

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

**KARINA COMPARSI AZZOLIN**

**SIMULAÇÃO DE FRATURA EM PAREDES DE ESCALA REDUZIDA  
COM CORTES UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS  
DISCRETOS FORMADO POR BARRAS**

Alegrete, RS  
2022

KARINA COMPARSI AZZOLIN

**SIMULAÇÃO DE FRATURA EM PAREDES DE ESCALA REDUZIDA  
COM CORTES UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS  
DISCRETOS FORMADO POR BARRAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia, Área de Concentração em Tecnologia dos Materiais, da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia**.

ORIENTADOR: Prof. Luis Eduardo Kostaski

COORIENTADOR: Prof. Alisson Simonetti Milani

Alegrete, RS

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) .

A999s Azzolin, Karina Comparsi

Simulação de fratura em paredes de escala reduzida com  
cortes utilizando o Método dos Elementos Discretos formado por  
barras / Karina Comparsi Azzolin.

100 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,  
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2022.

"Orientação: Luis Eduardo Kostascki".

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

**KARINA COMPARSI AZZOLIN**

**SIMULAÇÃO DE FRATURA EM PAREDES DE ESCALA REDUZIDA  
COM CORTES UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS  
DISCRETOS FORMADO POR BARRAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 15 de agosto de 2022.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Luis Eduardo Kostaschi  
Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Alisson Simonetti Milani  
Co-Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Rene Quispe Rodriguez

UFSM

---

Dr. Gabriel Birck

UFRGS

---



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO KOSTESKI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/09/2022, às 14:10, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Rene Quispe Rodríguez, Usuário Externo**, em 06/09/2022, às 14:17, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **GABRIEL BIRCK, Usuário Externo**, em 06/09/2022, às 16:49, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALISSON SIMONETTI MILANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/09/2022, às 09:14, 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 **0921418** e o código CRC **5D4296F3**.

---

## AGRADECIMENTOS

Deus só dá grandes batalhas à grandes pessoas, por isso, meu primeiro agradecimento é para Ele, por ter guiado minhas escolhas e me dado sabedoria para ter chegado até aqui.

As conquistas da vida não se fazem sozinhas, por mais que muitas vezes dependam única e exclusivamente de nós, ter uma rede de apoio é fundamental. Deus colocou as pessoas certas no meu caminho para que esta realização fosse possível.

Meus pais, Fábio e Marlei, meu irmão, Bruno, sem vocês nada disso seria real, todo o sucesso é por e para vocês. Obrigada por toda uma vida de esforço e dedicação.

Com todo o amor que você merece, obrigada Leonardo. Por me trazer liberdade, me impulsionar a dar o meu máximo e, principalmente, por sempre acreditar em mim e nas minhas escolhas.

Stéfany, obrigada por estar presente em mais este desafio, tua compreensão e sensibilidade nos momentos de desespero foram cruciais.

Fabiano, obrigada por todo o auxílio e paciência, sem tua participação eu não teria conseguido finalizar este trabalho.

Professor Luis Eduardo Kosteski, és o grande idealizador deste trabalho. Obrigada por toda a paciência e orientação, por ser um espelho para seus alunos, por sempre compreender e enxergar o lado humano de seus orientandos. Sua sensibilidade e responsabilidade com aqueles que o seguem te torna destaque entre muitos, meu mais sincero agradecimento.

Professor Alisson Milani, agradeço pelas orientações, sem seu trabalho de base esta pesquisa não teria sentido.

Agradeço também à UNIPAMPA e todos aqueles que contribuíram positivamente para que este trabalho se tornasse real.

Gratidão.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo representar numericamente ensaios realizados experimentalmente em paredes de escala reduzida (1:5) com cortes horizontais e inclinados utilizando o Método de Elementos Discretos de Malha (LDEM) implementado em ambiente de *Abaqus/explicit*. Identificando dessa forma se a profundidade e orientação dos cortes influencia no comportamento mecânico das paredes, na propagação de fissuras e no modo de ruptura. Os cortes foram realizados com profundidades de 20%, 30% e 50% nas paredes submetidas a carregamento centrado. Foram utilizadas diferentes condições de contorno a fim de obter a melhor representação possível dos resultados experimentais. Os modelos foram simulados com as configurações de apoio rotulado-engastado e rotulado-rotulado. Os parâmetros utilizados para avaliar o modelo numérico são sua resistência, o modo de falha e os deslocamentos no plano e fora do plano. Conseguiu-se uma boa representação dos resultados experimentais, atingindo taxas de variação inferiores a 10% em alguns casos. Além disso, foi alcançado o modo de fratura caracterizado por flexão obtido nos ensaios experimentais, exceto no caso do corte inclinado com redução de 50%, onde foi observado ruptura por cisalhamento. Como esperado, conforme a espessura dos cortes foi aumentada, as paredes resistiram menos ao carregamento de compressão. A condição de contorno que melhor representou os resultados experimentais das paredes com cortes horizontais centrais foi do tipo rotulado-rotulado, já os modelos com cortes inclinado e horizontal superior obtiveram melhor desempenho no tipo rotulado-engastado. O engaste torna a estrutura mais rígida, e em alguns casos, quando se rotula é possível se aproximar mais dos resultados experimentais

Palavras-Chave: Alvenaria estrutural, cortes em paredes, escala reduzida, modelo numérico, LDEM.

## ABSTRACT

This work aims to numerically represent tests carried out experimentally on small scale walls (1:5) with horizontal and inclined chases using the Discrete Mesh Element Method (LDEM) implemented in an Abaqus/explicit environment. Identifying in this way if the depth and orientation of the chases influence the mechanical behavior of the walls, the propagation of cracks and the failure mode. The cuts were made with depths of 20%, 30% and 50% on the walls subjected to centered loading. Different boundary conditions were used in order to obtain the best possible representation of the experimental results. Models were simulated with labeled-crimped and labeled-labeled support configurations. The parameters used to evaluate the numerical model are its strength, failure mode and in-plane and out-of-plane displacements. A good representation of the experimental results was achieved, reaching variation rates below 10% in some cases. In addition, the fracture mode characterized by bending obtained in the experimental tests was achieved, except in the case of the inclined cut with 50% reduction, where shear failure was observed. As expected, as the thickness of the sections was increased, the walls resisted compressive loading less. The boundary condition that best represented the experimental results of the walls with central horizontal cuts was the labeled-labeled type, whereas the models with inclined and superior horizontal cuts had better performance in the labeled-embedded type. The setting makes the structure more rigid, and in some cases, when labeling it is possible to get closer to the experimental results.

Keywords: Structural masonry, wall chases, reduced scale, numerical model, LDEM.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Casos dos cortes ensaiados por Fisher (1973) – dimensões em milímetros (mm).....	18
Figura 2 – Casos dos cortes ensaiados por Fisher (1973) – dimensões em milímetros (mm) - continuação.....	19
Figura 3 – Esquema das seções experimentais – dimensões em centímetros (cm)..	21
Figura 4 – Relação entre resistência relativa e índice de dano para as paredes. ....	24
Figura 5 – Esquema dos ensaios realizados por Reichel et al. (2013): I) Vista lateral e frontal dos casos A, B, C e D; II) Vista lateral da parede com carregamento centrado; III) Vista lateral da parede com carga excêntrica. ....	28
Figura 6 – Modo de ruptura para as paredes com carregamento centrado e excêntrico: a) K-B-1; b) Z-B-1; c) H-D-1; d) X-D-2.....	30
Figura 7 – Paredes ensaiadas por Soares (2012).....	31
Figura 8 – Esquemas estruturais das paredes com cortes: (a) corte horizontal central; (b) corte horizontal superior; (c) corte vertical; (d) corte inclinado – medidas em centímetros (cm).....	33
Figura 9 – Redução da resistência versus profundidade do corte: a) horizontal a meia altura; b) inclinado .....	34
Figura 10 – Discretização utilizada no LDEM. a) modelo cúbico básico, b) geração do corpo prismático. ....	37
Figura 11 – Relações constitivas elementares do LDEM - lei de Hillerborg.....	38
Figura 12 – Modelo cúbico do LDEM com seções modeladas no <i>Abaqus/Explicit</i> . ...	39
Figura 13 – Modelo de tensão pós falha versus deslocamento vinculada à energia de fratura utilizado no <i>Abaqus/Explicit</i> .....	40
Figura 14 – Modelo simplificado: a) face A ou vista frontal; b) face B ou vista posterior; c) vista lateral da parede modelada; d) vista em perspectiva do modelo da parede com corte de 20% de sua espessura; e) vista superior da parede simulada. ....	41
Figura 15 – Perspectiva da parede cortada em 3D com juntas de argamassa: a) fase de blocos cerâmicos; b) fase de argamassa. ....	42
Figura 16 – Distribuição de fissuras das paredes homogêneas: a) 20%; b) 30%; c) 50%. ....	43
Figura 17 – Distribuição de fissuras das paredes com juntas de argamassa: a) 20%; b) 30%; c) 50%. ....	44

Figura 18 – Distribuição de fissuras das paredes com juntas de argamassa com condições de contorno alteradas (50%).	45
Figura 19 – Detalhamento das malhas estudadas, com os respectivos comprimentos do LDEM.	46
Figura 20 – Configuração de falha deformada para cada comprimento do LDEM simulado.	47
Figura 21 – Esquema das atividades da pesquisa.	51
Figura 22 – Vista frontal da parede íntegra em escala reduzida 1:5 – dimensões em milímetros (mm).	54
Figura 23 – Blocos em escala reduzida (1:5): a) experimentais de Milani (2019) e b) do modelo numérico – dimensões em milímetros (mm).	55
Figura 24 – Pontos de medição de deslocamentos e deformações de a) Milani (2019) e b) do modelo numérico.	56
Figura 25 – Vista lateral do modelo tridimensional com os apoios utilizados na simulação: a) apoio do tipo 1 – Rot/Eng e b) apoio do tipo 2 – Rot/Rot.	58
Figura 26 – 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.	59
Figura 27 – Ensaio de tração à compressão do bloco: a) experimental e b) numérico.	60
Figura 28 – Modo de ruptura do bloco: a) experimental e b) numérico.	62
Figura 29 – H20C: Tensão de compressão versus a) deformação específica e b) deslocamento fora do plano.	63
Figura 30 – H20C: Relação de tensão, energias e processo de fratura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot.	64
Figura 31 – H20C: Processo de fissuração das paredes: a) Apoio 1 -Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot.	66
Figura 32 – H20C :Modo de ruptura dos ensaios experimentais de Milani (2019): corpos de prova a) 1, b) 2 e c) 3.	67
Figura 33 – H30C: Tensão de compressão versus a) deformação específica e b) deslocamento fora do plano.	68
Figura 34 – H30C: Relação de tensão, energias e modo de ruptura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot.	68
Figura 35 – H30C: Modo de ruptura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot.	69

Figura 36 – H30C :Modo de ruptura dos ensaios experimentais de Milani (2019): corpos de prova a) 1, b) 2 e c) 3. ....	70
Figura 37 – H50C: Tensão de compressão versus a) deformação específica e b) deslocamento fora do plano. ....	71
Figura 38 – H50C: Relação de tensão, energias e modo de ruptura de: a) Apoio 1 - Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot. ....	72
Figura 39 – H50C: Modo de ruptura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot. ....	73
Figura 40 – H50C :Modo de ruptura dos ensaios experimentais de Milani (2019): corpos de prova a) 1, b) 2 e c) 3. ....	74
Figura 41 – HS30C: Tensão de compressão versus a) deformação específica e b) deslocamento fora do plano. ....	75
Figura 42 – HS30C: Relação de tensão, energias e modo de ruptura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot. ....	76
Figura 43 – HS30C: Modo de ruptura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot. ....	77
Figura 44 – HS30C :Modo de ruptura dos ensaios experimentais de Milani (2019): corpos de prova a) 1, b) 2 e c) 3. ....	78
Figura 45 – I30C: Tensão de compressão versus a) deformação específica e b) deslocamento fora do plano. ....	79
Figura 46 – I30C: Relação de tensão, energias e modo de ruptura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot. ....	80
Figura 47 – I30C: Modo de ruptura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot.	81
Figura 48 – I30C :Modo de ruptura dos ensaios experimentais de Milani (2019): corpos de prova a) 1, b) 2 e c) 3. ....	82
Figura 49 – I50C: Tensão de compressão versus a) deformação específica e b) deslocamento fora do plano. ....	83
Figura 50 – I50C: Relação de tensão, energias e modo de ruptura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot. ....	84
Figura 51 – I50C: Modo de ruptura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot.	85
Figura 52 – I50C :Modo de ruptura dos ensaios experimentais de Milani (2019): corpos de prova a) 1, b) 2 e c) 3. ....	86
Figura 53 – Análise dos resultados das paredes com cortes horizontais centrais. ....	88
Figura 54 – Análise dos resultados das paredes com cortes de 30% horizontais centrais e superiores. ....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo de limites para cortes horizontais em paredes de alvenaria.....	15
Tabela 2 – Resumo de limites para cortes verticais em paredes de alvenaria.....	16
Tabela 3 – Redução da resistência em relação à parede integra de Fisher (1973). ..	19
Tabela 4 – Ensaio de Mojsilovic (2011).....	26
Tabela 5 – Resultados de Reichel <i>et al.</i> (2013).....	29
Tabela 6 – Descrição e denominação do programa experimental de Milani (2019)...	32
Tabela 7 – Resultados obtidos por Milani (2019). .....	35
Tabela 8 – Resultados experimentais de Milani (2019) – Tensão de ruptura, deformação e deslocamento. ....	36
Tabela 9 – Resistência dos modelos simulados por Zydeck (2022).....	49
Tabela 10 – Propriedades utilizadas no modelo numérico.....	52
Tabela 11 – Profundidades dos cortes.....	59
Tabela 12 – Calibração do modelo.....	61
Tabela 13 – Tensão máxima obtida em relação aos resultados experimentais. ....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>LDEM</i>	Método dos Elementos Discretos formado por barras
<i>DEM</i>	Método dos Elementos Discretos
<i>FEM ou MEF</i>	Método dos Elementos Finitos
<i>NBR</i>	Norma Brasileira
<i>RCE</i>	Relação Constitutiva Elementar
<i>LVDT</i>	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
$A_i$	Área da seção transversal do elemento
$\sigma_t$	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
$\nu$	Coeficiente de Poisson do material
$L_{par}$	Comprimento da parede
$t_{par}$	Espessura da parede
$\lambda_{par}$	Esbeltez da parede
$h_{par}$	Altura da parede
$L_{corte}$	Largura do corte
$b_{máx}$	Largura máxima do corte
$\sigma_F$	Tensão de tração máxima da relação constitutiva
$f_c$	Tensão de compressão
$f_{cm}$	Tensão de compressão média

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	10
1.1.	OBJETIVOS .....	12
1.1.1.	Objetivo Geral .....	12
1.1.2	Objetivos Específicos .....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	13
2.1.	CORTES EM PAREDES DE ALVENARIA .....	13
2.1.1.	Textos Normativos .....	13
2.1.2.	Estudos experimentais de cortes em paredes de alvenaria .....	17
2.2.	MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS FORMADOS POR BARRAS .....	37
2.3.	IMPLEMENTAÇÃO DO LDEM NO AMBIENTE ABAQUS/EXPLICIT .....	38
2.3.1.	Estudos utilizando método numérico LDEM e alvenaria .....	40
3	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	50
3.1.	DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES E MALHA UTILIZADAS.....	51
3.2.	CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	60
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	63
4.1.	PAREDE COM CORTE HORIZONTAL CENTRAL DE 20% DE PROFUNDIDADE (H20C).....	63
4.2.	PAREDE COM CORTE HORIZONTAL CENTRAL DE 30% DE PROFUNDIDADE (H30C).....	67
4.3.	PAREDE COM CORTE HORIZONTAL CENTRAL DE 50% DE PROFUNDIDADE (H50C).....	70
4.4.	PAREDE COM CORTE HORIZONTAL SUPERIOR DE 30% DE PROFUNDIDADE (HS30C).....	74
4.5.	PAREDE COM CORTE INCLINADO DE 30% DE PROFUNDIDADE (I30C)...	78
4.6.	PAREDE COM CORTE INCLINADO DE 50% DE PROFUNDIDADE (I50C)...	82
4.7.	RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	86
5	CONCLUSÕES .....	90
5.1.	TRABALHOS FUTUROS.....	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92

## 1 INTRODUÇÃO

Embora a alvenaria estrutural seja um método construtivo consolidado no Brasil, ainda há uma deficiência de estudos técnicos-científicos que caracterizem seu comportamento com relação a alguns aspectos. Isso acaba refletindo na ausência de padrões normativos para tratar certos problemas, como por exemplo, a execução de cortes para passagens de instalações, o que pode comprometer o desempenho estrutural da alvenaria (MILANI, 2019).

Referente à execução de cortes, a norma brasileira NBR 16868-1 (2020) apenas apresenta limitações de dimensões a fim de não interferir na capacidade portante da parede. Porém, não traz informações sobre localização e profundidade desses cortes. Analisando algumas normas internacionais, foram observadas diferentes abordagens. Algumas apenas indicam que a redução de resistência devido aos cortes deve ser considerada em projeto e outras trazem informações mais detalhadas com limites bem definidos. Entretanto, não é possível a aplicação desses limites à realidade brasileira, uma vez que as normas internacionais foram elaboradas considerando métodos construtivos e materiais diferentes dos encontrados no Brasil.

É importante salientar que as normas não apresentam informações de como proceder no caso de seus limites serem excedidos, com relação à capacidade de carga residual e a segurança das paredes. E ainda, muitas vezes as normas são ignoradas, sendo comum encontrar situações em que os cortes são executados com a edificação já em uso, sem serem previstos em projeto. Nesse contexto, a quantificação da resistência residual, limites de dimensões dos cortes e modo de falha das paredes são parâmetros importantes a serem avaliados para prevenir a ruptura frágil dos elementos estruturais.

O estudo de cortes em paredes de alvenaria é considerado relativamente recente, sendo Fisher (1973) um dos primeiros trabalhos publicados, que tratou sobre a influência dos cortes no comportamento mecânico da alvenaria. A partir disso, modelos em escala real, ou reduzida, foram ensaiados variando fatores como o tipo de bloco, esbeltez das paredes, localização e dimensão dos cortes e excentricidade do carregamento, em pesquisas como de Kirtschig e Metje (1986), Mojsilovic (2011), Reichel *et al.* (2013) e Milani (2019).



Uma das dificuldades encontradas para o avanço desse tema de pesquisa é que ensaios com paredes em escala real apresentam algumas desvantagens, como custo relativamente alto, a preparação e transporte das paredes, exigência de adaptações para a execução do ensaio e de uma elevada capacidade de carga. Por isso, uma alternativa é a utilização de modelos em escala reduzida ou métodos numéricos que simulem o comportamento da alvenaria.

A aplicação dos métodos numéricos em problemas de engenharia está em crescente utilização, pois assim é possível aumentar a produtividade e diminuir custos na construção de modelos físicos. Poucos estudos que correlacionam métodos numéricos e ensaios experimentais em alvenaria com cortes são encontrados. Mojsilovic (2011) e Reichel *et al.* (2013) complementaram suas análises experimentais utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), para simular o comportamento da alvenaria. Medeiros (2021) também reproduziu numericamente os ensaios experimentais de Milani (2019) por meio do Método dos Elementos Discretos formados por barras (LDEM).

Dentre os modelos numéricos utilizados, o MEF é o que mais se destaca, seu uso vem crescendo e sendo aplicado em diversas áreas. Gonçalves (2007) afirma que o MEF possui uma grande qualidade: a capacidade de lidar com geometrias arbitrárias. Entretanto, Vidal (2019) aponta como desvantagem a dificuldade do método em simular fratura e propagação de fissuras em corpos sólidos. Por isso, como alternativa para simular a fratura e fragmentação em sólidos, pode-se utilizar o Método dos Elementos Discretos (DEM).

A versão do LDEM utilizado neste trabalho consiste na discretização do contínuo em barras que formam uma treliça espacial regular, onde massas equivalentes são concentradas nos nós, e a rigidez das barras são equivalentes aos contínuos que tentam representar (KOSTESKI, 2012).

No presente trabalho será aplicado o Método dos Elementos Discretos formados por barras (LDEM), para simular o comportamento de paredes de alvenaria com cortes submetidas à compressão. De forma que o LDEM será introduzido no ambiente *Abaqus/Explicit* para aproveitar as ferramentas que este *software* oferece. Os resultados numéricos serão comparados com os resultados experimentais encontrados por Milani (2019), ambos obtidos por meio de ensaios em paredes com escala reduzida 1:5.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é a avaliação do comportamento mecânico de paredes de alvenaria em escala reduzida com cortes de diferentes profundidades e localizações empregando o Método dos Elementos Discretos formado por barras.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Aplicar o LDEM para análise dos efeitos de carregamento de compressão em paredes de alvenaria estrutural com cortes;
- Verificar a alteração no comportamento mecânico da alvenaria, provocado pela variação na profundidade de cortes horizontais e inclinados;
- Analisar a propagação de fissuras e o modo de ruptura das paredes;
- Quantificar os parâmetros de resistência máxima à compressão, deformação específica e deslocamento fora do plano;
- Alterar as condições de contorno a fim de avaliar o desempenho do modelo em relação aos resultados experimentais;
- Relacionar os resultados obtidos através das simulações numéricas com os resultados experimentais publicados anteriormente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nas próximas seções deste capítulo serão descritos textos normativos referentes a esta pesquisa e os trabalhos considerados relevantes para o tema, bem como a descrição do método de análise numérica que é empregado para obtenção dos resultados.

### 2.1. CORTES EM PAREDES DE ALVENARIA

#### 2.1.1. Textos Normativos

A referência normativa brasileira que estabelece requisitos para projetos de edificações em alvenaria estrutural é a NBR 16868-1 (2020). A qual é aplicável à alvenaria de blocos e tijolos cerâmicos e de blocos de concreto. A NBR 16868-1 (2020) determina que qualquer corte executado deve ser previsto no projeto estrutural, de forma que o trecho cortado seja descontado da seção da parede no projeto. Com relação aos cortes verticais é indicado que, caso tenham comprimento superior a 60 cm, a parede deverá ser analisada como dois elementos distintos. Por fim, a norma especifica que não deverá haver condutores de fluídos embutidos em paredes estruturais, a menos que sua instalação e manutenção não exijam cortes.

