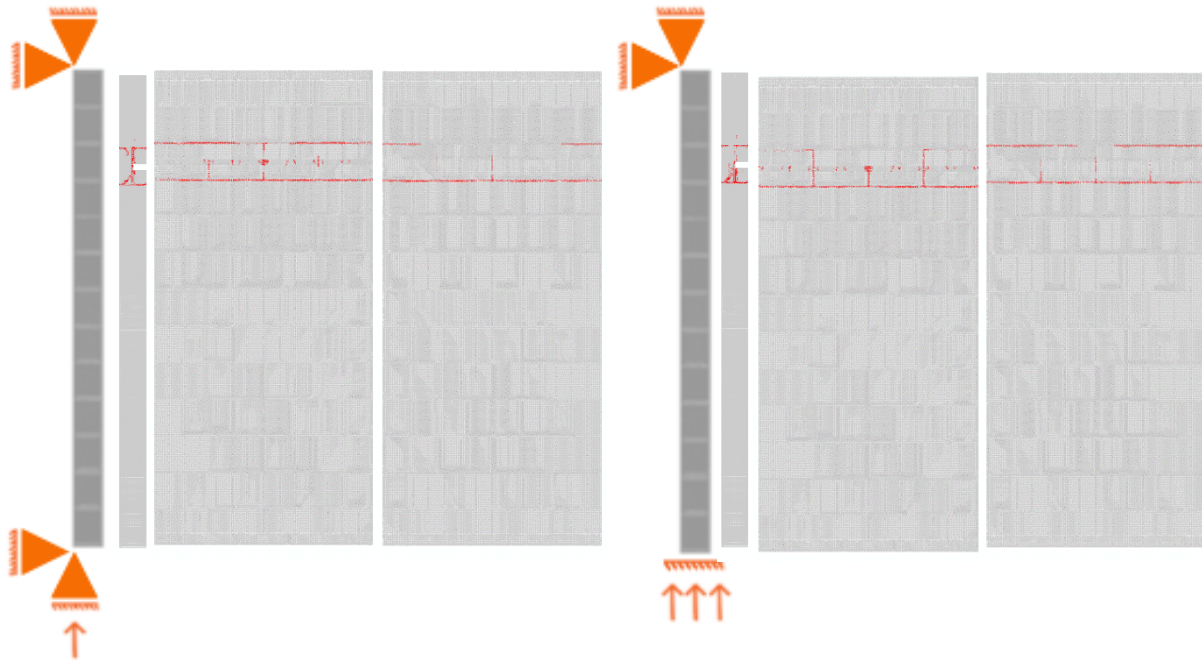
Fonte: Autoria própria.

Os modelos R e E HS20 atingiram tensões máximas de 1,62 MPa e 1,64 MPa. Os modelos R e E HS30, respectivamente 1,53 MPa e 1,49 MPa e por fim os modelos R e E HS50 0,72 MPa e 0,75 MPa. Mantendo o comportamento onde quanto maior a profundidade dos cortes, menor a tensão máxima atingida.

Na Figura 29 encontram-se os modos de falha dos modelos.

Figura 29 - Modos de falha paredes HS20, HS30 e HS50 numérico.