Referente ao cenário internacional, considerar-se-á neste trabalho as normas americana TMS 402-08/ACI 530-08/ASCE 5-08 (2008), australiana AS 3700 (2011), indiana IS:1905 (2002) e da união europeia EN 1996-1-1:2005 (2005) em conjunto com os anexos nacionais da Alemanha DIN EN 1996-1-1/NA/A2:2015-01 (2015) e do Reino Unido BS NA EN 1996-1-1:2005 (2007). A normativa americana TMS 40208/ACI 530-08/ASCE 5-08 (2008) afirma basicamente que as áreas de cortes, aberturas e recuos devem ser descontadas da área bruta no dimensionamento de paredes de alvenaria comprimidas. Essa norma especifica ainda que no caso dos cortes e recuos possuírem uma largura maior que 30,5 cm então devem ser empregadas vergas.

Os parâmetros apresentados pela norma australiana AS 3700 (2011) tratam do efeito dos cortes, principalmente, no tempo de resistência ao fogo com finalidade estrutural e orienta a evitar a execução de cortes na alvenaria. A IS:1905 (2002) indica que os cortes devem estar especificados em projeto e não devem trazer danos à estabilidade ou resistência da estrutura. No entanto, caso não estejam previstos em

projetos, a norma traz orientações de largura, profundidade e localização para os cortes, a fim de não interferirem no dimensionamento da estrutura.

A EN 1996-1-1:2005 (2005) apresenta limites de profundidade e largura para cortes verticais, horizontais e inclinados conforme a espessura da parede e o momento de sua execução, se realizados durante ou após a construção da parede. Sendo uma das mais completas, essa norma recomenda que ao ultrapassar os limites, deve-se considerar no dimensionamento o efeito dos cortes sobre a capacidade de carga das paredes.

O anexo nacional da Alemanha DIN EN 1996-1-1/NA/A2:2015-01 (2015) complementar à norma da União Europeia, especifica limites para cortes e recuos para que não haja necessidade de verificações adicionais, considerando espessura mínima de parede e localização dos cortes, bem como execuções durante e após a construção da parede. Da mesma forma, o Reino Unido também possui um anexo nacional, BS NA EN 1996-1-1:2005 (2007), o qual não apresenta grandes diferenças de limitações com relação à norma europeia.

Milani (2019) apresentou uma comparação entre as normas nacionais e internacionais citadas, mostrando um resumo dos principais limites em questões de posicionamento e dimensões para os cortes, que estão reproduzidos nas Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1 – Resumo de limites para cortes horizontais em paredes de alvenaria.

País	Profundidade	Comprimento máximo	Largura	Posição/Espaçamento/Afastamento
Brasil	-	40 cm Soma < 1/6 $L_{par}$	-	-
Estados Unidos	-	30,5 cm > prever vergas	-	-
Austrália <sup>d)</sup>	-	1/4 $L_{par}$ <sup>c)</sup> 1/2 $L_{par}$ <sup>c)</sup>	-	-
Índia	1/6 $t_{par}$ $\lambda_{par} < 15$	1 m Soma < 1/4 $L_{par}$	6 cm	1/3 $h_{par}$ da laje (superior e inferior) > 60 cm de suporte lateral > 50 cm entre cortes Máximo 2 cortes
União Europeia <sup>a)</sup>	até 3 cm <sup>b)</sup>	ilimitado	1/2 $t_{par}$ residual	> 50 cm entre cortes e abert. > 2 x $L_{corte}$ entre cortes
Alemanha <sup>a)</sup>	até 3 cm <sup>b)</sup>	ilimitado	-	40 cm da laje (sup. e inf.) > 49 cm entre cortes e abert. > 2 x $L_{corte}$ entre cortes
Reino Unido <sup>a)</sup>	até 3 cm <sup>b)</sup>	ilimitado	1/2 $t_{par}$ residual	> 50 cm entre cortes e abert. > 2 x $L_{corte}$ entre cortes

a) Válidos também para cortes inclinados

b) Função do comprimento e espessura da parede

c) Dois casos: Paredes carregadas na vertical e paredes carregadas na vertical e horizontal

d) Efeito dos cortes no tempo de resistência ao fogo para fins estruturais

Fonte: Milani (2019).

onde:

$L_{par}$  – comprimento da parede;

$t_{par}$  – espessura da parede;

$\lambda_{par}$  – esbeltez da parede;

$h_{par}$  – altura da parede;

$L_{corte}$  – largura do corte.

Tabela 2 – Resumo de limites para cortes verticais em paredes de alvenaria.

País	Prof.	Comprimento máximo	Largura	Espaçamento/Afastamento
Brasil	-	60 cm > 2 painéis	-	-
Estados Unidos	-	30,5 cm > prever vergas	-	-
Austrália <sup>d)</sup>	-	Ignorado <sup>c)</sup> <1/2 $h_{par}$ <sup>c)</sup>	-	-
Índia	1/3 $t_{par}$	-	$t_{par}$	> 2 m entre cortes > 34,5 cm de aberturas > 23 cm de contraventamento
União Europeia	3 cm <sup>a)</sup>	-	10-20 cm <sup>a)</sup> Soma < 13% $L_{par}$	> 22,5 cm entre cortes > 22,5 cm entre cortes e recuos ou abert. > (2 x recuo) entre cortes e recuos ou abert.
Alemanha	3 cm <sup>a)</sup>	-	10-20 cm <sup>a)</sup> Soma < $b_{máx}^{b)}$	> 11,5 cm entre cortes e recuos ou abert.
Reino Unido	3 cm <sup>a)</sup>	-	10-20 cm <sup>a)</sup> Soma < 13% $L_{par}$	> 22,5 cm entre cortes > 22,5 cm entre cortes e recuos ou abert. > (2 x recuo) entre cortes e recuos ou abert.

a) Para cortes executados após a construção da parede. É função da largura da parede

b) A largura total acumuladas dos cortes não deve exceder as dimensões de  $b_{máx}$  para cada 2 m de comprimento da parede. Para comprimentos de parede menores que 2 m, estes valores devem ser reduzidos proporcionalmente ao comprimento da parede

c) Dois casos: Paredes carregadas na vertical e paredes carregadas na vertical e horizontal

d) Efeito dos cortes no tempo de resistência ao fogo para fins estruturais

Fonte: Milani (2019).

onde:

$b_{máx}$  – largura máxima do corte.

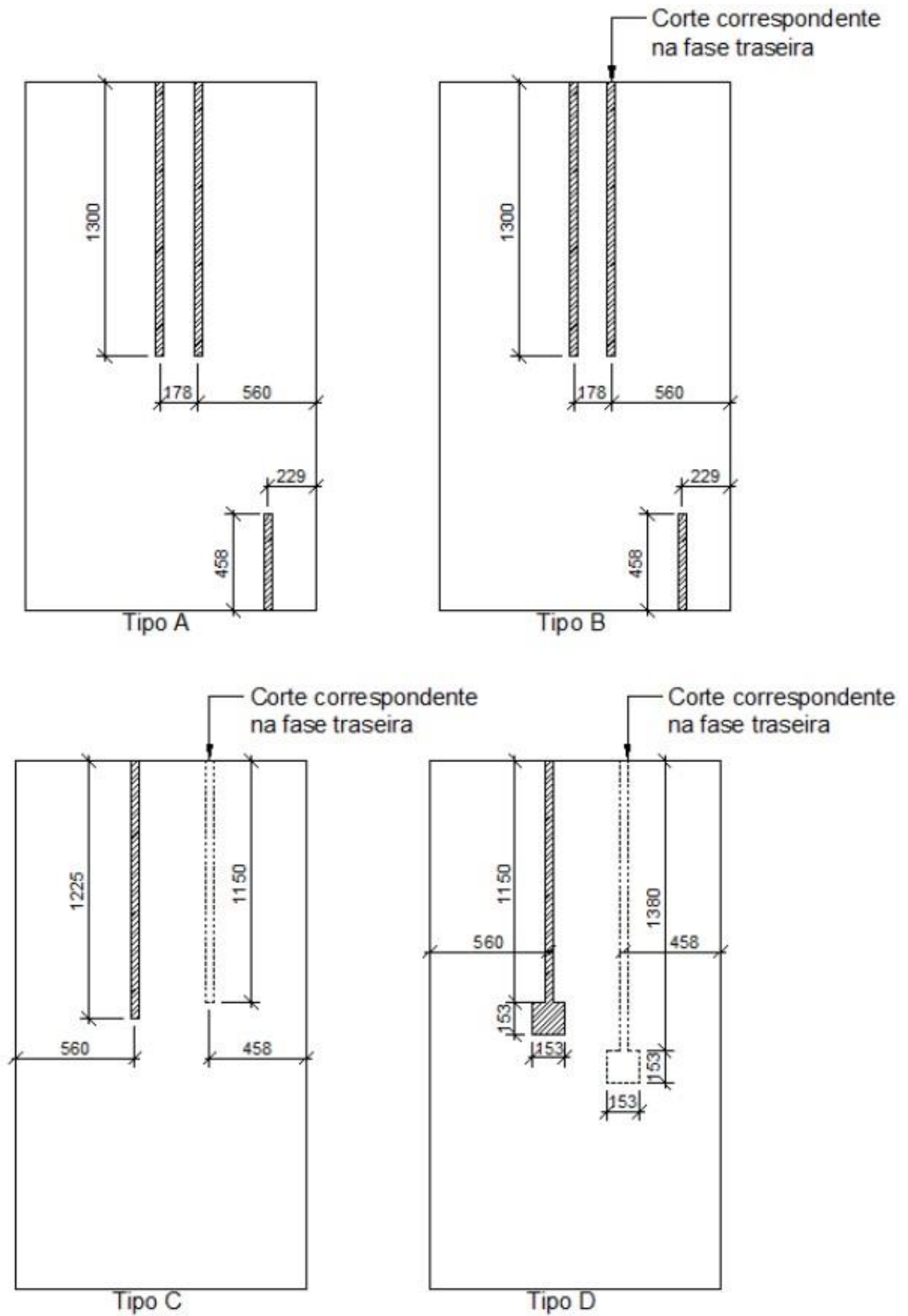
A partir dessa comparação entre as referências normativas, Milani (2019) constatou que não há um consenso entre os países, pois as normas apresentam divergências na forma de apresentarem os limites para execução dos cortes. Entretanto, as normas não indicam um método para o caso de redução da capacidade de carga das paredes de alvenaria devido à execução dos cortes.

## 2.1.2. Estudos experimentais de cortes em paredes de alvenaria

- **Fisher (1973)**

Pesquisas referentes aos cortes em alvenaria são consideradas relativamente recentes, foi a partir do estudo de Fisher (1973) que começaram a ser desenvolvidas pesquisas com maior número de variáveis e programas experimentais mais abrangentes. O objetivo da pesquisa de Fisher (1973) foi analisar o efeito dos cortes na resistência à compressão das paredes, para isso o autor ensaiou paredes com espessuras de 102,5 mm e 215 mm, feitas com tijolo maciço prensado, e de 178mm, feitas com tijolo de material plástico prensado. Os tijolos maciços prensados apresentaram uma resistência média à compressão de 45,65 MPa e os tijolos de material plástico prensado, de 42,68 MPa. Os cortes executados para os ensaios estão representados na Figura 1 e Figura 2, os quais possuem dimensões finais nominais de 38 mm de largura e 25 mm de profundidade.

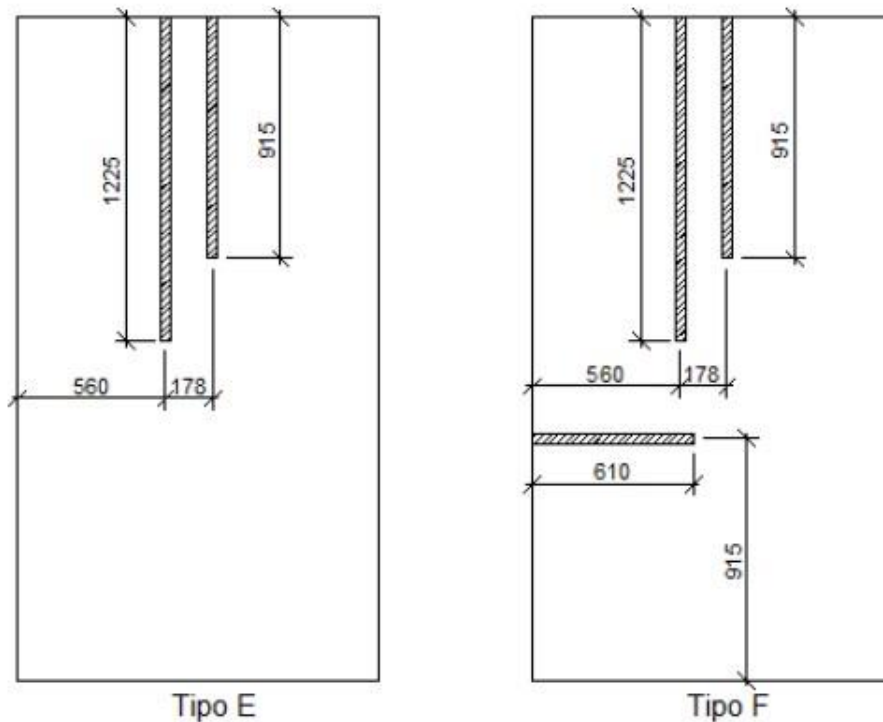
Figura 1 – Casos dos cortes ensaiados por Fisher (1973) – dimensões em milímetros (mm).



Fonte: Milani (2019), adaptado de Fisher (1973).



Figura 2 – Casos dos cortes ensaiados por Fisher (1973) – dimensões em milímetros (mm) - continuação.



Fonte: Milani (2019), adaptado de Fisher (1973).

As paredes foram ensaiadas a uma taxa de carregamento de  $0,7 \text{ MN/m}^2/\text{min}$ . Na Tabela 3 estão descritas as porcentagens de reduções de resistência de cada tipologia de corte em relação à resistência da parede íntegra.

Tabela 3 – Redução da resistência em relação à parede íntegra de Fisher (1973).

Tipo de Parede	Redução da Resistência (%)		
	Espessura da Parede		
	178 mm	102,5 mm	215 mm
A	11,2 <sup>a)</sup>	16,9	14,3
B	6,7	0	2,4
C	1,2	14,8	0
D	20,1	4	7,8
E	-	15,9	7,1
F	9,5 <sup>a)</sup>	6,3	20,7

a) Baseado em somente um resultado

Fonte: Milani (2019), adaptada de Fisher (1973).

A partir dos resultados da sua pesquisa, Fisher (1973) constatou que no caso das paredes com 178 mm de espessura, a perda de resistência foi perceptível devido

ao aumento da quantidade de cortes. Sendo a tipologia com quadros a que apresentou maior perda de resistência.

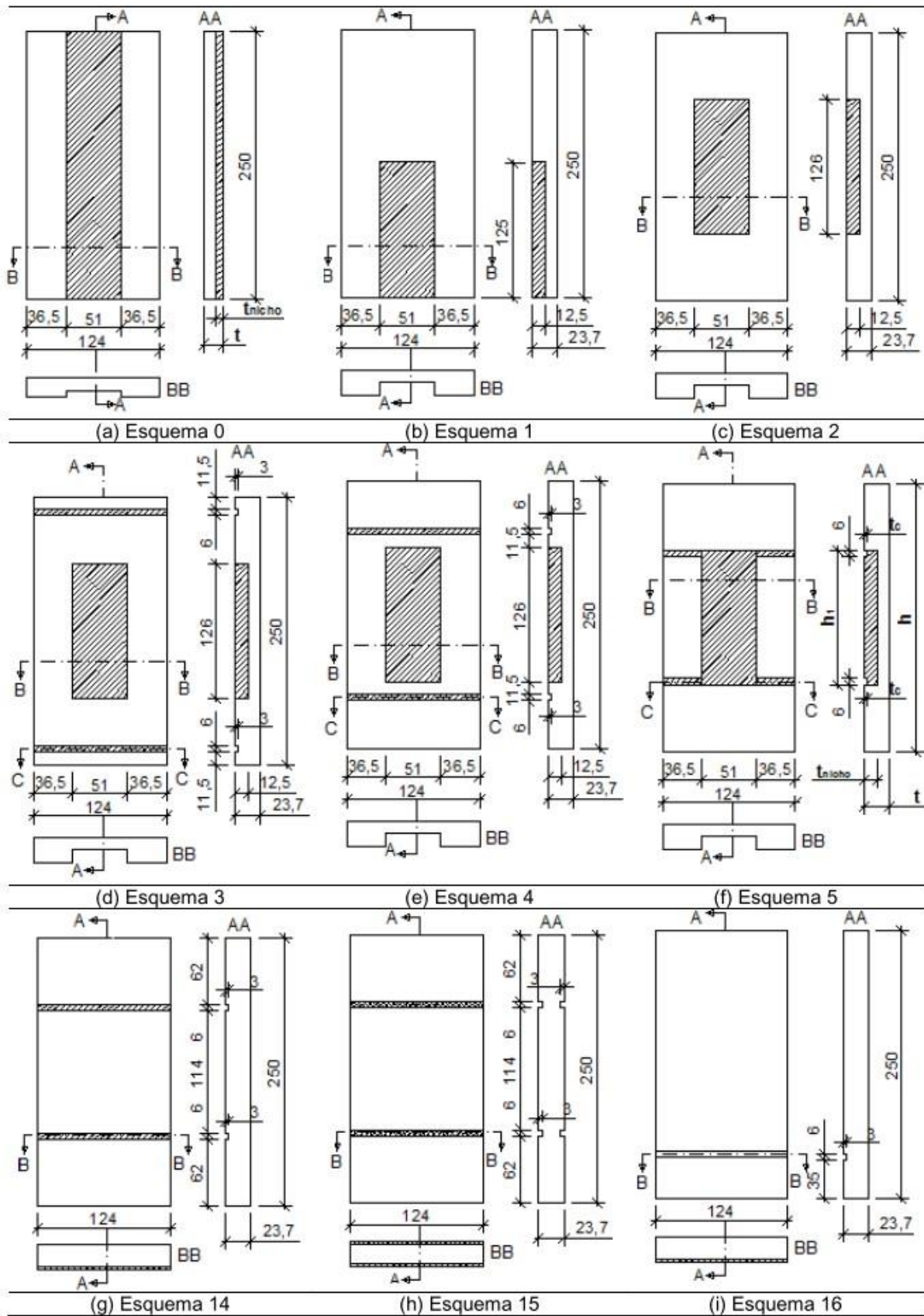
Já no caso das demais espessuras analisadas, a relação de quantidade de cortes e diminuição da resistência das paredes não se apresentou de forma significativa. Assim como os cortes para os quadros não interferiram na resistência da mesma forma que nas paredes de 178 mm de espessura.

O autor constatou também que os cortes horizontais atuaram como uma fonte de propagação de fissuras, produzindo aumento de fissuração e deslocamento na região onde foram executados. Já os cortes para os quadros causaram um aumento das deformações na base das paredes. Com isso, Fisher (1973) concluiu que a execução de cortes verticais, desde que em quantidade aceitável, pode ser feita e ainda assim manter os limites de segurança da estrutura, o que não é indicado no caso dos cortes horizontais.

- **Kirtschig e Metje (1986)**

A fim de verificar a segurança da estrutura sem que houvesse a necessidade de cálculos adicionais de dimensionamento, Kirtschig e Metje (1986) investigaram a influência de cortes e nichos na capacidade de carga de paredes de alvenaria. Os esquemas dos cortes realizados nos ensaios de Kirtschig e Metje (1986) estão representados na Figura 3.

Figura 3 – Esquema das seções experimentais – dimensões em centímetros (cm).



Fonte: Milani (2019), adaptado de Kirtschig e Metje (1986).

Os experimentos consistiram em ensaiar paredes em diversas situações e os grupos a serem ensaiados foram divididos da seguinte forma:

- Seção experimental 1: Paredes íntegras e com nichos da base ao topo, com o carregamento aplicado no centro de gravidade considerando os nichos e variando a espessura das paredes;
- Seção experimental 2: Difere da seção 1 apenas pelo carregamento ser aplicado na metade da largura das paredes;
- Seção experimental 3: Variação da posição e altura dos nichos e, em alguns casos, combinados com cortes horizontais. A espessura e altura não sofreram variações;
- Seção experimental 4: Aumento da altura das paredes para verificar o limite de segurança relacionado ao índice de esbeltez;
- Seção experimental 5: Execução de cortes horizontais em paredes de menor espessura a fim de verificar a influência do índice de esbeltez;
- Seção experimental 6: Repetidos os experimentos da seção 4, porém com carregamento excêntrico;
- Seção experimental 7: Ensaçadas paredes apenas com cortes horizontais a fim de verificar sua influência nos resultados.