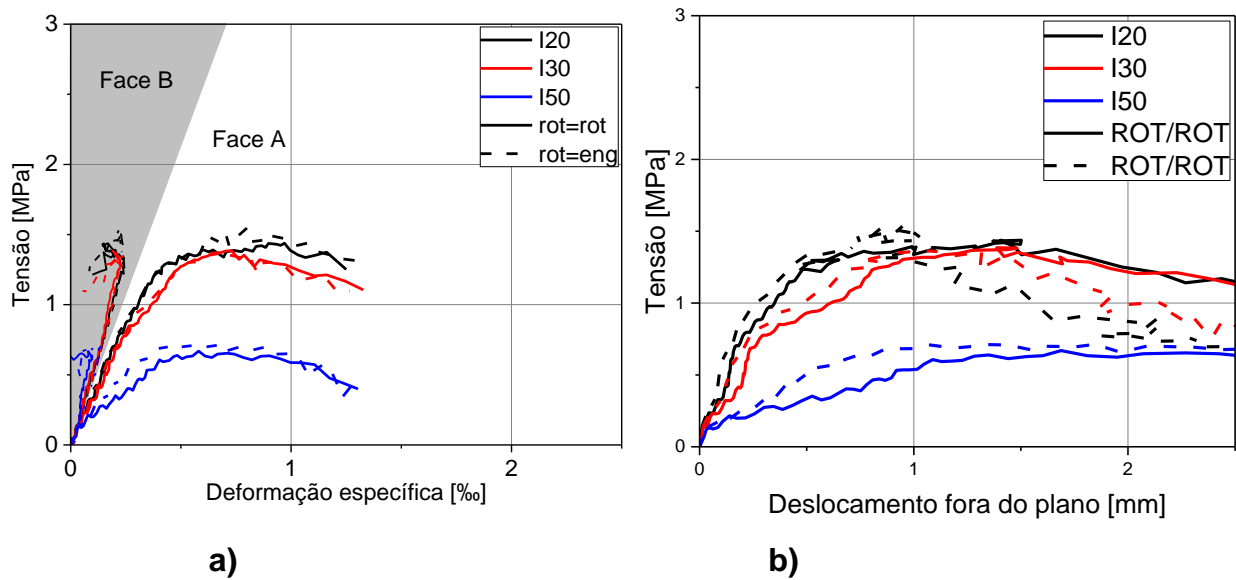
Fonte: Autoria própria.

Não ocorreu diferenças significativas nos modos de falha entre os modelos R e E, em ambos as fissuras novamente começaram nas regiões dos recortes, expandindo-se através da argamassa desta região, de mesmo modo que nos modelos numéricos em escala reduzida e experimental de Milani (2019).

- **Paredes I20, I30 e I50**

Na Figura 30a é feita a comparação entre os resultados das deformações específicas em função da tensão das simulações numéricas enquanto que a Figura 30b compara os resultados dos deslocamentos fora do plano em função das tensões.

Figura 30 - Tensão x a) deformação específica; b) Deslocamento fora do plano.