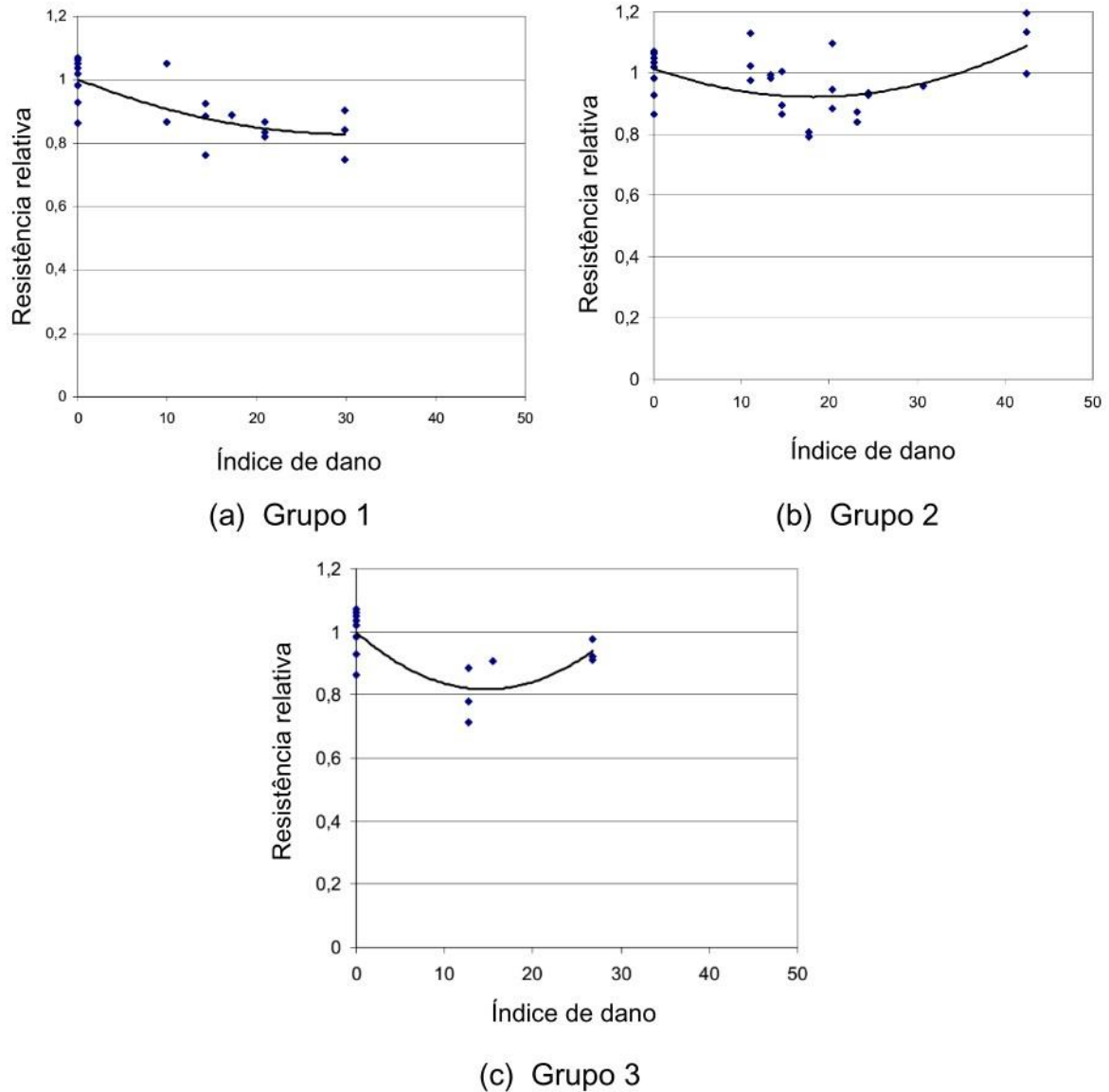
Analisando os resultados, de forma geral, Kirtschig e Metje (1986) detectaram que a mudança no ponto de aplicação de carga não exerceu influência no aumento de perda de resistência das paredes, já os nichos verticais foram determinantes na redução da resistência, sendo essa redução proporcional à dimensão do nicho. Os nichos verticais que foram executados somente em parte da altura apresentaram maior redução na capacidade de carga quando comparados aos nichos do topo à base, o que pode ser explicado pelos picos de tensão na região de transição da seção. Os cortes horizontais causaram uma queda adicional na resistência das paredes e o aumento de esbeltez resultou em uma pequena perda de capacidade de carga.

- **Sahlin (2007)**

Com os resultados obtidos por Fisher (1973), Sahlin (2007) utilizou o comprimento total dos cortes como uma medida de dano das paredes, já que esses possuíam as mesmas dimensões de largura e profundidade. A relação entre o comprimento total dos cortes e a espessura das paredes foi definida por Sahlin (2007) como *índice de dano*.

Para comparar e analisar os resultados de Fisher (1973), Sahlin (2007) os separou em três grupos: Grupo 1, corte na face frontal; Grupo 2, corte na face frontal e traseira; e Grupo 3, corte na face frontal, sendo um horizontal. Assim, as resistências das paredes puderam ser relacionadas com os índices de danos por meio de ajustes de curvas, dispostos na Figura 4.

Figura 4 – Relação entre resistência relativa e índice de dano para as paredes.



Fonte: Adaptado de Sahlin (2007).

No Grupo 1, a resistência relativa diminui conforme o índice de dano aumenta, e o fato da curva e a perda de linearidade da relação indica que outros fatores também têm efeito. Já no Grupo 2, não há tendência de linearidade, indicando que outros fatores exercem ainda mais influência nesses casos. E o Grupo 3 também não apresenta comportamento linear e aqui as paredes mais espessas foram afetadas de forma significativa pelos cortes horizontais.

Assim, o autor constatou que a rigidez das paredes ou variação da área pode aumentar a redução da resistência, o que pode ocorrer devido à concentração de tensões nas regiões de cortes ou pela microfissuração nessas regiões.

- **Mojsilovic (2011)**

Mojsilovic (2011) investigou a influência dos cortes para passagens de tubulações em paredes de alvenaria submetidas à compressão. As paredes ensaiadas eram constituídas por blocos cerâmicos e foram analisadas nas condições íntegras e com cortes horizontais, verticais e inclinados à 33,7°. O autor realizou os ensaios variando a espessura das paredes e após os cortes, fez o preenchimento com diferentes materiais para identificar sua influência na capacidade de carga da alvenaria. Na Tabela 4 estão apresentados um breve resumo do programa experimental e os resultados obtidos da variação de resistência em relação às paredes íntegras de referência. As séries A, B e C são adotadas para diferenciar a espessura da parede e o tipo de preenchimento utilizados em cada grupo.

Tabela 4 – Ensaio de Mojsilovic (2011).

Parede	Esp. parede e prof. do corte	Material de preenchimento	Carga Máxima (kN)	Área Seção Transv. (m <sup>2</sup> )	Tensão máx. (MPa)	Δ (%)
A <sup>a)</sup>	t = 15 cm 1/3t = 5 cm	Sem corte	849,10	0,18	4,72	-
AH1 <sup>b)</sup>		Gesso	666,10		3,70	-21,6
AH2 <sup>b)</sup>		Argamassa	637,20		3,54	-25,0
AV1 <sup>c)</sup>		Gesso	616,60		3,43	-27,4
AV2 <sup>c)</sup>		Argamassa	689,60		3,83	-18,8
AS1 <sup>d)</sup>		Gesso	666,60		3,70	-21,5
AS2 <sup>d)</sup>		Argamassa	551,40		3,06	-35,1
B <sup>a)</sup>	t = 17,5 cm 2/7t = 5 cm	Sem corte	670,30	0,21	3,19	-
BH1 <sup>b)</sup>		Gesso	650,20		3,10	-3,0
BH2 <sup>b)</sup>		Argamassa	763,20		3,63	13,9
BV1 <sup>c)</sup>		Gesso	745,80		3,55	11,3
BV2 <sup>c)</sup>		Argamassa	553,20		2,63	-17,5
BS1 <sup>d)</sup>		Gesso	543,70		2,59	-18,9
BS2 <sup>d)</sup>		Argamassa	471,60		2,25	-29,6
C <sup>a)</sup>	t = 15 cm 1/3t = 5 cm	Sem corte	1158,00	0,18	6,43	-
CH0 <sup>b)</sup>		Não	997,79		5,54	-13,8
CBO <sup>e)</sup>		Não	647,02		3,59	-44,1
CH3 <sup>b)</sup>		AAR	1365,03		7,58	17,9
CV0 <sup>c)</sup>		Não	1049,58		5,81	-9,4
CS0 <sup>d)</sup>		Não	828,65		4,60	-28,4
CS3 <sup>d)</sup>		AAR	1493,24		8,30	28,9

a) Parede de referência sem cortes

b) Corte horizontal

c) Corte vertical

d) Corte inclinado

e) Corte horizontal nas duas faces

Nota: AAR é argamassa de alta resistência para reforços

Fonte: Adaptada de Mojsilovic (2011).

Analisando o comportamento da alvenaria para as diferentes profundidades e orientações de cortes, Mojsilovic (2011) concluiu que a maior redução na resistência foi no caso das paredes com cortes inclinados, os quais apresentaram falha por escorregamento entre as faces seccionadas. As paredes com cortes horizontais e verticais apresentaram valores significativos de perda de resistência à compressão e



somente no caso dos cortes preenchidos com argamassa de alta resistência se obteve paredes mais resistentes do que a referência.

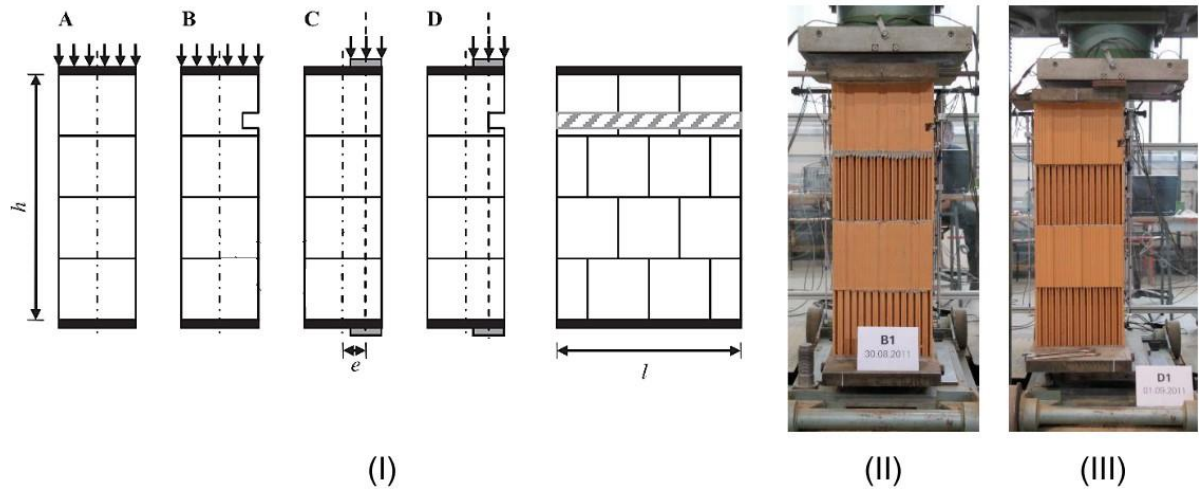
Mojsilovic (2011) indica que para evitar a redução da capacidade de carga, o adequado seria realizar o preenchimento com materiais mais rígidos que a alvenaria. O autor atentou para o fato de haver uma subestimação da capacidade de resistência das paredes ensaiadas quando se tem como referência a resistência à tração do bloco, já que em situações reais os blocos estão sob confinamento, o que elevaria sua capacidade de resistência à tração.

- **Reichel et al. (2013)**

A influência dos cortes horizontais nas paredes de alvenaria sob carregamento centrado e excêntrico também foram o tema de estudo do trabalho de Reichel *et al.* (2013). Os autores analisaram o efeito dos cortes executados próximos aos apoios das lajes, pois citam que, o fato do corte estar muito próximo à região de aplicação da carga influencia consideravelmente na resistência da parede.

Dessa forma, os cortes foram feitos a 15 cm do topo da parede ensaiada, executando-os com profundidades de 25 mm e 30 mm. As paredes ensaiadas foram construídas com diferentes tipos de blocos vazados: bloco sílico calcáreo (Tipo K), tijolos com furos verticais (Tipo Z), bloco de concreto padrão (Tipo H) e tijolos com furos verticais leve (Tipo X). O esquema de execução dos procedimentos experimentais está representado na Figura 5. Nos casos A e B a carga foi aplicada em toda a seção transversal da parede, de forma centrada. Já nos casos C e D a carga foi aplicada entre 1/2 e 1/3 da parede, apresentando uma excentricidade “e” em relação ao eixo longitudinal da parede.

Figura 5 – Esquema dos ensaios realizados por Reichel *et al.* (2013): I) Vista lateral e frontal dos casos A, B, C e D; II) Vista lateral da parede com carregamento centrado; III) Vista lateral da parede com carga excêntrica.



Fonte: Milani (2019), adaptado de Reichel *et al.* (2013).

Na Tabela 5 constam os resultados obtidos por Reichel *et al.* (2013), onde  $e/t$  é a razão entre a excentricidade da aplicação da carga e a espessura da parede,  $A_{res}/A_{tot}$  é a razão entre a área após o corte a área total e  $F_{m\acute{a}x}$  é a carga de ruptura da parede. A relação entre a carga de ruptura da parede com corte em relação à parede íntegra é dada pelo fator de carga ( $\Phi$ ).

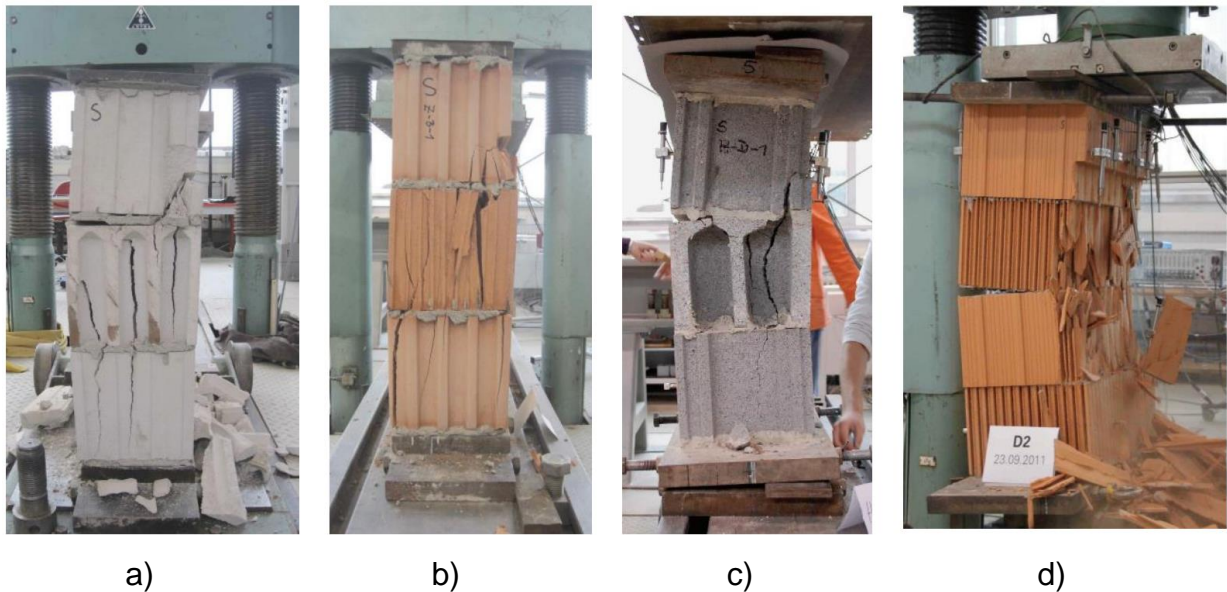
Tabela 5 – Resultados de Reichel *et al.* (2013).

Amostra	Corte	e/t	$A_{res}/A_{tot}$	$F_{m\acute{a}x}$	$\varphi$
			(-)	(kN)	
K-A-1		0,00	1,00	859,1	1,00
K-B-1	x	0,00	0,89	719,9	0,82
K-B-2	x	0,00	0,89	707,0	0,80
K-C-1		0,25	1,00	549,8	0,64
K-D-1	x	0,25	0,89	461,4	0,52
K-D-2	x	0,25	0,89	392,7	0,45
Z-A-1		0,00	1,00	1323,6	1,00
Z-B-1	x	0,00	0,89	1213,3	0,92
Z-B-2	x	0,00	0,89	1080,4	0,82
Z-C-1		0,25	1,00	883,7	0,67
Z-D-1	x	0,25	0,89	586,7	0,44
Z-D-2	x	0,25	0,89	620,8	0,47
H-A-1		0,00	1,00	953,9	1,00
H-B-1	x	0,00	0,90	889,0	0,93
H-B-2	x	0,00	0,90	719,9	0,75
H-C-1		0,30	1,00	626,6	0,66
H-D-1	x	0,30	0,90	512,4	0,54
H-D-2	x	0,30	0,90	524,9	0,55
X-A-1		0,00	1,00	1270,8	1,00
X-A-2		0,00	1,00	1201,1	1,00
X-B-1	x	0,00	0,92	1069,9	0,87
X-B-2	x	0,00	0,92	1035,2	0,84
X-C-1		0,33	1,00	628,3	0,51
X-C-2		0,33	1,00	563,9	0,46
X-D-1	x	0,33	0,92	301,8	0,25
X-D-2	x	0,33	0,92	439,0	0,36

Fonte: Milani (2019), adaptada de Reichel *et al.* (2013).

Reichel *et al.* (2013) constataram que o modo de falha das paredes com carregamento centrado foi por tensão de tração perpendicular à direção da aplicação da carga. Já no caso de carregamento excêntrico, primeiro surgiram fissuras na parte inferior do corte que se propagam e causaram cisalhamento e flambagem da amostra. Os modos de ruptura de algumas amostras constam na Figura 6.

Figura 6 – Modo de ruptura para as paredes com carregamento centrado e excêntrico: a) K-B-1; b) Z-B-1; c) H-D-1; d) X-D-2



Fonte: Adaptada de Reichel *et al.* (2013).

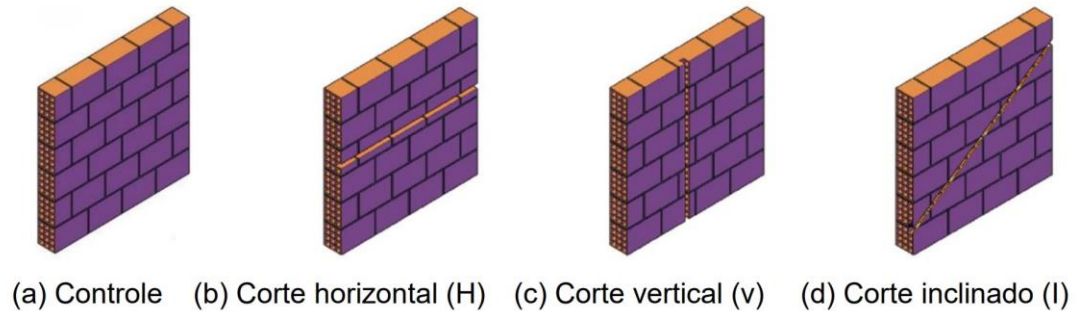
Com relação ao efeito dos cortes na resistência das paredes, os cortes horizontais ocasionaram uma redução da capacidade de carga entre 7% e 25%, dependendo do tipo de bloco, e no caso de carregamento excêntrico essa redução foi entre 45% e 75%.

Mais detalhes sobre o procedimento experimental podem ser encontrados na referência de Reichel *et al.* (2013) ou ainda em Milani (2019), o último fez uma análise comparativa de algumas bibliografias sobre cortes em alvenarias, incluindo as referências discutidas anteriormente.

- **Vicente et al. (2014)**

Vicente *et al.* (2014) ampliou e discutiu os resultados de Soares (2012), o qual avaliou o comportamento mecânico das paredes de alvenaria de tijolos furados com cortes para passagens de tubulações. As paredes ensaiadas possuíam dimensões de 1,19 m e 1,22 m de altura e largura, respectivamente. Os cortes foram executados nas direções horizontais, verticais e inclinados, conforme apresentado na Figura 7, mantendo fixas as suas larguras e profundidades. Para os ensaios foram analisadas paredes com e sem preenchimento dos cortes utilizando a argamassa de assentamento.

Figura 7 – Paredes ensaiadas por Soares (2012).



Fonte: Adaptada de Vicente *et al.* (2014).

Os autores constataram que embora a execução de cortes seja uma prática comum, os resultados representaram uma perda significativa da resistência, chegando a uma redução de 40%, referente aos cortes horizontais. Já nos casos de paredes com preenchimento, a resistência chegou a ser reestabelecida, ocorrendo um aumento de até 27% na capacidade de carga.

#### • Milani (2019)

A influência dos cortes no comportamento mecânico das paredes foi avaliada também por Milani (2019), que ensaiou paredes em escala reduzida (1:5) e analisou cortes em diversas posições, direções e profundidades. Foram executados cortes horizontais, verticais e inclinados a 45°. Os cortes horizontais foram realizados na região central e terço superior das paredes, e esses, assim como os inclinados, tiveram profundidade em função da redução da espessura da parede sendo de 20%, 30% e 50%.

O autor também considerou carga excêntrica, porém apenas nas paredes com cortes horizontais e inclinados. A aplicação do carregamento excêntrico teve o objetivo de simular o efeito causado por lajes apoiadas em paredes periféricas numa situação real. Na Tabela 6 constam os dados dos cortes (direção, localização e redução de espessura) e a forma de carregamento (excêntrico ou centrado) aplicado neste estudo e na Figura 8 estão representados os esquemas de cortes. A nomenclatura das paredes segue o padrão: região de corte, profundidade de corte e carregamento. Por exemplo, H20C é referente à parede com corte horizontal com 20% de redução da espessura e carregamento centrado. A nomenclatura HS e I referem-se às paredes com corte horizontal superior e inclinado, respectivamente.

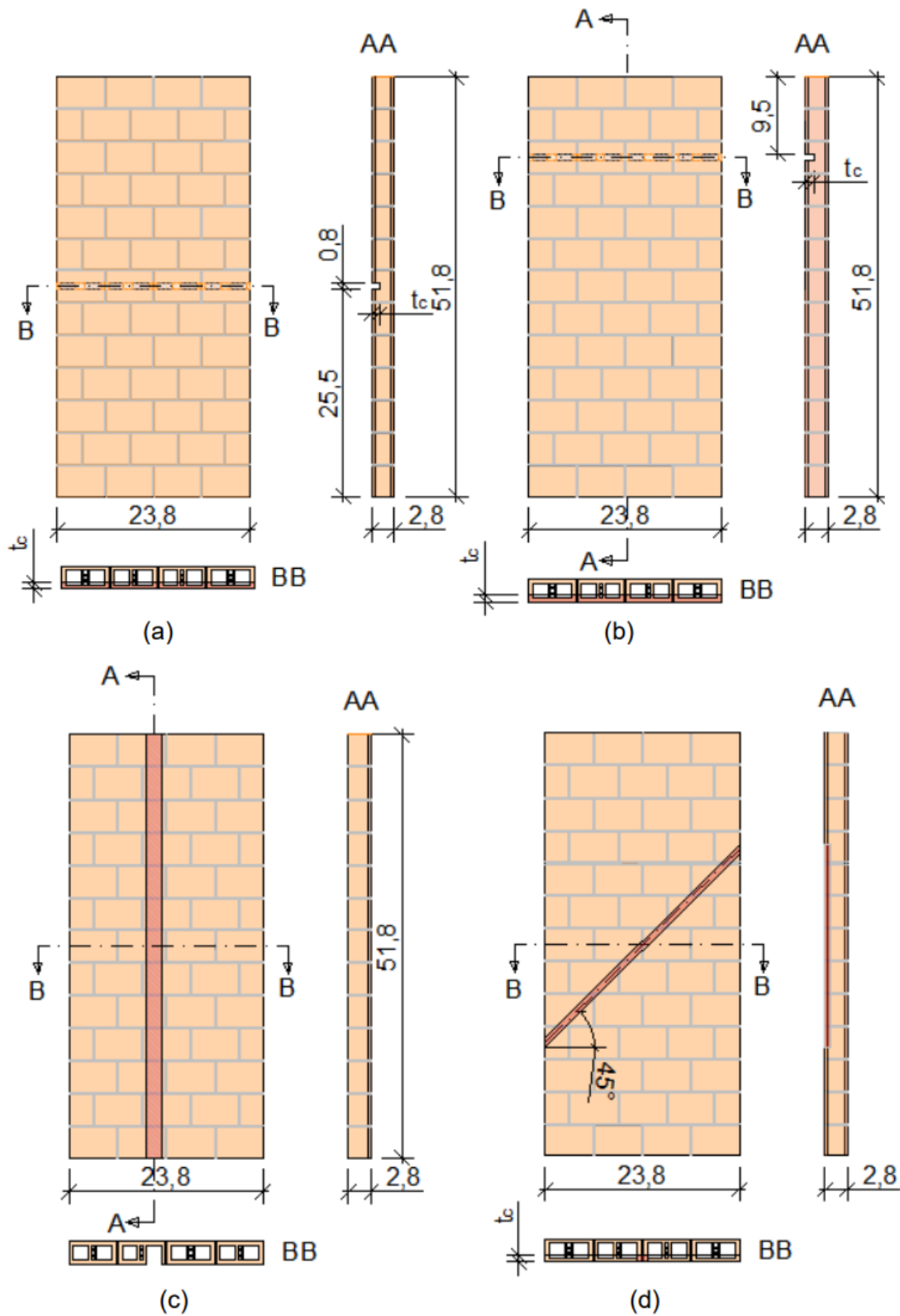
Tabela 6 – Descrição e denominação do programa experimental de Milani (2019).

Parede*	Dados dos cortes			Excentricidade de carga	
	Direção	Localização	Redução espessura		
1	<b>H20C</b>	Horizontal	20%	Não	
2*	<b>H30C</b>		30%	Não	
3*	<b>H30E</b>		50%	Sim	
4	<b>H50C</b>		Superior	30%	Não
5	<b>HS30C</b>			30%	Sim
6	<b>HS30E</b>			Corte septo	Não
7	<b>V</b>	Vertical	Central	30%	Não
8	<b>I30C</b>	Inclinado $\alpha=45^\circ$	Central	30%	Sim
9	<b>I30E</b>		50%	Não	
10	<b>I50C</b>		Sem corte	Não	
11	<b>REF</b>				

Em geral 3 exemplares por esquema estrutural (\* 4 exemplares)

Fonte: Milani (2019).

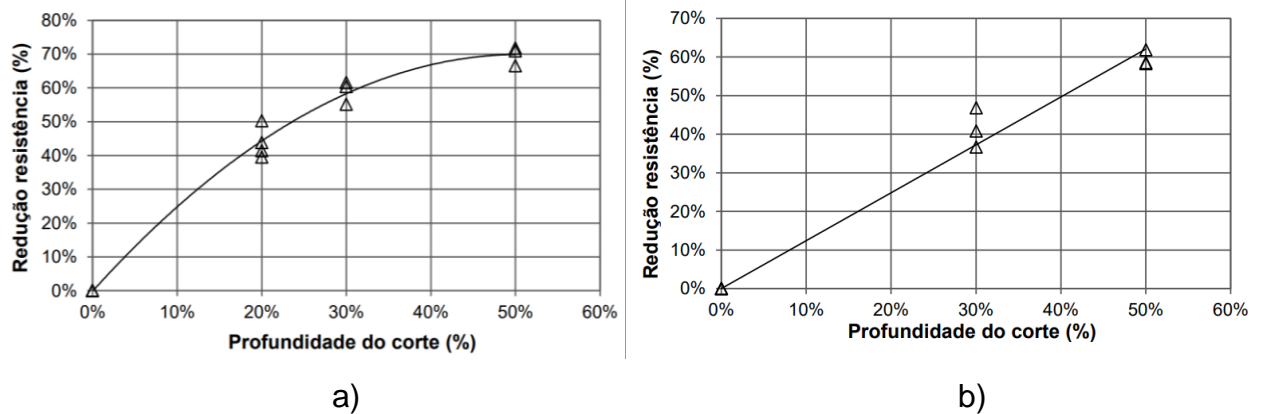
Figura 8 – Esquemas estruturais das paredes com cortes: (a) corte horizontal central; (b) corte horizontal superior; (c) corte vertical; (d) corte inclinado – medidas em centímetros (cm).



Fonte: Milani (2019).

A fim de encontrar relações entre a variação de geometria dos cortes e sua influência no comportamento mecânico da alvenaria, Milani (2019) analisou parâmetros como tensão de ruptura, deformações específicas, modo de falha, entre outros. Na Figura 9 são apresentados gráficos que relacionam a redução da resistência com cortes horizontais à meia altura e inclinados, considerando o comportamento médio das paredes de referência em função da profundidade do corte, expressa em porcentagem de redução da espessura da parede.

Figura 9 – Redução da resistência *versus* profundidade do corte: a) horizontal a meia altura; b) inclinado



Fonte: Milani (2019).

Milani (2019) concluiu que os cortes horizontais reduzem significativamente a capacidade resistente das paredes. Esse fato torna-se mais crítico conforme a profundidade dos cortes é aumentada, porém atenta para a influência mesmo em pequenas profundidades. Houve também uma redução considerável no caso dos cortes inclinados e ao comparar as mesmas profundidades com os cortes horizontais, verificou-se uma perda de resistência mais crítica para os cortes inclinados. Acredita-se que a remoção da parede do bloco, causada pelo corte, destrói sua estrutura celular, ocorrendo desde a menor profundidade testada (MILANI, 2019).

O autor constatou que o modo de ruptura para os cortes horizontais passou a ocorrer por flexão, sendo resultado do deslocamento do centroide devido ao corte. Já no caso dos cortes inclinados com profundidades de 30%, o modo de ruptura foi semelhante à alvenaria sob compressão com expulsão das paredes dos blocos, e nas profundidades de 50% a falha foi caracterizada por flexão.

Ao analisar a interferência do carregamento excêntrico, Milani (2019) verificou



que o mesmo provoca uma perda adicional de resistência para os três tipos de cortes, sendo o caso da parede com corte horizontal superior a mais crítica. Com relação ao modo de falha, no geral, a aplicação de carga excêntrica amplificou o efeito de flexão no caso dos cortes horizontais à meia altura e nos cortes inclinados, modificou o modo de ruptura para flexão onde antes era apresentado um comportamento característico de alvenaria sob compressão.

A tipologia mais afetada pela redução de resistência foi a de corte horizontal à meia altura quando comparado com a parede íntegra. A tipologia de cortes verticais não apresentou diferenças significativas com relação à referência. Assim, constatando-se que tanto a posição quanto a orientação dos cortes são fatores importantes a serem considerados (MILANI, 2019).

Sendo o trabalho experimental de Milani (2019) utilizado como referência para esta pesquisa, os parâmetros encontrados pelo autor serão utilizados a fim de configurar o modelo numérico. Na Tabela 7, constam os resultados encontrados por Milani (2019) utilizados como referência.

Tabela 7 – Resultados obtidos por Milani (2019).

<b>Bloco em escala reduzida</b>			CV
Compressão	Carga de ruptura	33,34 kN	5,59%
	Tensão de ruptura	39,28 MPa	5,59%
Tração	Carga de ruptura	2222,6 N	5,96%
	Tensão de ruptura	3,87 MPa	5,96%
Módulo de elasticidade ( $E_b$ )		10449 MPa	7,67%
Def. na ruptura ( $\epsilon_b$ )		4,22 ‰	5,36%
Massa específica		1,93 g/cm <sup>3</sup>	0,36%
<b>Argamassa</b>			CV
Compressão	Carga de ruptura	9338,8 N	3,15%
	Tensão de ruptura	5,84 MPa	3,15%
Tração na flexão	Carga de ruptura	742 N	15,27%
	Tensão de ruptura	1,74 MPa	15,27%
Módulo de elasticidade ( $E_a$ )		7272 MPa	11,35%
Def. na ruptura ( $\epsilon_a$ )		1,83 ‰	9,87%

Fonte: Adaptada de Milani (2019).

O comportamento do modelo numérico será comparado aos ensaios experimentais de forma a avaliar os resultados de tensão máxima de ruptura, deformação específica, deslocamento fora do plano e modo de ruptura das paredes. Na Tabela 8 constam os valores de tensão máxima para paredes com cortes

horizontais à meia altura, horizontas superiores e inclinados, todos sob carregamento centrado e com as respectivas espessuras de cortes especificadas anteriormente.

Na Tabela 8 é possível verificar a variação de tensão ( $\Delta$ ) em relação à parede de referência, sem corte. Da mesma forma, constam os módulos de deformações e ainda os valores de deslocamentos fora do plano obtidos.

Tabela 8 – Resultados experimentais de Milani (2019) – Tensão de ruptura, deformação e deslocamento.

Parede	Tensão de ruptura		Deformação específica (na carga máxima)			Deslocamento fora do plano
	Média (MPa)	$\Delta$ (%)	Face A méd. (‰)	Face B méd. (‰)	Méd. A e B	Média (mm)
<b>H20C</b>	4,80	-43,7%	1,74	0,77	1,26	0,74
<b>H30C</b>	3,49	-59,0%	1,76	0,40	1,08	1,06
<b>H50C</b>	2,58	-69,8%	1,94	0,29	1,11	0,88
<b>HS30C</b>	4,12	-51,7%	1,75	0,60	1,17	0,19
<b>I30C</b>	5,00	-41,4%	2,08	0,72	1,40	1,11
<b>I50C</b>	3,45	-59,6%	2,02	0,44	1,23	1,35

Fonte: Adaptada de Milani (2019).

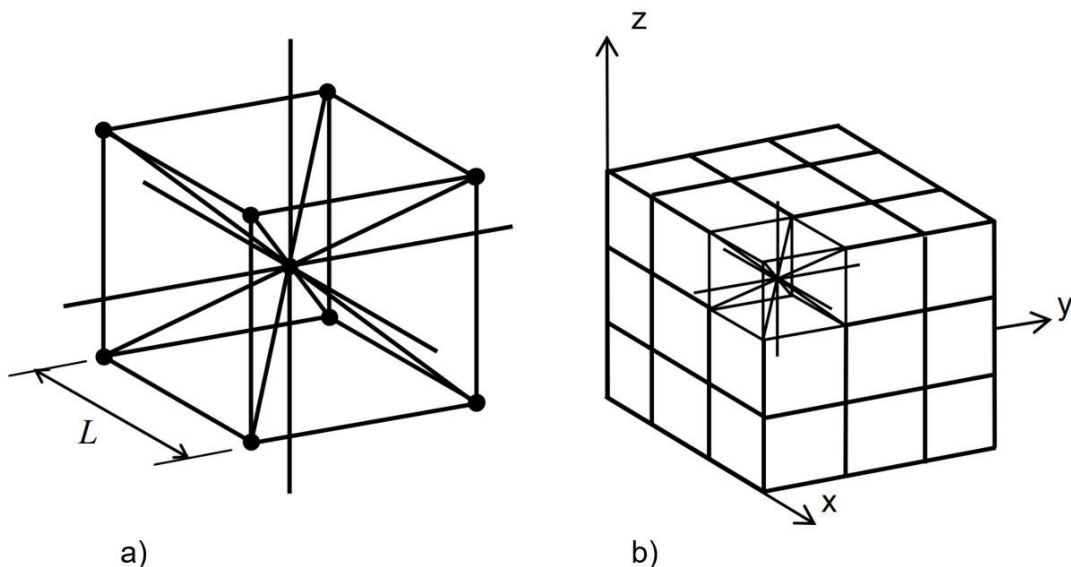
A respeito dos casos considerados neste trabalho, os cortes ocasionaram uma perda significativa da resistência em relação à parede de referência, sendo a perda de resistência proporcional ao aumento de profundidade de corte. Todas as configurações apresentaram deformações específicas na face A superiores às da face oposta ao corte (Face B). Grandes deformações e deslocamentos fora do plano foram obtidos próximo da ruptura, entretanto o caso HS30C apresentou um pequeno deslocamento fora do plano, o que pode ser justificado pela posição do LVDT (MILANI, 2019).

## 2.2. MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS FORMADOS POR BARRAS

As bases teóricas do Método dos Elementos Discretos formado por barras (LDEM) utilizadas nesse estudo podem ser encontradas em vários trabalhos como Kosteski *et al.* (2016), Colpo *et al.* (2017), Silva *et al.* (2020), Vidal *et al.* (2020) e Puglia *et al.* (2019).

No Método dos Elementos Discretos formado por barras, o meio contínuo é representado por intermédio de um arranjo espacial de barras com a massa concentrada em seus extremos (KOSTESKI, 2012). Neste trabalho, o LDEM a ser utilizado foi proposto inicialmente por Riera (1984) baseado na ideia inversa do realizado por Nayfeh e Hefzy (1978). Esse modelo tem por objetivo representar um sólido contínuo por meio da repetição de um módulo cúbico básico, conforme pode ser visualizado na Figura 10, composto por vinte elementos de barras e nove nós sendo que cada nó tem três graus de liberdade, dados pelas componentes do vetor deslocamento referentes às coordenadas globais.

Figura 10 – Discretização utilizada no LDEM. a) modelo cúbico básico, b) geração do corpo prismático.



Fonte: Kosteski (2012).

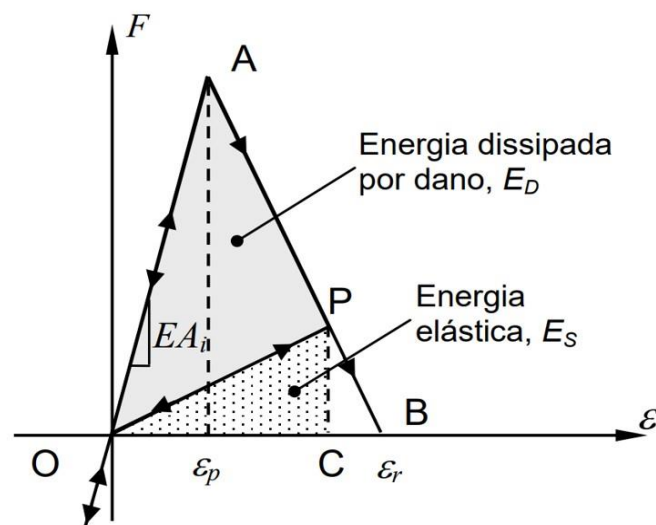
onde:

$L$  – Comprimento do módulo cúbico.

Cada elemento do LDEM tem uma relação constitutiva bilinear, ou também chamada de lei de Hillerborg, devido a que foi baseada na proposta de Hillerborg

(1978), a qual é extensamente utilizada para simular o comportamento de materiais quase frágeis. Além de considerar a fratura frágil, essa lei bilinear permite registrar os efeitos irreversíveis da nucleação e propagação de fissuras considerando a carga e descarga do elemento tensionado. Nesse caso, a relação constitutiva elementar (RCE) considerada relaciona as forças internas aos deslocamentos, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Relações constitutivas elementares do LDEM - lei de Hillerborg.



Fonte: Kostascki (2012).

Dessa forma, a rigidez do elemento é definida pelo produto do módulo de elasticidade ( $E$ ) do material pela área da seção transversal ( $A_i$ ) do mesmo. Sendo  $\varepsilon_p$  a deformação crítica de falha e  $\varepsilon_r$  é a deformação limite. Assim, para um ponto  $P$  na curva força-deformação (Figura 11), a área  $OAP$  representa a densidade de energia dissipada por fratura e a área  $OPC$ , a densidade de energia elástica. Já a área  $OAB$  está relacionada à energia necessária para fraturar o elemento. O elemento falha e perde sua capacidade de carga devido a energia dissipada por dano ser igual à energia de fratura. E então, a descarga é realizada linearmente até a origem.

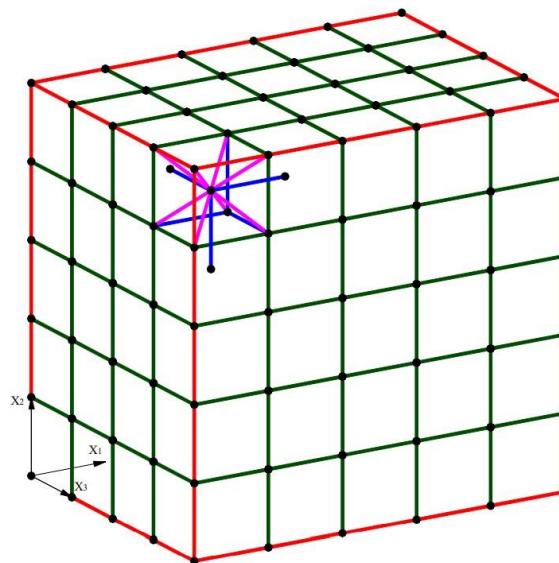
### 2.3. IMPLEMENTAÇÃO DO LDEM NO AMBIENTE ABAQUS/EXPLICIT

Para simular geometrias e condições de contorno mais complexas, costumam ser utilizados modelos mistos, com o objetivo de aproveitar as vantagens de cada modelo e reduzir o custo computacional e o tempo de simulação. Dessa forma, o

LDEM é implementado no *software* comercial *Abaqus/Explicit* de análise de elementos finitos, a fim de criar modelos mistos LDEM+FEM. Essa solução também foi adotada por Murugaratnam *et al.* (2015) e Bandeira (2017).

A implementação do modelo no ambiente *Abaqus/Explicit* é feita de forma que a treliça espacial gerada pela superposição de módulos básicos é gerada no *software* utilizando elementos finitos de barra tridimensional com dois nós. Cada elemento se encontra associado a uma seção, e a cada seção atribui-se um tipo de material. Na disposição cúbica final podem ser identificadas quatro tipos de seções correspondentes a elementos dispostos nas arestas ( $S^A$ ), faces ( $S^C$ ) internos ( $S^I$ ) e diagonais ( $S^D$ ), representadas respectivamente em vermelho, verde, azul e roxo no modelo global visto na Figura 12 (KOSTESKI, 2012).

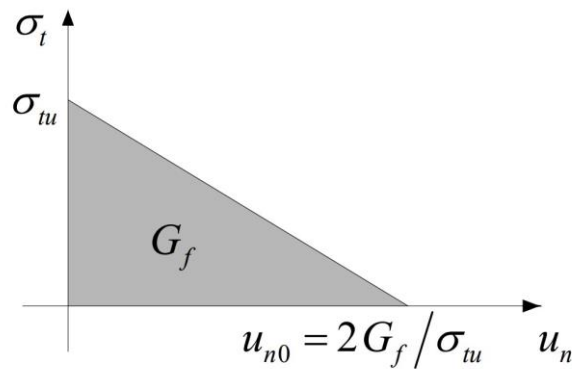
Figura 12 – Modelo cúbico do LDEM com seções modeladas no *Abaqus/Explicit*.



Fonte: Kostascki (2012).

O modo de ruptura de um sólido de concreto no *Abaqus/Explicit* é representado pelo modelo de fissuras distribuídas (Figura 13), que é similar à lei constitutiva bilinear do DEM. No qual o material tem comportamento elástico linear na compressão e também antes de iniciar o dano, e, ainda, os elementos podem ser removidos quando totalmente danificados. O *software* utiliza o modelo de fissuras distribuídas para representar descontinuidades e o comportamento frágil do concreto. Esse modelo de ruptura usa uma taxa de liberação de energia em Modo I e  $G_f$  como parâmetro de fratura (SILVA, 2018).

Figura 13 – Modelo de tensão pós falha versus deslocamento vinculada à energia de fratura utilizado no Abaqus/Explicit.



Fonte: Kostascki (2012).

Na Figura 13,  $u_n$ ,  $u_{n0}$ ,  $\sigma_t$  e  $\sigma_{tu}$  são respectivamente, deslocamento normal, deslocamento máximo do elemento, tensão de tração e tensão onde ocorre o primeiro dano no elemento.

### 2.3.1. Estudos utilizando método numérico LDEM e alvenaria

A utilização de modelos constitutivos mais completos e precisos voltados para a análise numérica de estruturas em alvenaria se tornou possível devido ao avanço computacional e desenvolvimento dos métodos numéricos, permitindo soluções com aproximações satisfatórias do comportamento real da estrutura (OLIVEIRA, 2014).