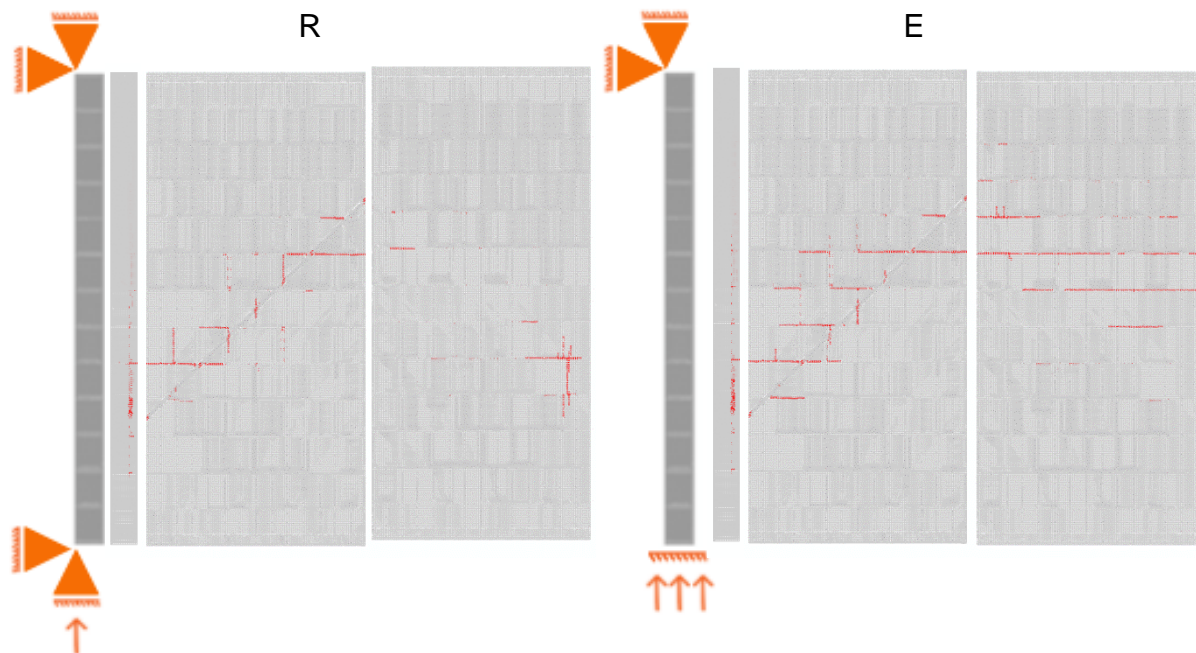


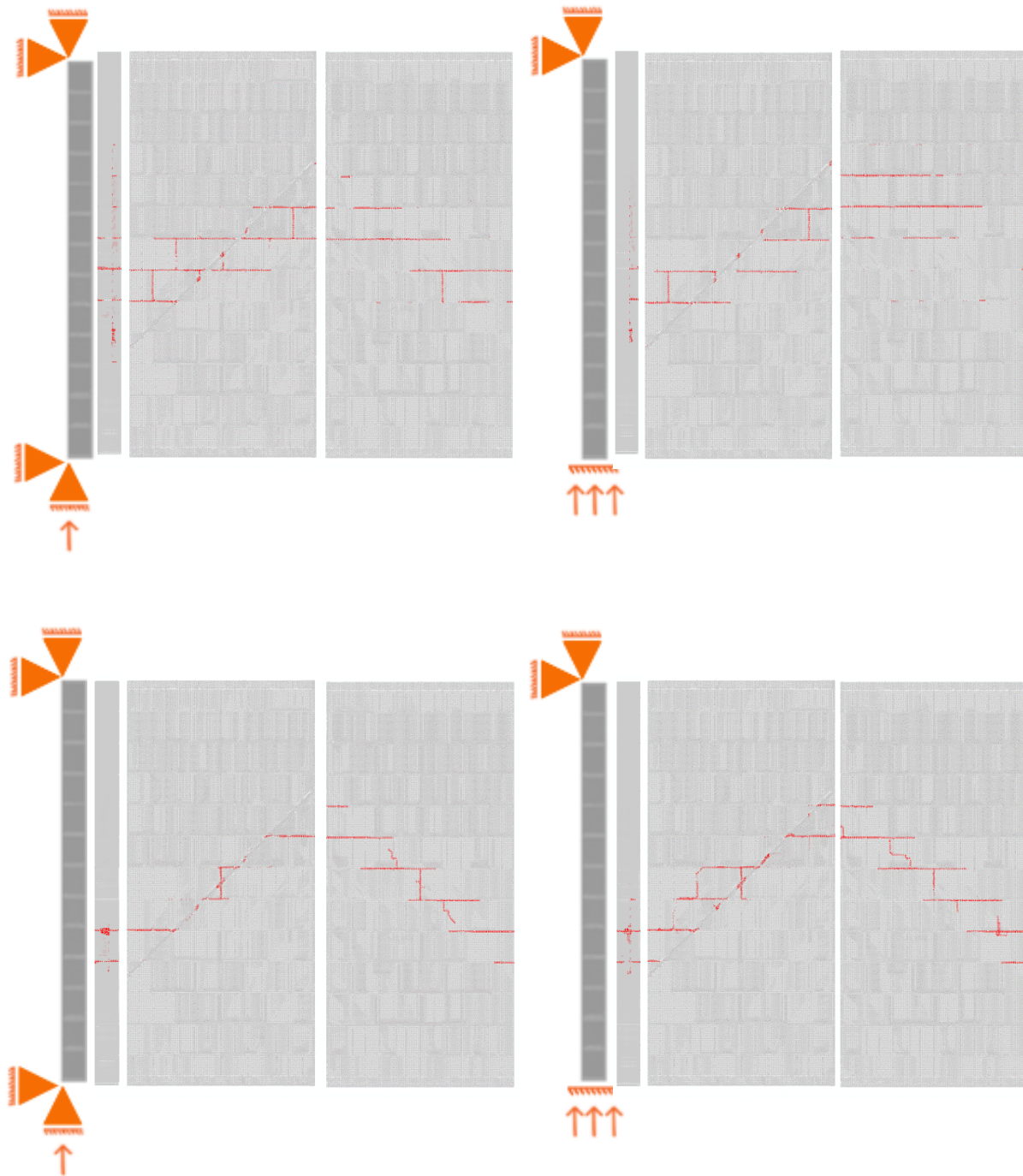
Fonte: Autoria própria.

Os modelos R e E I20 atingiram tensões máximas de 1,44 MPa e 1,55 MPa. Os modelos R e E I30, respectivamente 1,39 MPa e 1,38 MPa e por fim os modelos R e E I50 0,67 MPa e 0,71 MPa.