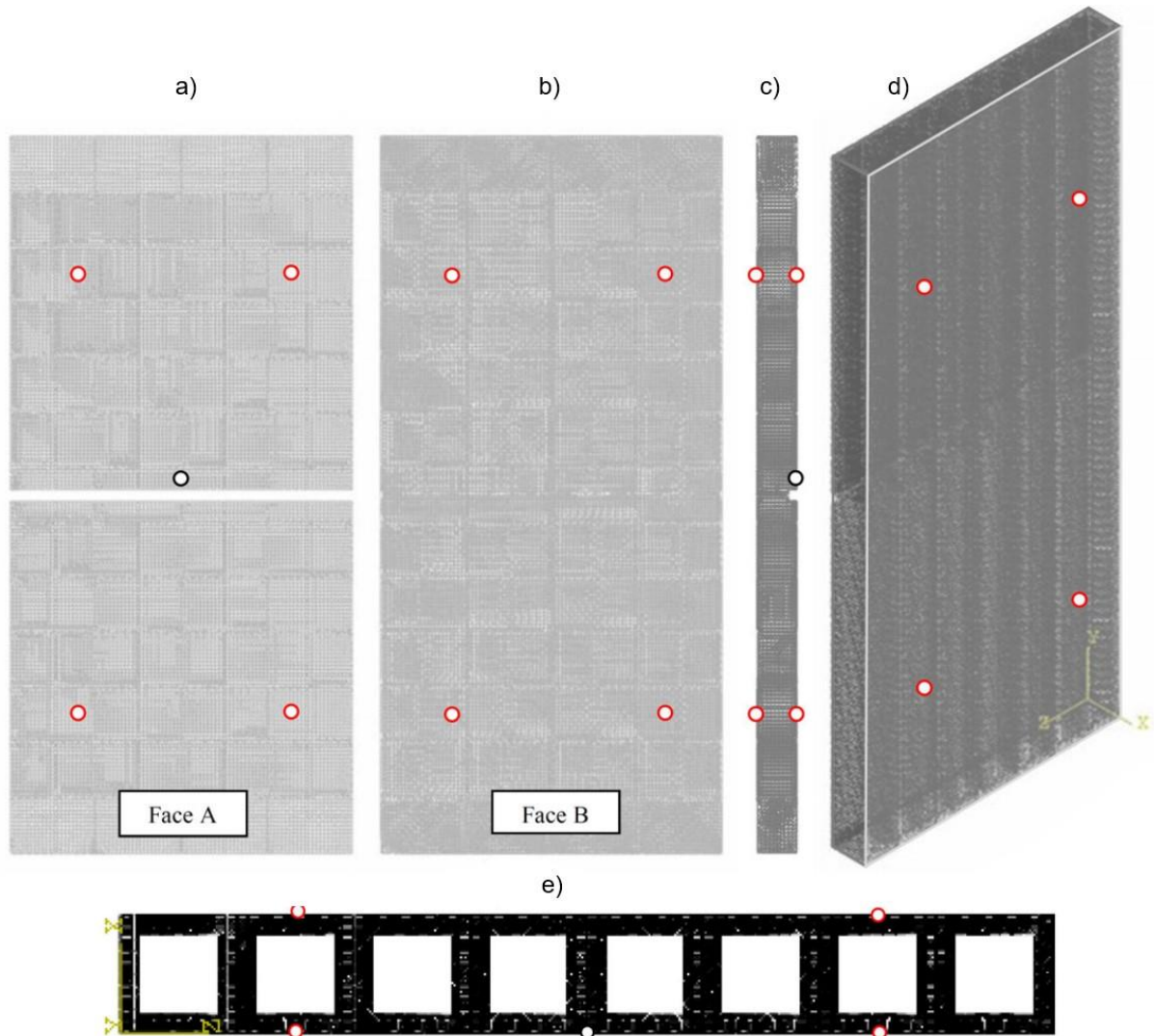
Santos (2014) afirma que para um modelo numérico ser representativo de estruturas de alvenaria, ele deve descrever detalhadamente o comportamento mecânico de cada um de seus componentes, de forma que a representação seja suficientemente precisa. Porém, isso pode acarretar um alto custo computacional e elevado grau de complexidade, por isso, adotam-se diferentes técnicas de modelagem e estratégias para simulações de estruturas de alvenaria.

- **Medeiros (2021) e Medeiros et al. (2022)**

Paredes com cortes foram simuladas numericamente por Medeiros (2021) e Medeiros *et al.* (2022), utilizando o método dos elementos discretos formado por barras (LDEM), o mesmo a ser utilizado neste trabalho. O autor modelou paredes em escala reduzida (1:5) com cortes horizontais de diferentes profundidades submetidas ao carregamento de compressão centrado, de forma a comparar seus resultados com

o estudo experimental de Milani (2019). Foram propostos dois modelos, um mais simplificado, contendo um único material (Figura 14), e outro mais refinado, considerando as juntas de argamassa (Figura 15).

Figura 14 – Modelo simplificado: a) face A ou vista frontal; b) face B ou vista posterior; c) vista lateral da parede modelada; d) vista em perspectiva do modelo da parede com corte de 20% de sua espessura; e) vista superior da parede simulada.

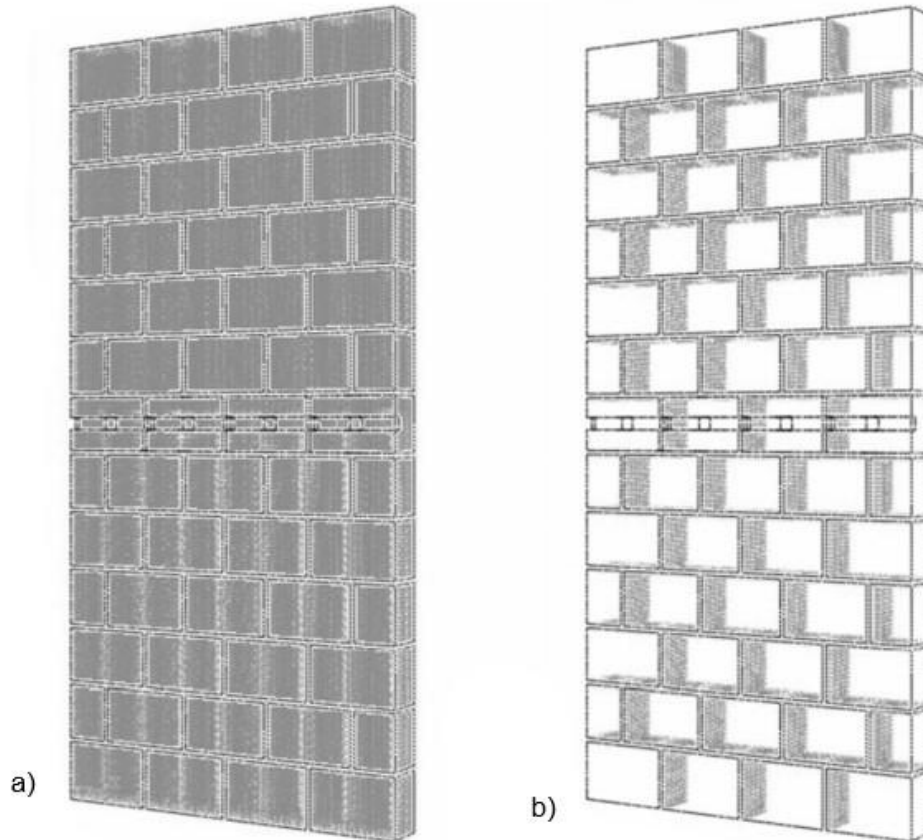


Fonte: Medeiros (2021).

As paredes simuladas em escala reduzida possuem dimensões de 24 x 52 x 2,8 cm de largura, altura e espessura, respectivamente. A profundidade do corte foi representada com uma redução de 20%, 30% e 50% da espessura das paredes. Na Figura 14 a parede com as propriedades homogêneas do bloco possui um corte de 20% de profundidade, na qual estão representados os pontos onde foram realizadas

as medições de deformações específicas (vermelho) e deformações fora do plano (preto).

Figura 15 – Perspectiva da parede cortada em 3D com juntas de argamassa: a) fase de blocos cerâmicos; b) fase de argamassa.



Fonte: Medeiros (2021).

Foram testadas malhas com comprimentos de módulo cúbico básico de  $L = 5,6$  mm,  $L = 2,8$  mm,  $L = 2$  mm e  $L = 1,4$  mm. Adotou-se, então, modelos com  $L = 2,8$  mm devido aos seus resultados satisfatórios e à viabilidade do esforço.

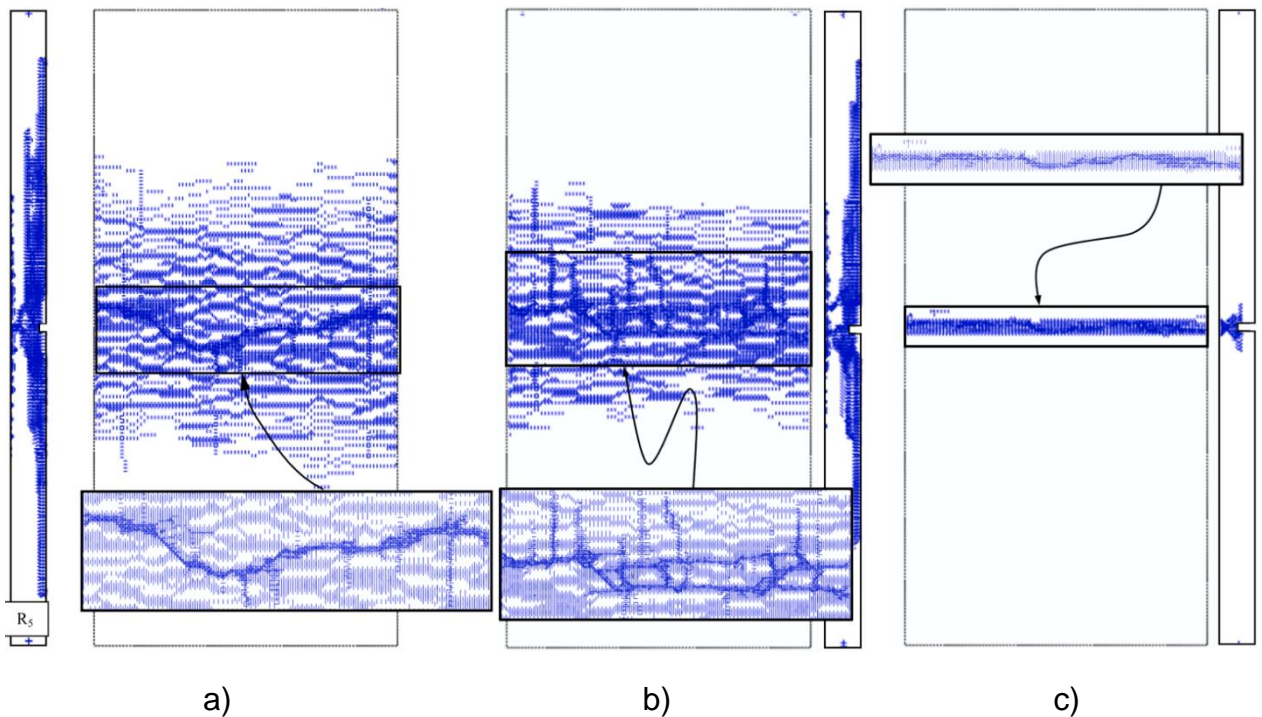
O modelo homogêneo foi simulado com as propriedades do bloco determinadas experimentalmente por Milani (2019). As simulações foram feitas com controle do deslocamento a fim de induzir as forças de reação e com condições de contorno simplesmente apoiada.

Os resultados da parede com corte de 20% de profundidade obtidos pelos testes numéricos de tensão última foram semelhantes aos experimentais. Entretanto a rigidez das paredes se mostrou maior que as experimentais, o que pode ser explicado pela falta da argamassa de assentamento que é a principal responsável pelas deformações e ruptura (MEDEIROS *et al.*, 2022).



Nos casos das paredes com cortes de 30% e 50%, embora a rigidez apresentada tenha sido maior que nos resultados experimentais, as curvas de tensão-deformação específica e deslocamentos fora do plano se mostraram dentro da faixa experimental. A Figura 16 mostra a distribuição de fissuras para os três casos simulados. As paredes com cortes de profundidade de 20% e 30% se comportaram de forma semelhante, a trinca se concentrou primeiro ao redor do corte e então começou a penetrar mais profundamente na parede, principalmente devido aos efeitos da flexão. No caso do corte de 50%, a ruptura se iniciou com trincas de flexão na face oposta ao corte.

Figura 16 – Distribuição de fissuras das paredes homogêneas: a) 20%; b) 30%; c) 50%.



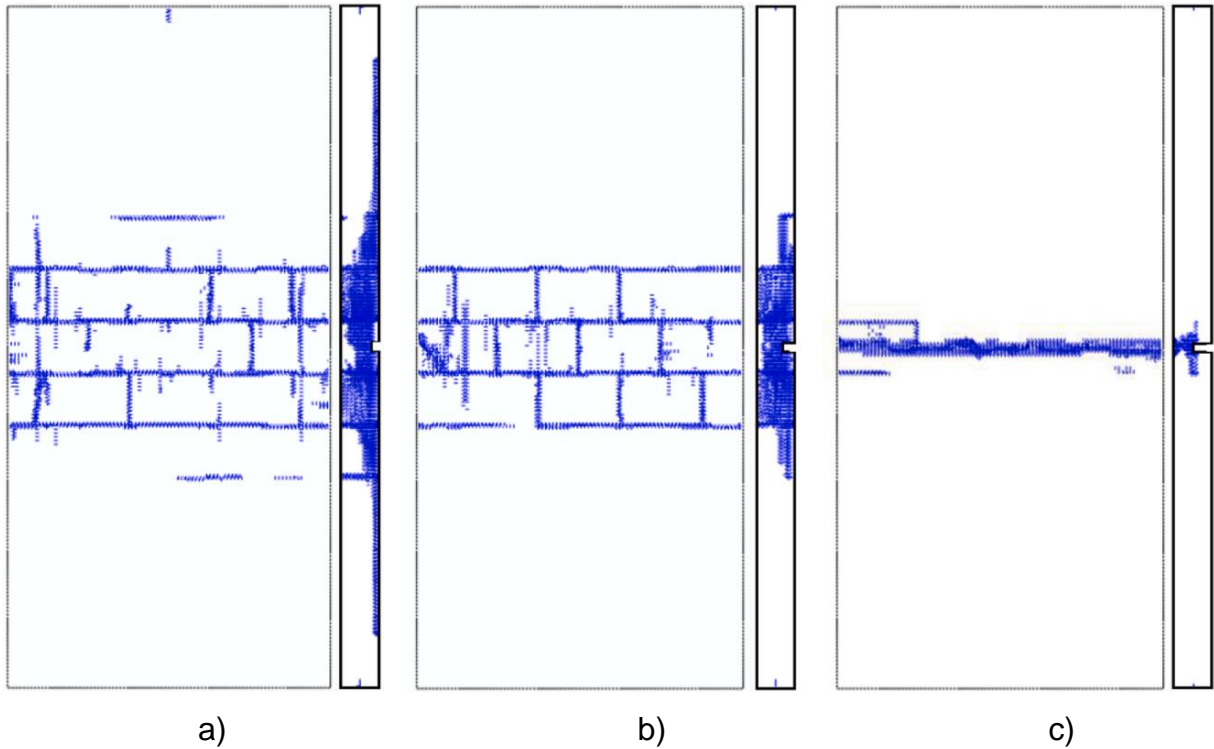
Fonte: Adaptada de Medeiros *et al.* (2022).

Medeiros *et al.* (2022) identificaram que a simulação LDEM com a discretização da argamassa e blocos de assentamento conseguiu representar de forma mais clara os estágios de dano durante o carregamento. As condições de contorno foram iguais ao do modelo anterior.

O modo de ruptura das paredes com as juntas de argamassa nos casos de 20% e 30% ocorreram de forma que as fissuras se iniciaram nos cantos dos cortes e se propagam pela espessura da parede. Dessa forma, as fissuras de flexão formaram uma rotação na posição do corte, ocasionando o colapso da estrutura. Semelhante ao

modelo anterior, a parede com corte de 50% apresentou trincas localizadas no entorno do corte. Os três casos citados estão ilustrados na Figura 17.

Figura 17 – Distribuição de fissuras das paredes com juntas de argamassa: a) 20%; b) 30%; c) 50%.



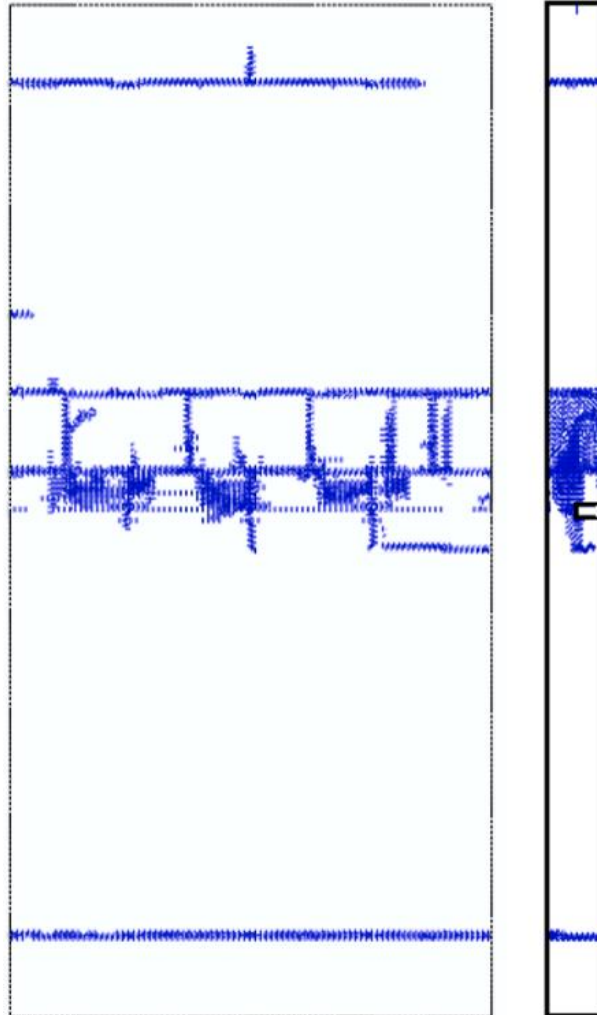
Fonte: Medeiros *et al.* (2022).

O mecanismo de ruptura e as deformações foram compatíveis com os experimentais para os cortes de 20% e 30% das paredes com juntas de argamassa. Já para o corte de 50% esse modelo LDEM não conseguiu reproduzir com exatidão a ruptura observada experimentalmente. Medeiros *et al.* (2022) ressaltam que as condições de contorno experimentais são difíceis de representar de forma simples com esse método, sendo esta a possível razão para as diferenças encontradas.

A fim de representar a ruptura obtida experimentalmente nas paredes com cortes de 50%, utilizando o modelo com as juntas de argamassa e bloco cerâmico, foram alteradas as condições de contorno de modo que uma extremidade fosse fixada e a outra simplesmente apoiada. Assim, além de alterar o modo de ruptura, a rigidez e a resistência da parede aumentaram. Na Figura 18 é possível observar o modo de falha da parede, em que as fissuras iniciaram no canto do corte se propagando verticalmente até atingir a argamassa, prolongando-se através dela até atingir a face

frontal. As fissuras continuaram propagando-se através das camadas de argamassa até ocorrer o colapso da estrutura por flexão (MEDEIROS *et al.*, 2022).

Figura 18 – Distribuição de fissuras das paredes com juntas de argamassa com condições de contorno alteradas (50%).



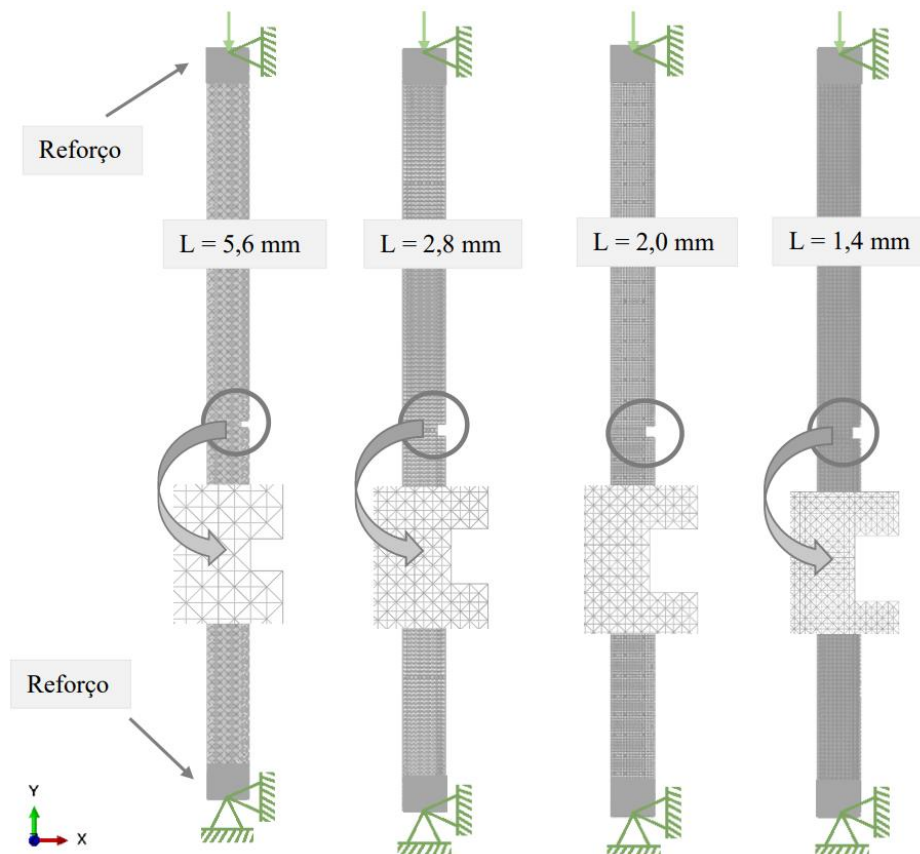
Fonte: Adaptada de Medeiros *et al.* (2022).

- Zydeck (2022)

Zydeck (2022) utilizou o Método dos Elementos Discretos formado por barras (LDEM) para simular o comportamento mecânico de paredes em escala reduzida (1:5) de alvenaria estrutural com cortes horizontais. Através de um modelo simplificado em estado plano de deformações (2D), foram simuladas malhas com diferentes comprimentos de módulo cúbico básico ( $L$ ) a fim de obter resultados semelhantes aos experimentais de Milani (2019).

Na Figura 19 estão representadas as malhas analisadas a fim de se obter um custo-benefício computacional e um refinamento a nível aceitável dos resultados. A condição de contorno adotada foi do tipo apoio simples rotulada na parte inferior e na parte superior da parede nos eixos  $x$  e  $y$ . É possível observar na imagem que as extremidades das paredes estão mais escuras, já que nesses locais foi necessário aumentar a resistência do material pois a ruptura se iniciava nas extremidades devido à concentração de tensões nos apoios simulados (ZYDECK, 2022).

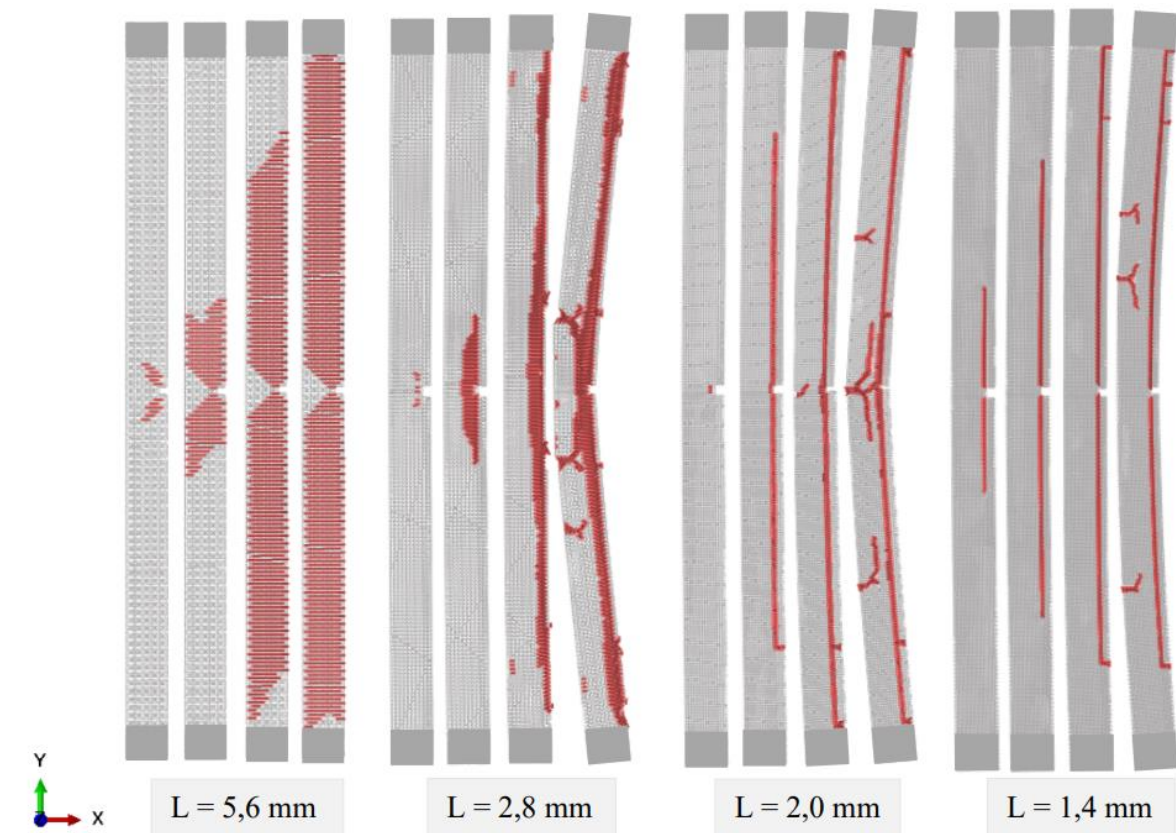
Figura 19 – Detalhamento das malhas estudadas, com os respectivos comprimentos do LDEM.



Fonte: Zydeck (2022).

A simulação de teste de malha foi realizada em paredes com cortes de 20% de redução da espessura. Na Figura 20 estão apresentadas as configurações de falha para cada comprimento de malha citado. Os resultados mais satisfatórios combinados com a viabilidade do esforço computacional foram obtidos com as malhas de  $L=2,8$  mm e  $L=2$  mm, Zydeck (2022) adotou a malha de 2 mm para dar continuidade às simulações por ter apresentado uma tensão de ruptura mais próxima da experimental.

Figura 20 – Configuração de falha deformada para cada comprimento do LDEM simulado.



Fonte: Zydeck (2022).

Zydeck (2022) utilizou duas alternativas para eliminar os efeitos das concentrações de tensões nos apoios, simulando toda a parede com elementos discretos e reforçando as extremidades ou simulando parte da parede com elementos finitos lineares elásticos. Porém, a interface entre os dois métodos no último caso resultou em um maior tempo de análise computacional.

Diferentes condições de contorno foram testadas, sendo apoios do tipo rotulado-rotulado (RO – RO) e do tipo engastado-rotulado (EN – RO). Ao simular os modelos com a parede homogeneizada, nos dois casos a fissura iniciou no corte, no caso RO – RO a propagação ocorreu de forma igual para em direção a parte inferior

e superior. Já no caso EN – RO, a fissura se propagou inicialmente na direção superior até atingir o apoio e após isso houve a propagação em direção ao apoio inferior.

Nos modelos com discretização dos blocos e argamassa o mecanismo ruptura foi semelhante ao modelo homogêneo, no entanto, havia fissuras horizontais que se propagavam ao longo das camadas de argamassa. Na Tabela 9 são apresentados os resultados de tensão de compressão máxima obtidos por Zydeck (2022) em comparação com os valores obtidos experimentalmente.

Tabela 9 – Resistência dos modelos simulados por Zydeck (2022).

Configuração da parede	Modelos Simulados	Condições		Milani (2019) MPa	
		RO - RO MPa	EN - RO MPa		
20% corte e carregamento central	LDEM <sup>2)</sup>	5,40	6,41	4,80	
	Parede homogeneizada LDEM + 7FEM <sup>3)</sup>	5,19	6,37		
	Parede homogeneizada com Módulo equivalente <sup>1)</sup>	LDEM <sup>2)</sup>	7,00		8,17
	LDEM + FEM <sup>4)</sup>	7,23	8,30		
20% corte e carregamento central		6,70	7,20		
30% corte e carregamento central		5,54	5,97	3,49	
50% corte e carregamento central		2,67	3,17	2,58	
30% corte central com excentricidade	Bloco + argamassa LDEM <sup>2)</sup>	4,10	5,00	3,15	
30% corte superior com excentricidade		3,79	4,02	2,36	
30% corte superior e carregamento central		5,68	5,87	4,12	

1) Módulo de elasticidade equivalente a área bruta;

2) Parede toda com elementos discretos, reforço na região dos apoios;

3) Modelo LDEM com reforço de FEM em 7 módulos;

4) Parede com LDEM acrescida de uma simulação das bases da prensa por meio de placas de aço nas extremidades da parede, essas simuladas com FEM.

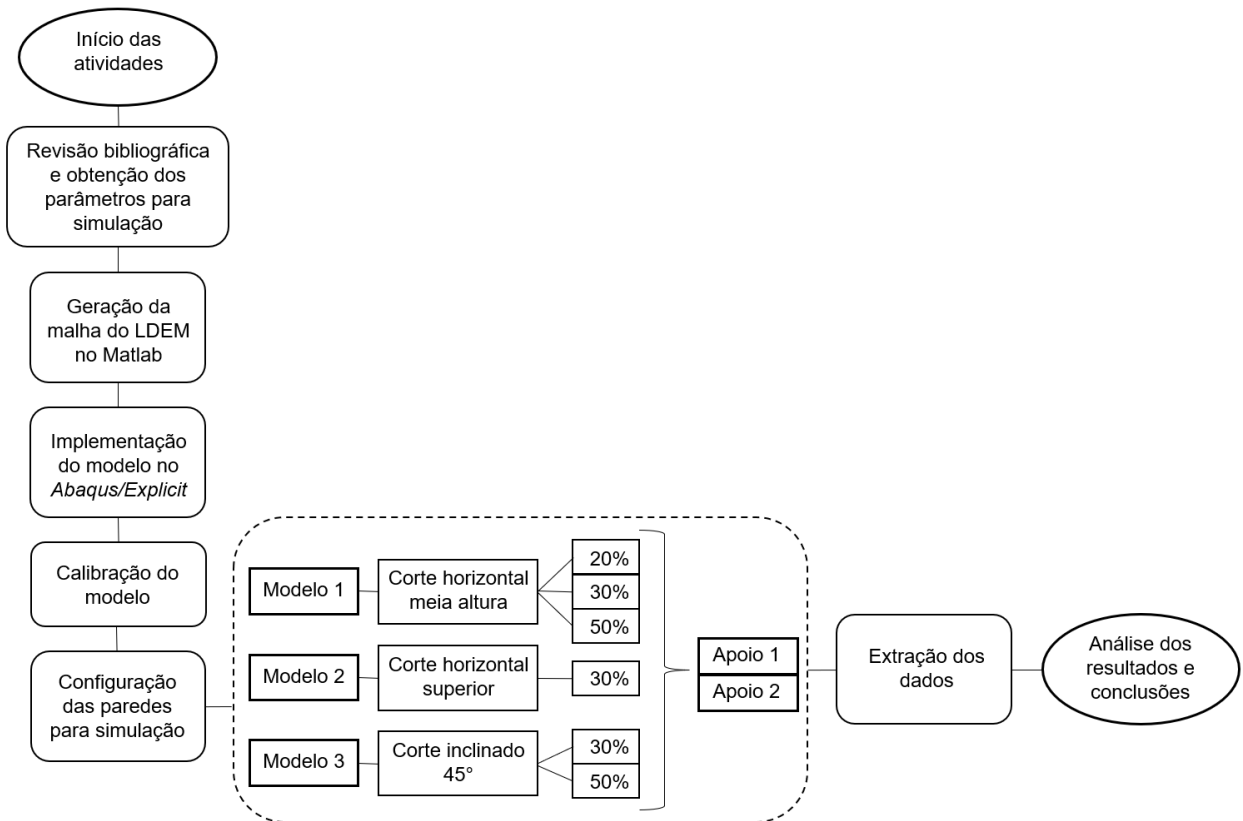
Fonte: Adaptada de Zydeck (2022).

### 3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste capítulo é apresentada a metodologia seguida para o desenvolvimento desta pesquisa, que contempla os seguintes itens: a calibração do modelo e as propriedades adotadas para a simulação dos ensaios. A Figura 21 esquematiza os procedimentos realizados a fim de executar a simulação dos modelos tridimensionais de ensaios de compressão em paredes em escala reduzida 1:5, analisando o comportamento mecânico de paredes com cortes horizontais à meia altura, superiores e inclinados a 45°. Os cortes tem suas profundidades definidas em relação à redução da espessura da parede, havendo uma redução de 20% de espessura nas paredes com cortes horizontais à meia altura, 30% de redução nas paredes com cortes horizontais, centrais, superiores e inclinados, e a maior redução de 50% é aplicada nas paredes com cortes horizontais na região central e inclinados. O carregamento de compressão foi aplicado de forma centrada nas paredes e foram utilizadas diferentes condições de contorno a fim de se obter o melhor desempenho do modelo. Os parâmetros utilizados para as simulações são baseados nos ensaios experimentais de Milani (2019), considerando as paredes em escala reduzida 1:5.



Figura 21 – Esquema das atividades da pesquisa.



Fonte: Elaboração própria.

### 3.1. DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES E MALHA UTILIZADAS

Os parâmetros necessários para a definição do modelo são: módulo de elasticidade ( $E$ ), densidade ( $\rho$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), deformação crítica de falha ( $\epsilon_p$ ), energia de fratura e fator de falha, os quais são obtidos a partir das propriedades da Tabela 7. O coeficiente de Poisson utilizado é de 0,25, considerado como limite para este método numérico. A massa específica é considerada constante para toda a parede como  $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$ , com base em Zydeck (2021) e Medeiros (2021).

A deformação crítica ( $\epsilon_p$ ) de falha é definida por:

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

Assim, a deformação crítica  $\epsilon_p$  da lei constitutiva bilinear é obtida por meio da resistência à tração do bloco (3,87 MPa), assim a deformação crítica do bloco é  $\epsilon_{pB} =$

$3,704 \cdot 10^{-4}$ . Da mesma forma, a deformação crítica da argamassa é definida como  $\varepsilon_{pA} = 2,393 \cdot 10^{-4}$ .

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

$$G_f = 25(f_c/10)^{0,7}. \quad \dots(2)$$

A versão mais recente CEB-FIP Model Code 2010 (2013) determina a seguinte equação:

$$G_f = 73f_{cm}^{0,18}, \quad \dots(3)$$

onde  $f_{cm}$  é referente ao valor médio correspondente à resistência à compressão. As equações (1) e (2) são indicadas para estruturas de concreto, entretanto, são usadas nesse caso para que seja possível a determinação da energia de fratura dos blocos cerâmicos e da argamassa de assentamento.

Nesse caso foi utilizada a equação (1), devido ao fato de ter se mostrado como melhor opção dentre os resultados obtidos, tomando como referência Medeiros (2021). Dessa forma, a energia de fratura encontrada para o bloco e argamassa são, respectivamente, 65 N/m e 17 N/m, considerando a tensão de ruptura na compressão de cada material especificados na Tabela 7.

Na Tabela 10 são mostradas as propriedades utilizadas nas simulações numéricas das paredes em escala reduzida. O valor de  $\varepsilon_p$  é uma propriedade da relação constitutiva, sendo que  $E$  e  $\sigma_{tu}$  são propriedades do material. Então este parâmetro será melhor analisado na seção 3.2.

Tabela 10 – Propriedades utilizadas no modelo numérico.

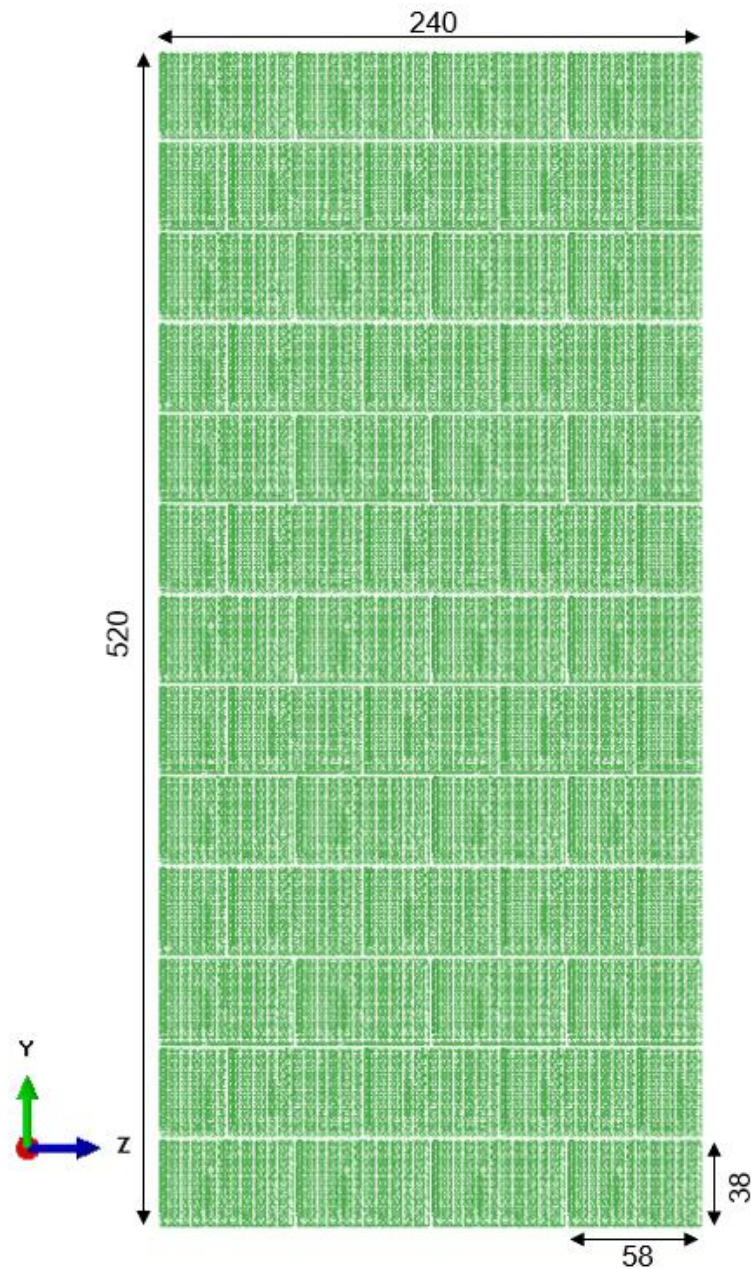
<b>Propriedades</b>	<b>Material 1 Bloco</b>	<b>Material 2 Argamassa</b>
$E$ (MPa)	10449	7272
$\nu$	0,25	0,25
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1900	1900
$\varepsilon_p$	3,704E-04	2,393E-04
$G_f$ (N/m)	65	17

Fonte: Elaboração própria.

Com relação à definição da malha do modelo a ser utilizada, Zydeck (2022) e Medeiros (2021) testaram diferentes módulos de comprimento básico LDEM, tanto para paredes em 2D como 3D. Medeiros (2021) utilizou um tamanho de módulo cúbico básico de 2,8mm em seu trabalho, já Zydeck (2022) utilizou 2mm. Considerando a viabilidade do esforço computacional e a obtenção de resultados representativos, foi adotado o comprimento do módulo cúbico básico de 2 mm (Figura 19).

Após a aplicação dos parâmetros, o modelo é gerado no *software MATLAB* e então carregado no *Abaqus/Explicit* para completar as condições de ensaio. As paredes em escala reduzida (1:5) possuem dimensões nominais de 24 cm de largura e 52 cm de altura (Figura 22), constituídas por blocos com 2,8 cm x 3,8 cm x 5,8 cm de largura, altura e comprimento, respectivamente. A argamassa de assentamento possui uma espessura de 2 mm. A fim de comparar os resultados com os ensaios experimentais de Milani (2019), utilizam-se as mesmas dimensões das paredes em escala reduzida produzidas experimentalmente.

Figura 22 – Vista frontal da parede íntegra em escala reduzida 1:5 – dimensões em milímetros (mm).

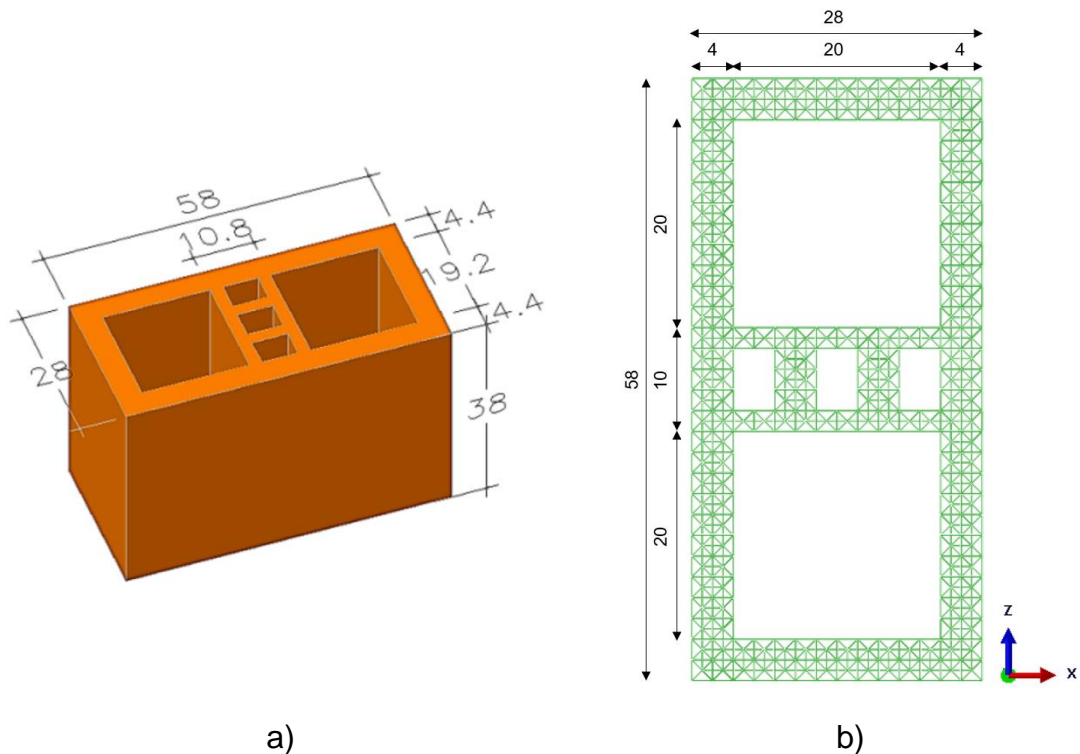


Fonte: Elaboração própria.

O modelo que compõe as paredes é constituído por dois materiais diferentes, o bloco cerâmico e a argamassa de assentamento, considerando que esses materiais estejam perfeitamente colados. O modelo numérico tridimensional contém a presença de septos compatíveis aos dos blocos utilizados no estudo experimental, na Figura 23 é possível visualizar o bloco em pequena escala produzido experimentalmente e o

modelo numérico. As diferenças de dimensões se dão pelo fato de o comprimento do módulo cúbico básico ser um valor inteiro (2 mm).

Figura 23 – Blocos em escala reduzida (1:5): a) experimentais de Milani (2019) e b) do modelo numérico – dimensões em milímetros (mm).

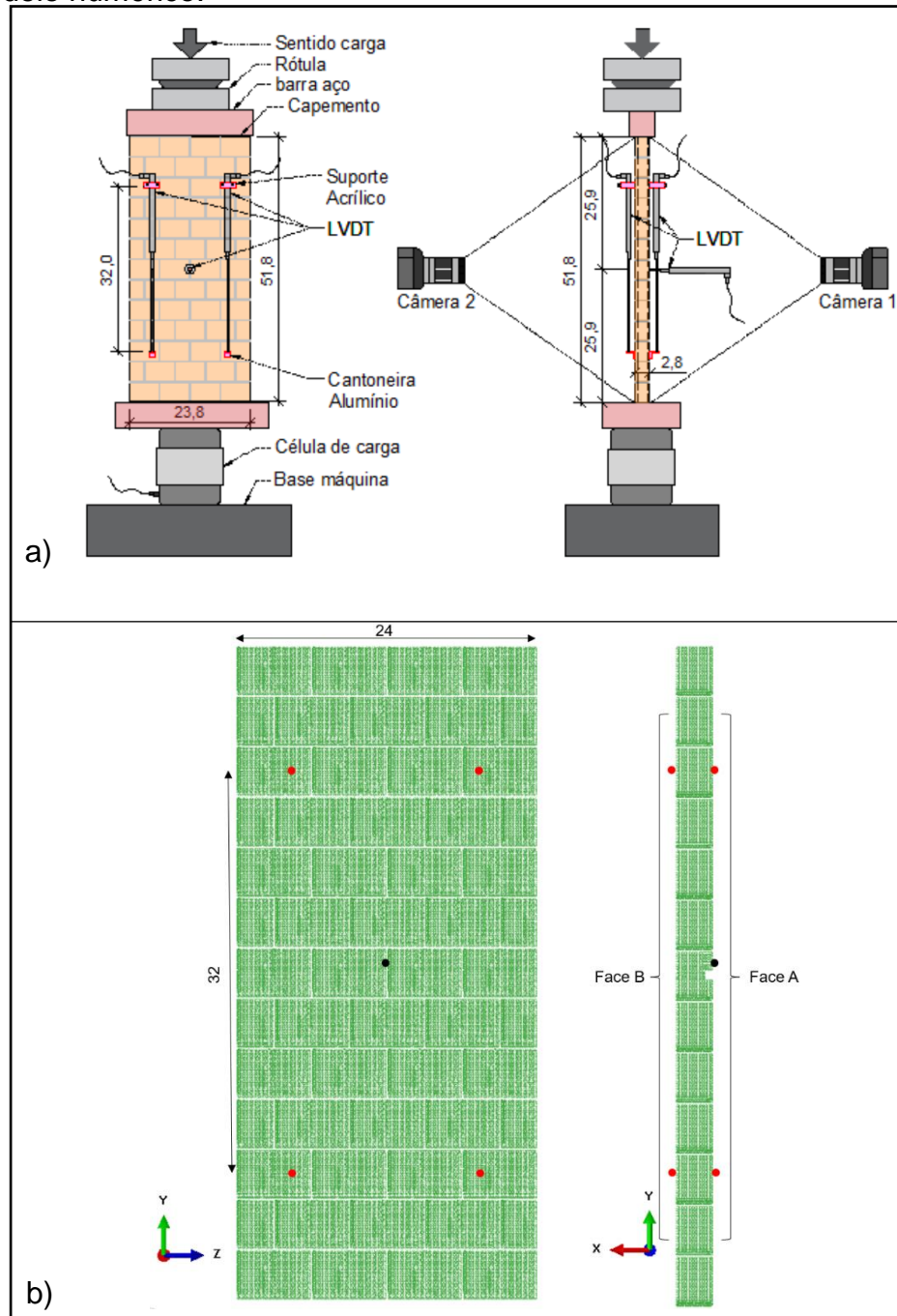


Fonte: Elaboração própria.