Na Figura 31 encontram-se os modos de falha dos modelos.

Figura 31 - Modos de falha paredes I20, I30 e I50 numérico.



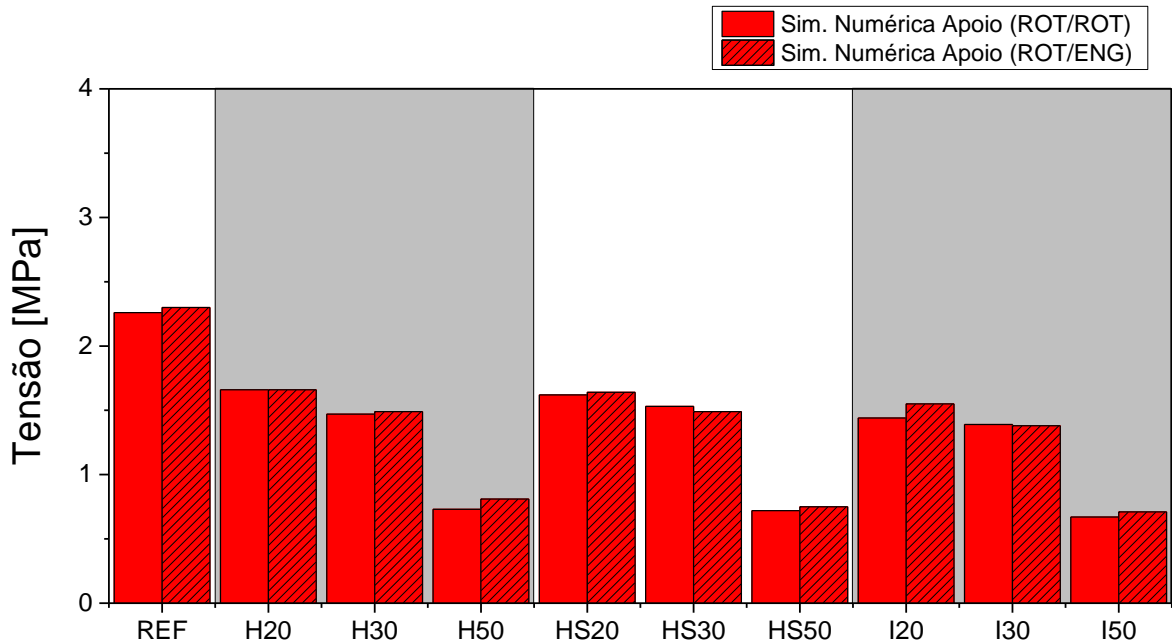


Fonte: Autoria própria.

Os modos de falha dos modelos, de mesma forma que os demais anteriores, tiveram começo nas regiões dos recortes. Apresentando semelhança com os modelos numéricos em escala reduzida e experimental em escala reduzida de Milani (2019).

Na Figura 32, é possível analisar a comparação entre tensões máximas dos modelos numéricos em escala natural.

Figura 32 - Comparações entre tensões máximas dos modelos numéricos em escala natural.