Nos ensaios experimentais, as paredes foram ensaiadas à compressão e instrumentadas com LVDTs para verificar a sua deformação de flexão. O carregamento foi aplicado por meio da máquina de ensaio universal INSTRON (modelo 5590-HVL), sendo transmitido no travessão superior por uma rótula acoplada a uma barra de aço de grande rigidez para a distribuição do carregamento. Já na parte inferior, foi utilizada uma célula de carga e sobre ela uma placa, para que o carregamento seja aplicado de forma distribuída. A taxa de carregamento utilizada foi de 0,25 mm/min, aplicando-o com dois ciclos até aproximadamente 30% da carga de ruptura, a fim de uniformizar as deformações.

Para realizar as medições das deformações específicas e deslocamentos fora do plano são analisados módulos do modelo que coincidam com os pontos onde foram instalados os LVDTs. Assim, na Figura 24 é possível visualizar o esquema de instalação dos LVDTs utilizado por Milani (2019) e os pontos onde foram medidos os deslocamentos e deformações no modelo numérico 3D.

Figura 24 – Pontos de medição de deslocamentos e deformações de a) Milani (2019) e b) do modelo numérico.



Fonte: Elaboração própria.

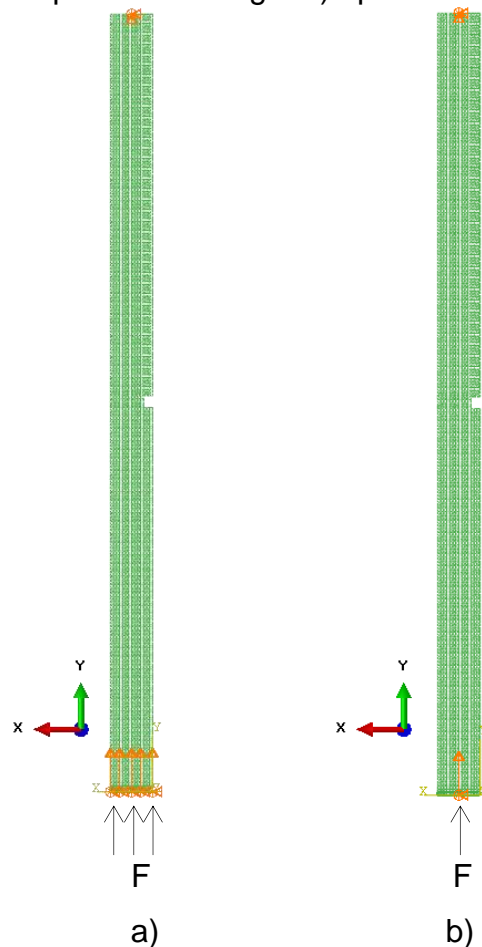
Os pontos em vermelho na Figura 24b) mostram a localização dos módulos onde foi determinada a deformação específica da parede, e o ponto em preto é referente à determinação do deslocamento fora do plano, no centro da parede, imediatamente acima do corte horizontal central.

Quanto às condições de contorno, foram consideradas duas situações para simular as paredes em pequena escala com cortes, na Figura 25 estão representados os dois tipos de apoios aplicados ao modelo. No apoio do tipo 1 o topo da parede foi considerado rotulado com restrição de deslocamento nos eixos x, y e z e a base foi engastada. O apoio do tipo 2 se difere apenas por ser rotulado na base, em ambos os casos a força foi aplicada na base da parede. A necessidade de alterar as condições de contorno se dá pelo fato de que as condições contorno experimentais são difíceis de representar com este método, já que em condições reais não são perfeitamente fixas ou simplesmente apoiadas (MEDEIROS *et al.*, 2022).

No trabalho de Zydeck (2022) foram testadas outras condições de contorno em modelos 2D porém se observou que as duas condições a serem utilizadas aqui são as que apresentaram melhores resultados e não geraram distorções excessivas ou erros de convergência nos contatos.

Embora se baseando no método e em parâmetros utilizados por Medeiros (2021) e Zydeck (2022), esta pesquisa se difere do primeiro por utilizar comprimento do módulo cúbico básico de 2 mm, além do programa de modelos numéricos incluir paredes com cortes horizontais centrais, superiores e inclinados, aplicando diferentes condições de contorno em todos os casos. Já em relação à Zydeck (2022), o diferencial se dá também pela ampliação no programa de simulações, assim como o estudo do modelo em estado tridimensional (3D) e ainda pela análise do comportamento das curvas de energias durante o processo de ruptura dos elementos.

Figura 25 – Vista lateral do modelo tridimensional com os apoios utilizados na simulação: a) apoio do tipo 1 – Rot/Eng e b) apoio do tipo 2 – Rot/Rot.



Fonte: Elaboração própria.

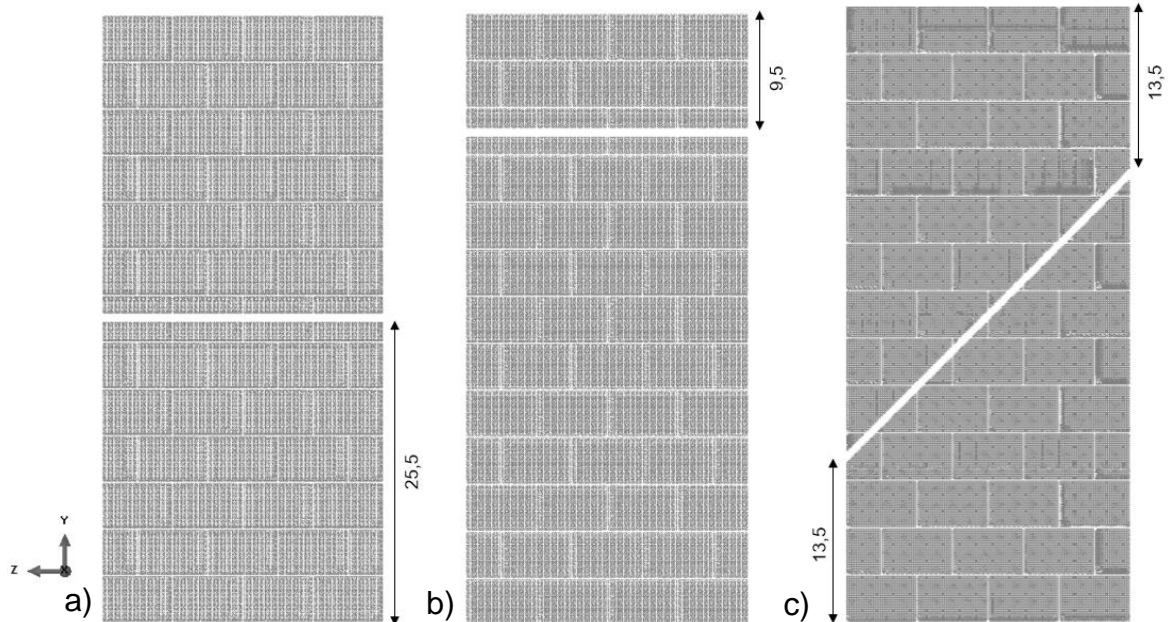
Também no trabalho de Zydeck (2022) se verificou que a melhor forma de evitar a concentração de tensões nos apoios ou pontos de aplicação do carregamento é aplicar um material reforçado nessa região. Desta forma foram reforçados 10 módulos acima e abaixo das bases inferiores e superiores, respectivamente, alterando a sua resistência à tração.

As paredes em escala reduzida serão simuladas conforme as configurações da Figura 26. Sendo com corte horizontal central (H), corte horizontal superior (HS) e corte inclinado (I), todas com carregamento aplicado de forma centrada. As dimensões referentes às posições dos cortes seguem o esquema da Figura 8. A nomenclatura adotada segue o padrão configuração e espessura do corte e aplicação da carga, por exemplo, H20C para denominar parede com corte à meia altura com 20% de redução da espessura e carregamento centrado. Na Tabela 11 consta um ilustrativo dos



percentuais de redução da espessura do modelo numérico em relação aos blocos fabricados para os ensaios experimentais de Milani (2019).

Figura 26 – 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: Elaboração própria.

Tabela 11 – Profundidades dos cortes.

% redução da espessura	Milani (2019)	Modelo numérico LDEM
20%		
30%		
50%		

tc - redução da espessura

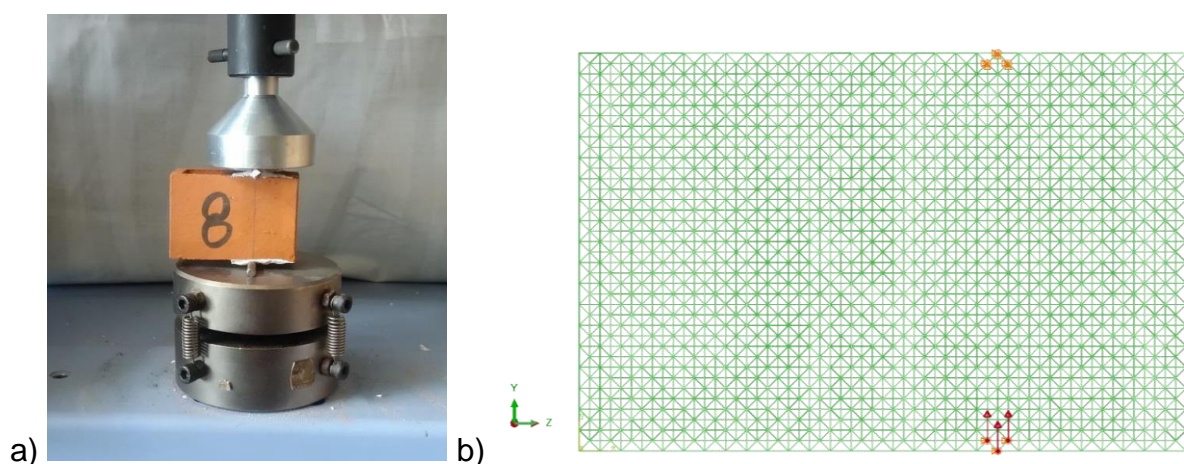
Fonte: Elaboração própria.

### 3.2. CALIBRAÇÃO DO MODELO

Como citado anteriormente o valor do parâmetro  $\varepsilon_p$  é de suma importância para encontrar uma resposta adequada. Desta forma, nesta seção, se calibra esse parâmetro correspondente da lei constitutiva do material (ver Figura 11) simulando o ensaio de resistência à tração por compressão conforme realizado experimentalmente. Neste caso um único bloco foi simulado, alterando unicamente o valor da deformação crítica,  $\varepsilon_p$ , e conseqüentemente a força máxima que resiste cada elemento, permanecendo todos os outros parâmetros da relação constitutiva constantes. Nesta calibração se procurou que a resistência a tração máxima e o modo de falha fossem semelhantes aos obtidos experimentalmente.

No ensaio experimental, o carregamento foi aplicado nos blocos de escala reduzida através de um par de barras de aço com diâmetro de 3,9 mm, posicionadas à uma distância igual à metade da altura medida a partir da extremidade do bloco. Obedecendo essa distância para colocação dos apoios, o modelo numérico foi simulado na condição rotulado na base inferior e superior. Na Figura 27 é apresentada as configurações de ensaio experimental feito por Milani (2019) e numérico. Os apoios foram aplicados em três módulos, nesse caso, para que houvesse uma distribuição do carregamento semelhante às condições reais.

Figura 27 – Ensaio de tração à compressão do bloco: a) experimental e b) numérico.



Fonte: Elaboração própria.

Milani (2019) obteve uma resistência à tração na compressão média de 3,87 MPa. Foram testados diferentes valores de deformação crítica (ver Tabela 12) e se

obteve que a melhor resposta utilizando  $\varepsilon_p = 1,407 \cdot 10^{-3}$ , que corresponde a uma tensão máxima no elemento do LDEM de 14,71 MPa (3,8 vezes maior que a resistência a ser alcançada). Com estas propriedades o bloco simulado atingiu uma resistência à tração na compressão de 4 MPa.

Tabela 12 – Calibração do modelo.

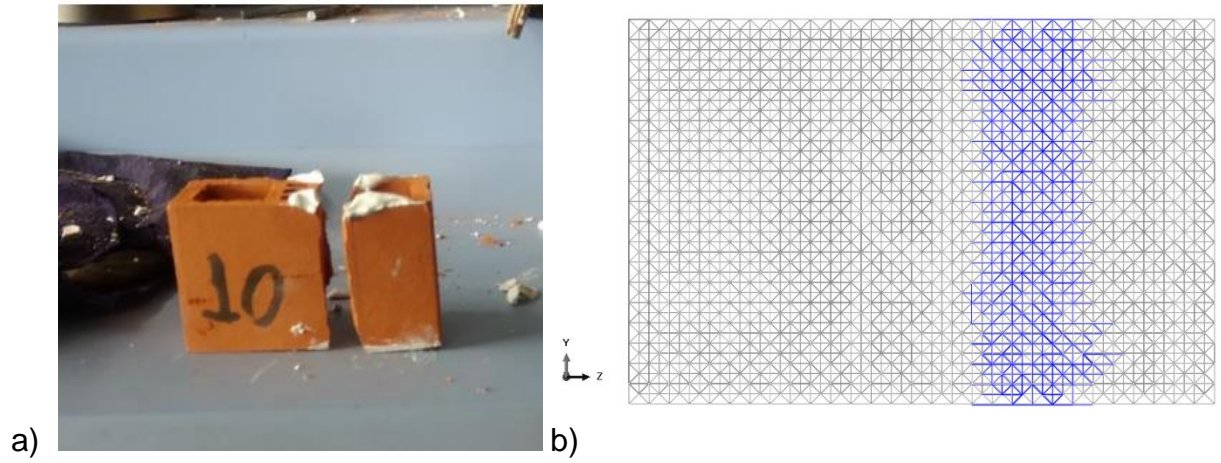
<b>Simulação</b>	<b><math>G_f</math></b> N/m	<b><math>\sigma_F</math></b> MPa	<b><math>\varepsilon_p</math></b> -	<b><math>\sigma_t</math></b> MPa
1	65	3,87	3,704E-04	1,99
2	100	17,42	1,667E-03	4,58
3	65	17,42	1,667E-03	4,51
4	65	13,55	1,296E-03	3,70
5	65	15,09	1,444E-03	3,97
6	65	14,32	1,370E-03	3,70
7	65	14,71	1,407E-03	4,01

$G_f$  - Energia de fratura  
 $\sigma_F$  - Tensão máxima de entrada  
 $\varepsilon_p$  - Deformação crítica  
 $\sigma_t$  - Resistência à tração obtida

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 28 é apresentado o modo de falha do bloco a) experimental e b) numérico quando submetidos à tração indireta. Como se pode observar na figura com os ajustes de parâmetros realizado a simulação conseguiu representar o modo de falha do bloco real. Os elementos destacados em azul na Figura 28b) são as barras que não resistiram, ou seja, por onde ocorre a ruptura no modelo.

Figura 28 – Modo de ruptura do bloco: a) experimental e b) numérico.



Fonte: Elaboração própria.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

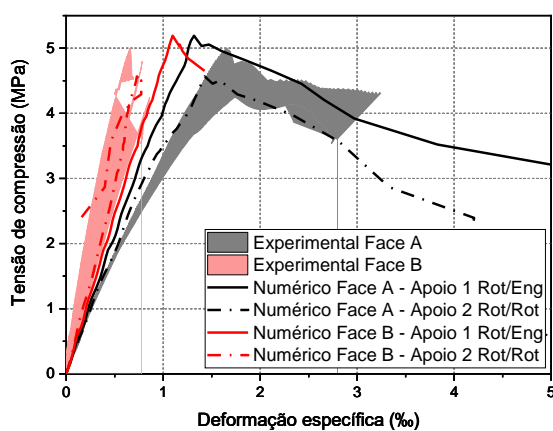
A seguir são apresentados os resultados obtidos nas simulações numéricas utilizando o LDEM para os diferentes cortes realizados. Para analisar o grau de precisão das simulações, é feita uma comparação com os resultados experimentais, nos quais se basearam as simulações.

### 4.1. PAREDE COM CORTE HORIZONTAL CENTRAL DE 20% DE PROFUNDIDADE (H20C)

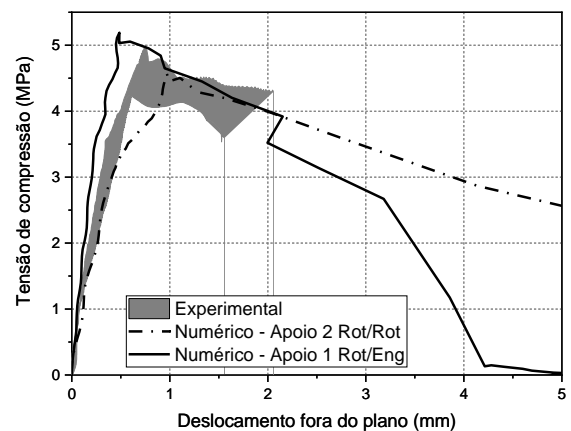
A Figura 29a) mostra a curva tensão de compressão versus deformação específica encontrada na simulação com os dois tipos de apoio, rotulado-engastado (Apoio 1) e rotulado-rotulado (Apoio 2). A Figura 29b) mostra para os mesmos tipos de apoio a curva tensão versus deslocamento horizontal. Em ambas as curvas se mostram com sombras as envolventes dos resultados experimentais.

É possível observar que, nesse caso, tanto a inclinação das curvas como o valor máximo é melhor representado com o apoio tipo 2 (rotulado-rotulado), apresentando uma tensão máxima com taxa de erro de 4,9% em relação ao experimental, enquanto o apoio 1 divergiu em torno de 8%.

Figura 29 – H20C: Tensão de compressão versus a) deformação específica e b) deslocamento fora do plano.



a)

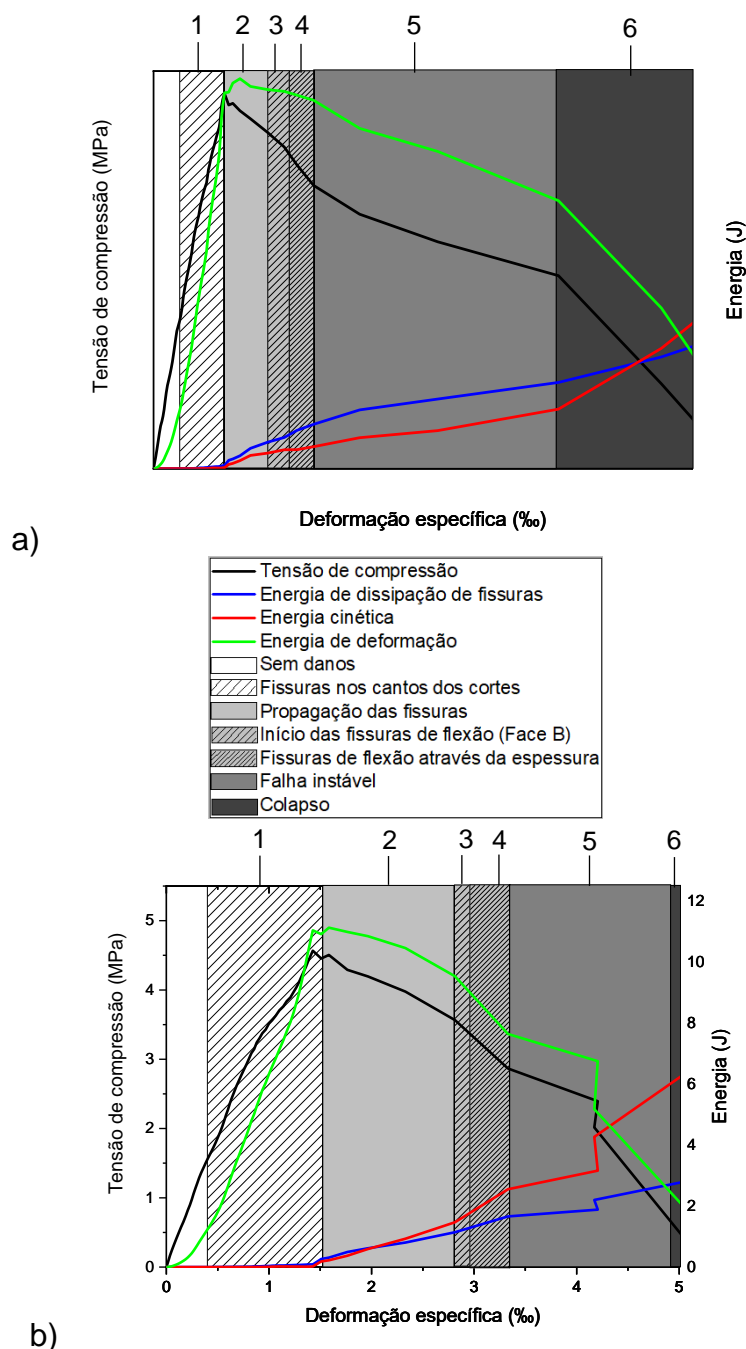


b)

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 30 estão apresentados os resultados das simulações numéricas com as curvas de tensão-deformação, energia de deformação, energia cinética e energia de dissipação de fissuras. As curvas foram divididas em diferentes regiões a fim de estabelecer uma relação entre o comportamento das curvas e o processo de falha da parede. A Figura 30 também mostra a configuração de falha do modelo em relação às mudanças das curvas e à posição inicial não deformada.