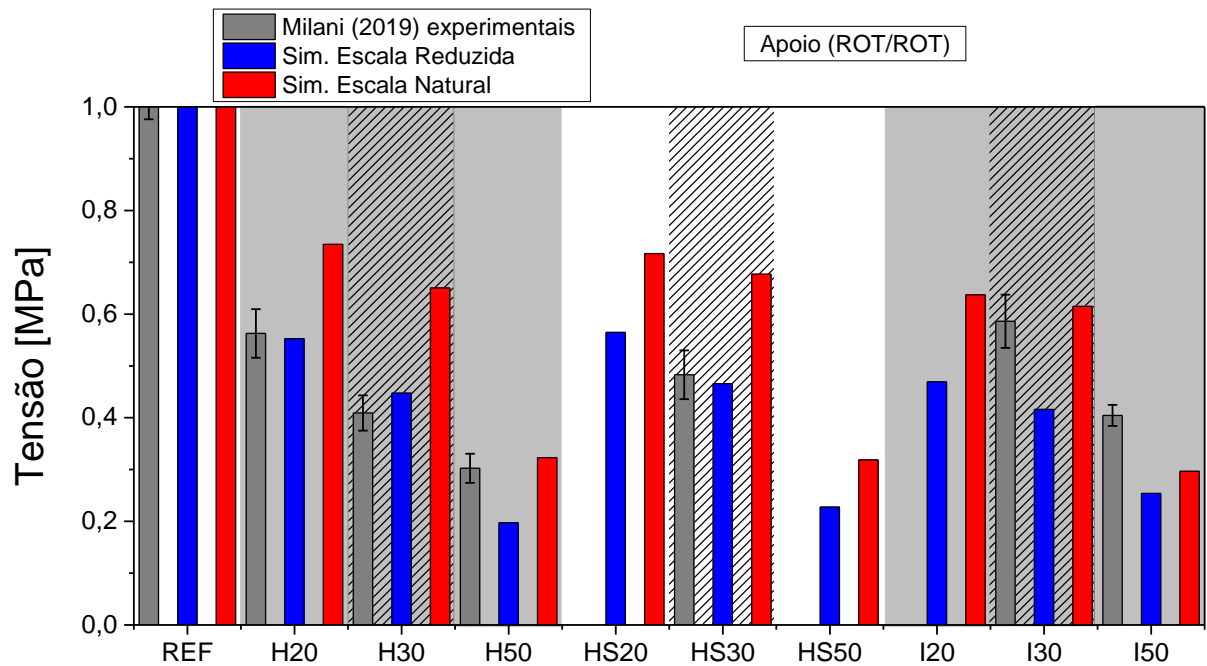
Fonte: Autoria própria.

Após análise da Figura 32, observa-se que, de mesma forma que modelos em escala reduzida, quanto maior a profundidade do corte menor foi a tensão máxima atingida.

#### 4.3 Comparação normalizada entre escalas

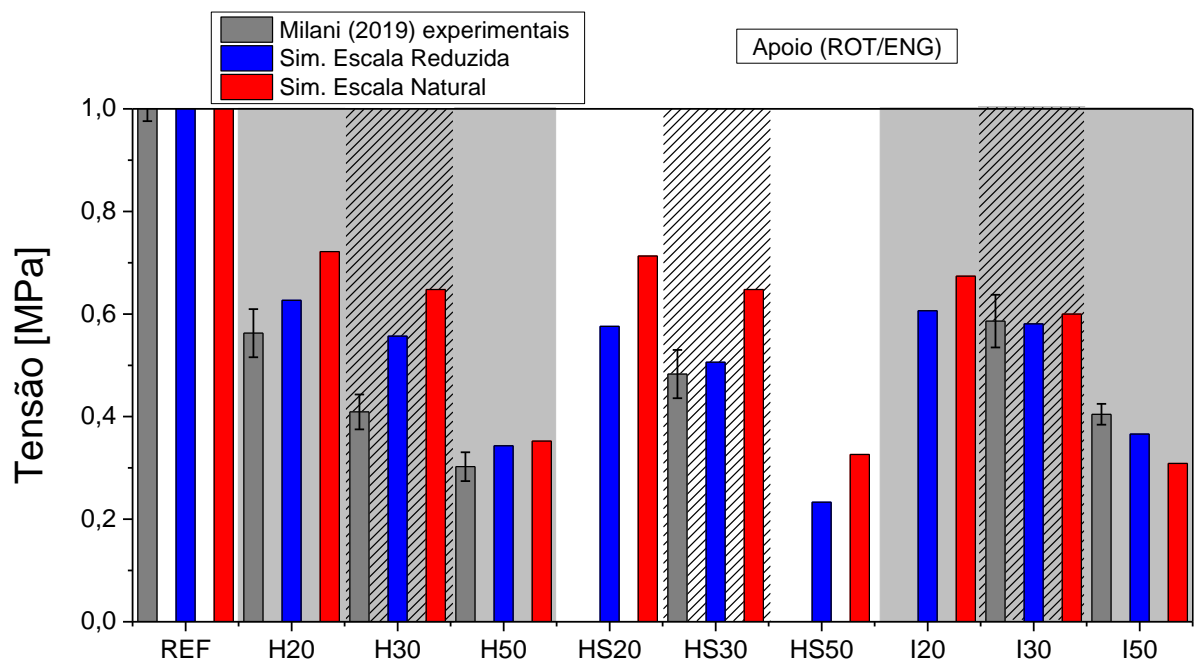
Serão comparadas as tensões máximas atingidas entre modelos experimentais e numéricos, em escala reduzida (1:5) e natural (1:1). Para normalizar os valores, as tensões máximas das paredes Ref. em ambas as escalas foram adotadas como valor máximo 1, possibilitando desta forma a comparação da variação de tensão em função da mudança de escala. Na Figura 33, é feita a comparação entre os modelos citados com os numéricos apresentando as condições de contorno ROT-ROT, enquanto que a Figura 34 com os modelos numéricos ROT-ENG.

Figura 33 - Tensões máximas atingidas entre modelos experimentais e numéricos (ROT-ROT), em escala reduzida (1:5) e natural (1:1).



Fonte: Autoria própria.

Figura 34 - Tensões máximas atingidas entre modelos experimentais e numéricos (ROT-EG), em escala reduzida (1:5) e natural (1:1).



Fonte: Autoria própria.

Observando as Figuras 33 e 34, nota-se que que seguem o mesmo padrão, onde os modelos em escala natural atingiram tensões máximas maiores que os modelos experimentais, exceto, no modelo I50.

Também se observou que, como relatado anteriormente, conforme maior a profundidade do recorte, menor a tensão máxima atingida.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A seguir, primeiramente serão apresentadas as conclusões e considerações finais para os modelos em escala reduzida (1:5) e escala natural (1:1) e por fim, serão ressaltados alguns pontos importantes identificados sobre o assunto deste trabalho em conjunto com as sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1 ESCALA REDUZIDA (1:5)

Ao fim, foi possível concluir que, segundo os resultados analisados para escala reduzida, os modelos que apresentaram resultados mais aproximados do experimental utilizaram as seguintes condições de contorno, encontradas na Tabela 9.

Tabela 9 - Condições de contorno ideais para modelos ensaiados em escala reduzida.

Parede	Condição de contorno mais adequada
REF	ROT/ENG
I30	ROT/ENG
I50	ROT/ENG
HS30	Ambos os modelos dentro do desvio padrão

Fonte: Autoria própria.

Também se concluiu que de acordo com os resultados analisados na Figura 23, a maioria das tensões máximas dos modelos se encontram dentro das regiões delimitadas através dos respectivos desvios padrão, e, as que não estão, estão bem próximas.

Em todos os casos os modelos E atingiram tensões maiores que os modelos R.

Referente aos modos de falha, são equivalentes entre modelos experimentais e numéricos em escala reduzida (1:5), onde as fissuras em todos os modelos começam nas regiões dos cortes e se expandem através de argamassa.

## **5.2 ESCALA NATURAL (1:1)**

De acordo com os resultados para escala natural, observou-se que, nem todos os modelos E atingiram tensões máximas maiores que os modelos R, isso pode ter ocorrido em função de que foi necessário definir uma velocidade de aplicação do carregamento adequada para a realização das simulações, adequada ao ponto de equilíbrio entre tempo necessário para concluir a simulação e obtendo o mínimo possível de oscilações nas curvas tensão x deslocamento fora do plano e tensão x deformação. Uma velocidade de aplicação do carregamento menor que 0.025 [m/s] resolveria este detalhe, pois, quanto menor a velocidade definida, menor são as oscilações nas curvas, porém, aumentaria o tempo até a conclusão da simulação. Em alguns casos as paredes atingiram o pico máximo de tensões e, após, as curvas seguiram em uma crescente por mais alguns instantes, passando uma falsa impressão que ainda não teria atingido o pico de tensão máximo.

Em relação aos cortes, como esperado, com o aumento da profundidade dos mesmos a resistência das paredes reduzem.

Através das análises dos modos de falha, principalmente das paredes referência, a similaridade encontrada entre os modelos R e E diferem das fissuras encontradas em escala reduzida, uma possível hipótese é que, o modo como as condições de contorno foram adotadas interferiram, pois foram definidas na parte superior das paredes como rotulada e na parte inferior variando entre rotulada e engastada, se fosse realizado o inverso, variando as condições de contorno superior, talvez ocorresse a diferença visível em escala reduzida. Mas ainda assim, nos demais modelos foi possível concluir que são semelhantes, em ambas as escalas e modelos, as fissuras iniciam na região onde foram executados os recortes e se expandem através da argamassa, de mesma forma que observado em modelos experimentais e numéricos em escala reduzida (1:5).

### 5.3 TRABALHOS FUTUROS

Antes de citar algumas sugestões, é importante ressaltar que, é de complexa elaboração a replicação das condições de contorno nestas simulações, pois os mesmos nunca serão perfeitamente rotulado-rotulado ou rotulado-engastado, e como pode ser observado nos resultados deste trabalho, este detalhe implica em grandes variações nos resultados.

A seguir são apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros.

- Realizar as simulações das paredes em escala natural rotulando a parte inferior das paredes e variar entre rotulada e engastada a parte superior;
- Realizar as simulações em escala natural com uma velocidade de aplicação do carregamento menor que a adotada neste trabalho;
- Implementar uma automação no código do Matlab para que, apenas informando as dimensões da parede desejada, dimensões dos blocos utilizados, espessura da argamassa, espessura, profundidade e direção dos cortes, o código retorne um modelo pronto para receber as condições de simulação dentro do programa Abaqus/Explicit.
- Analisar o efeito de escala entre os modelos em escala natural e reduzida, tanto para os modelos experimentais quanto numéricos;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868-1:** Alvenaria estrutural. Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro,2020.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15812-1:** Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos – Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15961-1:** Alvenaria estrutural – Blocos de concreto – Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro, 2011.

AZZOLIN, K. C. **Simulação de fratura em paredes de escala reduzida com cortes utilizando o método dos elementos discretos formado por barras.** 2022. Tese (mestrado) – Universidade Federal do Pampa,2022.

COLPO, A. B.; KOSTESKI, L. E.; ITURRIOZ, I. The size effect in quasi-brittle materials: Experimental and numerical analysis. **International Journal of Damage Mechanics**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 26, n. 3, p. 395-416, 2017.

FISHER, K. The effect of chasing on the compressive strength of brickwork. In: **3rd International Brick Masonry Conference, Proceedings, Essen, Germany.** p. 106-114. 1973.

KIRTSCHIG, K.; METJE, W.-R. **Einfluß von Aussparungen auf die Tragfähigkeit von Mauerwerk: Forschungsbericht (BI 5-80 01 81-15).** [S.l.]: Inst. Für Baustoffkunde und Materialprüfung der Univ., 1986.

KOSTESKI, L. E. **Aplicação do método dos elementos discretos formado por barras no estudo do colapso de estruturas.** 2012. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

KOSTESKI, L. E.; ITURRIOZ, I.; CISILINO, A. P.; D'AMBRA, R. B.; PETTARIN, V.; FASCE, L.; FRONTINI, P. A lattice discrete element method to model the falling-weight impact test of PMMA specimens. **International Journal of Impact Engineering**, v. 87, p. 120-131, 2016.

MEDEIROS, G. F. de. **Estudo numérico do comportamento mecânico de paredes**

**de alvenaria estrutural com cortes.** 2021. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2021.

MEDEIROS, G. F.; MILANI, A.S.; LUBECK, A.; MOHAMAD, G.; RODRIGUEZ, R.Q.; KOSTESKI, L. E. Numerical analysis of masonry walls with horizontal chases using the lattice discrete element method (Idem). **Engineering Structures**, Elsevier, v. 253, p. 113647, 2022.

MILANI, A. S. **Influência de cortes no comportamento mecânico de paredes em alvenaria estrutural submetidas à compressão.** 2019. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

MOJSILOVIC, N. Masonry elements with chases: Behaviour under compression. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 25, n. 12, p. 4415-4425, 2011.

PUGLIA, V. B.; KOSTESKI L. E.; RIERA J. D.; ITURRIOZ I. Random field generation of the material properties in the lattice discrete element method. **The Journal Strain Analysis for Engineering Design**, v. 54, n. 4, p. 236-246, 2019.

REICHEL, S.; JÄGER, W.; BAKEER, T. **Proceedings of 12th Canadian Masonry Symposium:** The effect of horizontal chases on the loadbearing capacity of masonry.in: 12th canadian masonry symposium, 2013, vancouver. proceedings. 2013.

SILVA, G. S. da; KOSTESKI, L. E.; ITURRIOZ, I. Analysis of the failure process by using the lattice discrete element method in the abaqus environment. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, Elsevier, v. 107, p. 102563, 2020.

VIDAL, C. D. M. et al. Numerical and experimental evaluation of the anisotropic behavior and boundary condition of a structural concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 260, p. 119858, 2020.