Figura 30 – H20C: Relação de tensão, energias e processo de fratura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot.



Fonte: Elaboração própria.

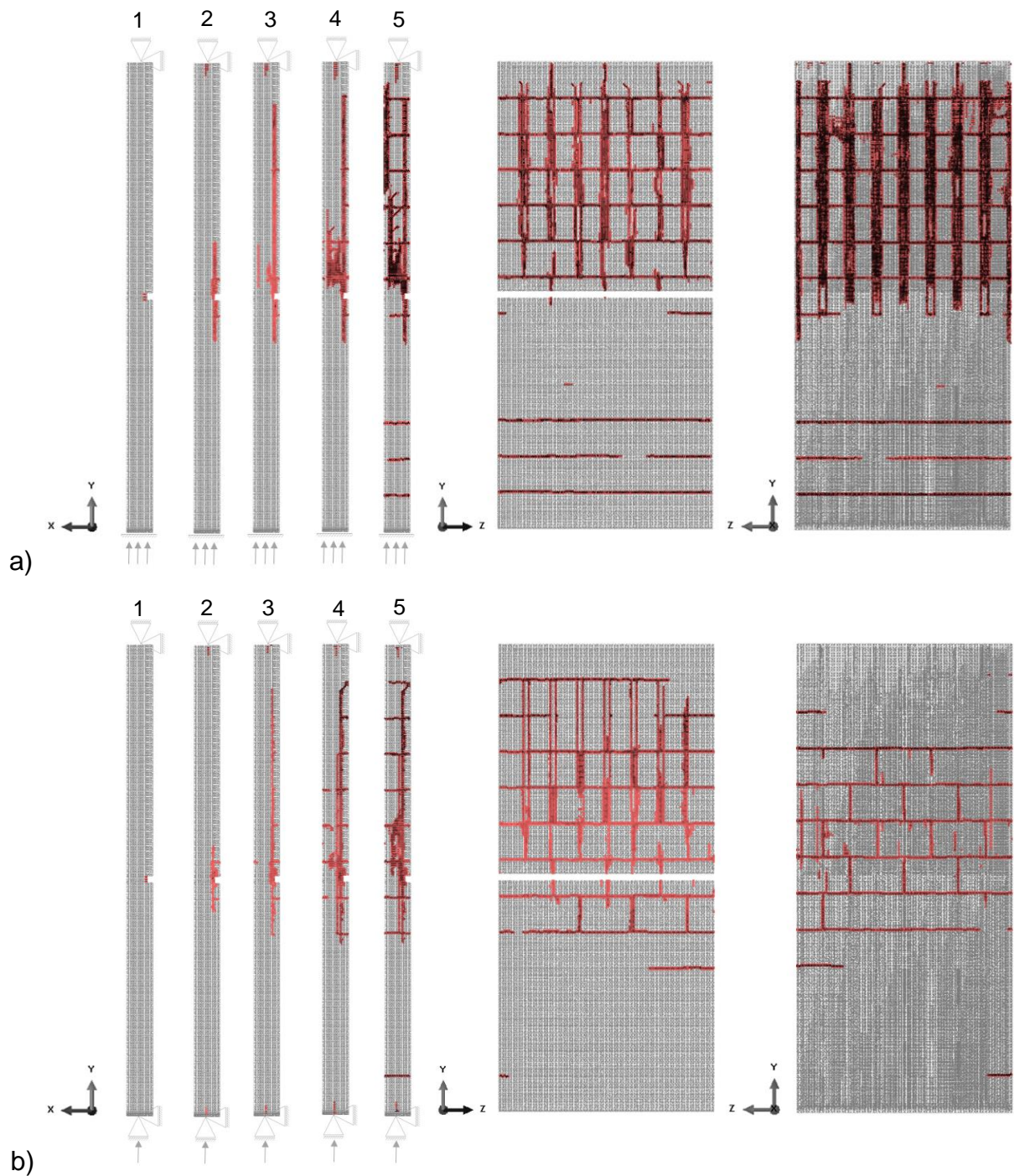
As configurações de falha de região da Figura 30 estão apresentadas na Figura 31. Os elementos destacados em vermelho representam as barras fraturadas, ou seja, por onde ocorrem as fissuras. Para gerar as imagens laterais, frontais e posteriores, foi considerado apenas a faixa de 2 ( dois) módulos em cada face, para que não houvesse interferência visual dos elementos internos das paredes.

O modelo com as condições de contorno do Apoio 1 - Rot/Eng se comporta de tal forma que quando a tensão atinge aproximadamente 2 MPa, as primeiras fissuras surgem nos cantos dos cortes (ver Figura 31.a.1) e se propagam pelo bloco em torno do corte. Em seguida, próximo do momento em que é atingida a tensão máxima, elas se propagam verticalmente na face do corte (ver Figura 31.a.2), o que interfere no comportamento das curvas de energias.

Na sequência, se iniciam as fissuras de flexão na face oposta ao corte (ver Figura 31.a.3), as quais se propagam através da espessura pelo bloco (ver Figura 31.a.4). A propagação das fissuras ao longo da argamassa na face do corte leva a parede à falha instável (ver Figura 31.a.5) e, conseqüentemente, ao colapso, após ocorrer a ruptura da argamassa também próximo ao apoio inferior.

O modelo com o Apoio 2 – Rot/Rot (ver Figura 31.b) tem o início do processo de fissuração semelhante ao caso anterior, apresentando as primeiras fissuras nos cantos dos cortes quando a parede atinge em torno de 1,5 MPa (ver Figura 31.b.1). Após ocorrer a dissipação das fissuras na vertical (ver Figura 31.b.2) também ocorre as fissuras de flexão na face oposta (ver Figura 31.b.3). Passando para a fase de fissuração através da espessura, no primeiro momento pela argamassa e posteriormente pelo bloco, (ver Figura 31.b.4) e levando a estrutura à falha instável (ver Figura 31.b.5). Nesse caso, o colapso ocorre na argamassa de forma mais centralizada e antes do que foi observado com as condições de contorno anteriores.

Figura 31 – H20C: Processo de fissuração das paredes: a) Apoio 1 -Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot.



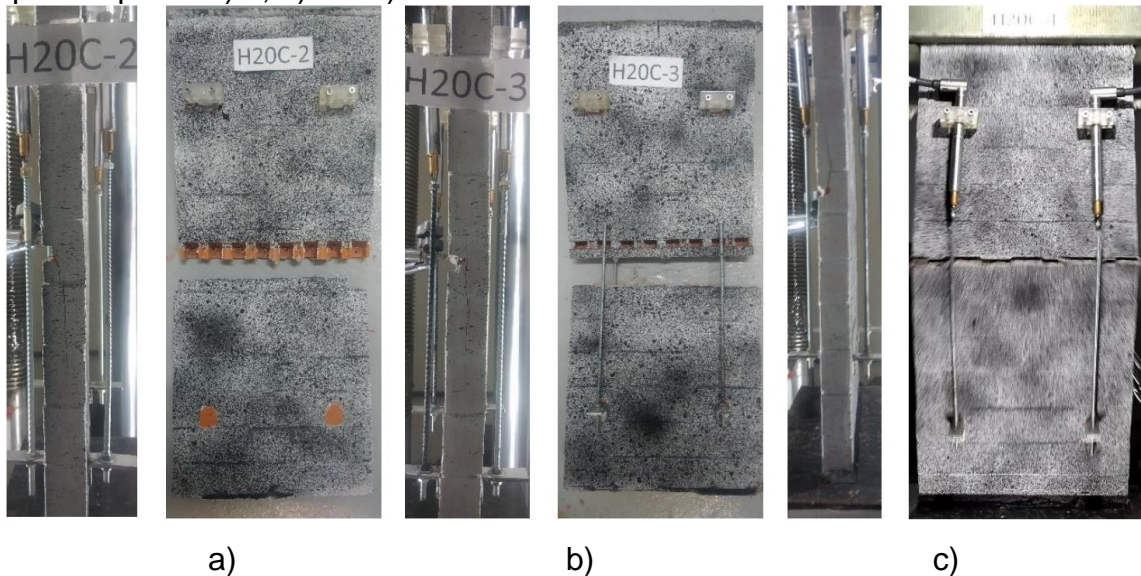
Fonte: Elaboração própria.

Experimentalmente, o modo de ruptura das paredes com corte à meia altura com 20% de profundidade ocorreu de forma que primeiro as fissuras surgiram nos cantos do corte e em seguida se propagaram na vertical, ocasionando um deslocamento de uma parte da parede. Imediatamente antes da ruptura surgiram



fissuras horizontais na face oposta ao corte ao longo da junta de argamassa, assim ocorrendo ruptura por flexão. Na Figura 32 constam os três corpos de prova fraturados em vista lateral e frontal. Portanto, houve uma boa representação do modelo numérico.

Figura 32 – H20C :Modo de ruptura dos ensaios experimentais de Milani (2019): corpos de prova a) 1, b) 2 e c) 3.

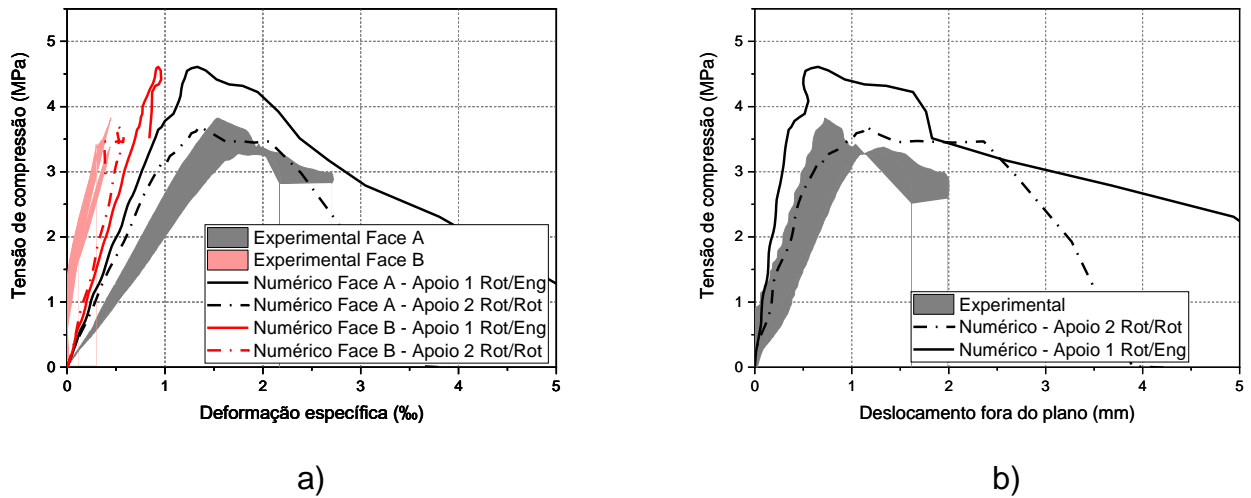


Fonte: Milani (2019).

#### 4.2. PAREDE COM CORTE HORIZONTAL CENTRAL DE 30% DE PROFUNDIDADE (H30C)

Na Figura 33 são apresentados as curvas de tensão de compressão versus deformação específica (Figura 33.a) e deslocamento fora do plano (Figura 33.b) resultado da simulação da parede com corte horizontal à meia altura de 30% de profundidade. Nesse caso, houve uma redução da tensão máxima em comparação com a tipologia anterior, assim como esperado, afetando da mesma forma a curva de deslocamento fora do plano. Sendo o apoio tipo rotulado-rotulado (Apoio 2) o que mais esteve em conformidade com o comportamento da parede experimental, apresentando uma taxa de erro de 6%, enquanto o apoio com engaste apresentou uma divergência de 32,1%.

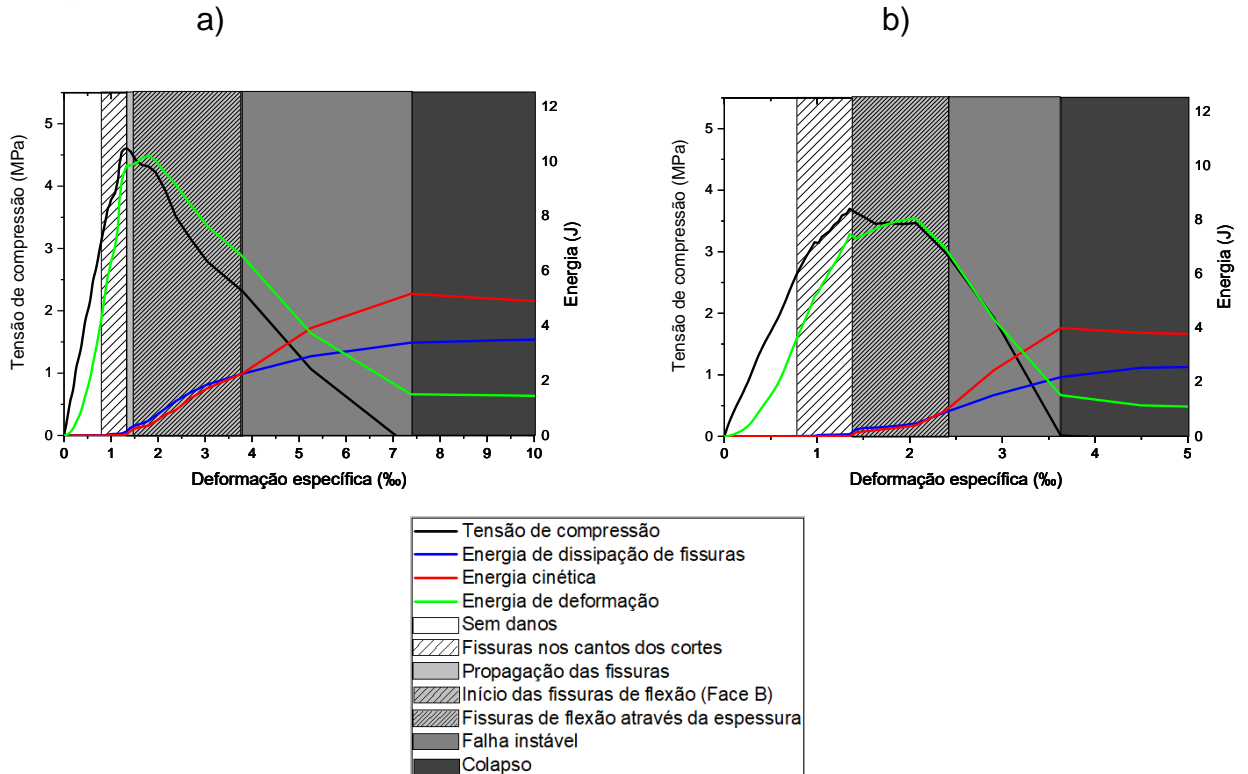
Figura 33 – H30C: Tensão de compressão versus a) deformação específica e b) deslocamento fora do plano.



Fonte: Elaboração própria.

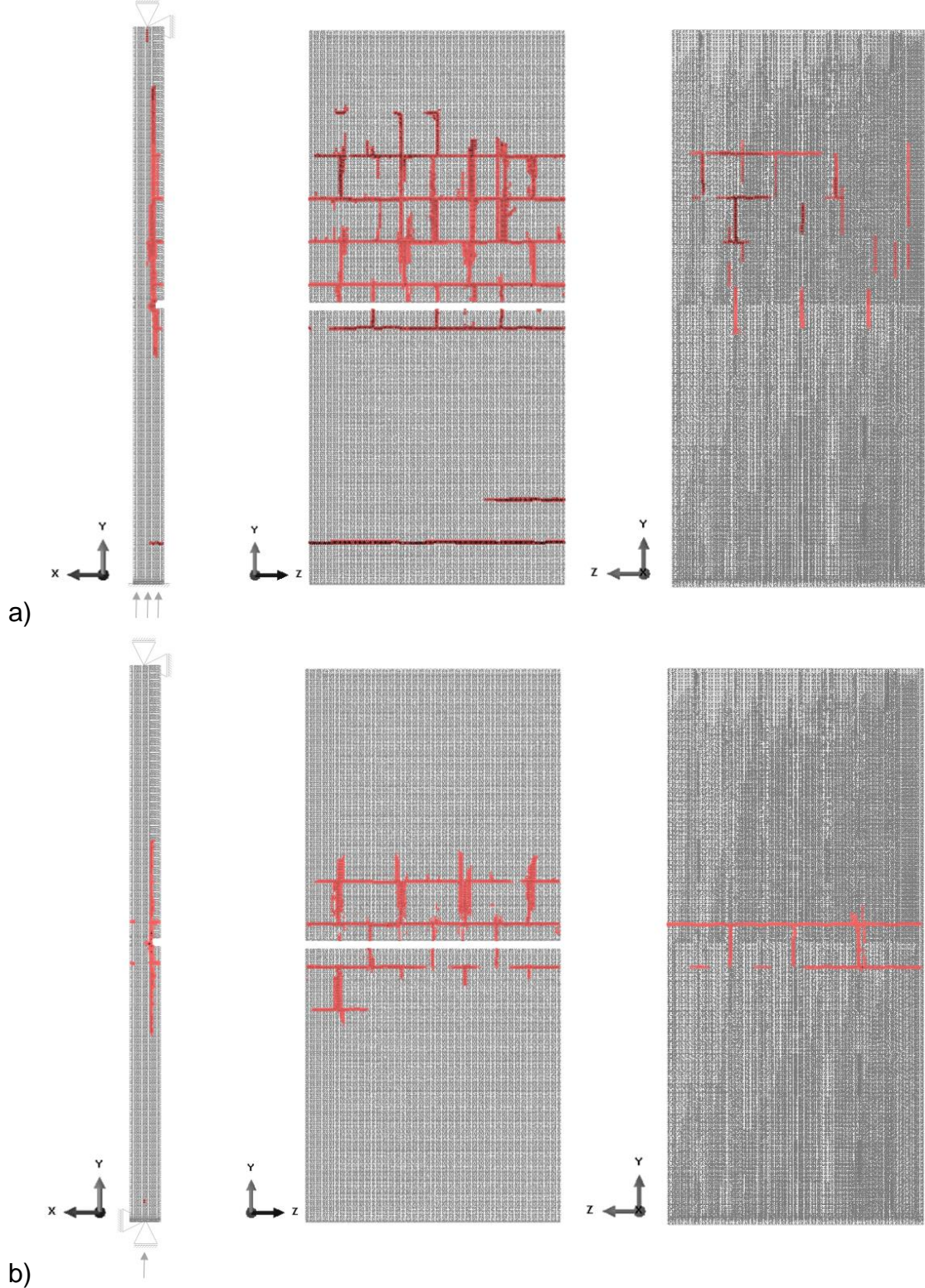
As curvas de energias e o modo de ruptura da parede H30C podem ser visualizadas abaixo na Figura 34 e Figura 35, respectivamente, sendo possível observar a degradação da resistência conforme ocorre a propagação das fissuras.

Figura 34 – H30C: Relação de tensão, energias e modo de ruptura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 35 – H30C: Modo de ruptura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot.



Fonte: Elaboração própria.

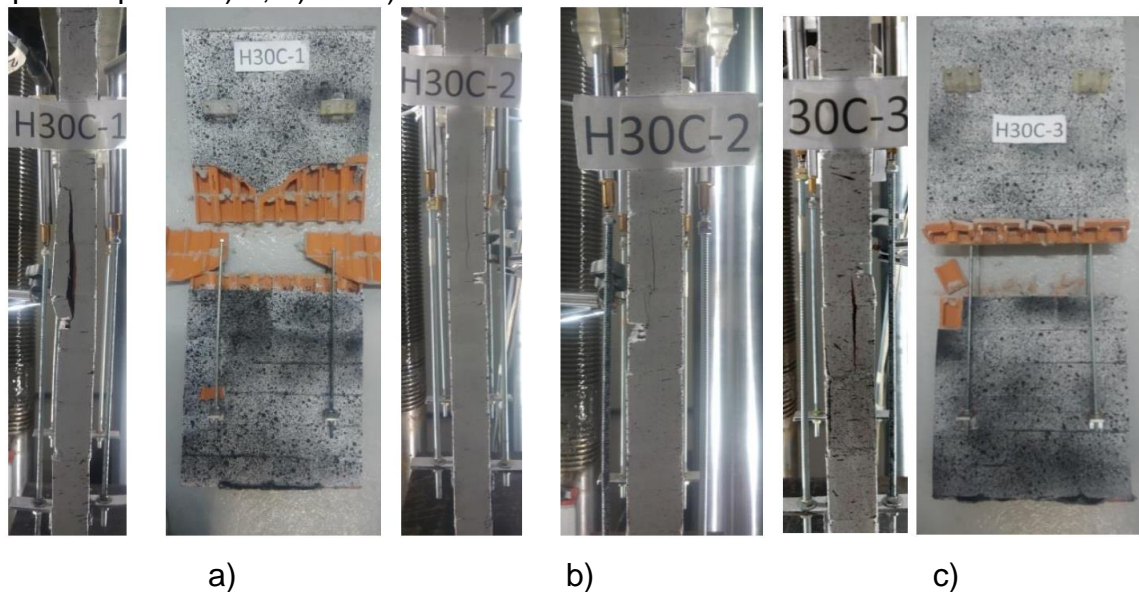
As primeiras fissuras surgiram nas bordas dos cortes quando as paredes com apoio 1 e 2 estavam sob uma tensão de 3,02 MPa e 2,6 MPa, respectivamente. No

processo de ruptura da parede com apoio do tipo 1 – Rot/Eng, após a dissipação das fissuras na vertical, a fissuração se propaga pela espessura através da argamassa para a face oposta, em seguida, na face de corte, as fissuras se propagam pelo bloco e argamassa. As fissuras passam a ocorrer na argamassa próximo ao apoio inferior, colapsando a estrutura de forma semelhante à mesma parede com 20% de redução da espessura, porém, com menor propagação de fissuras.

No Apoio 2 – Rot/Rot, a dissipação de fissuras verticais na face do corte se concentra na região central da parede, pois a ruptura ocorre antes que haja essa propagação. Sendo assim, nesse caso, a fissuração do material foi menor até o momento da ruptura.

O modo de ruptura observado experimentalmente (Figura 36) foi por flexão, havendo uma boa representação do modelo.

Figura 36 – H30C :Modo de ruptura dos ensaios experimentais de Milani (2019): corpos de prova a) 1, b) 2 e c) 3.



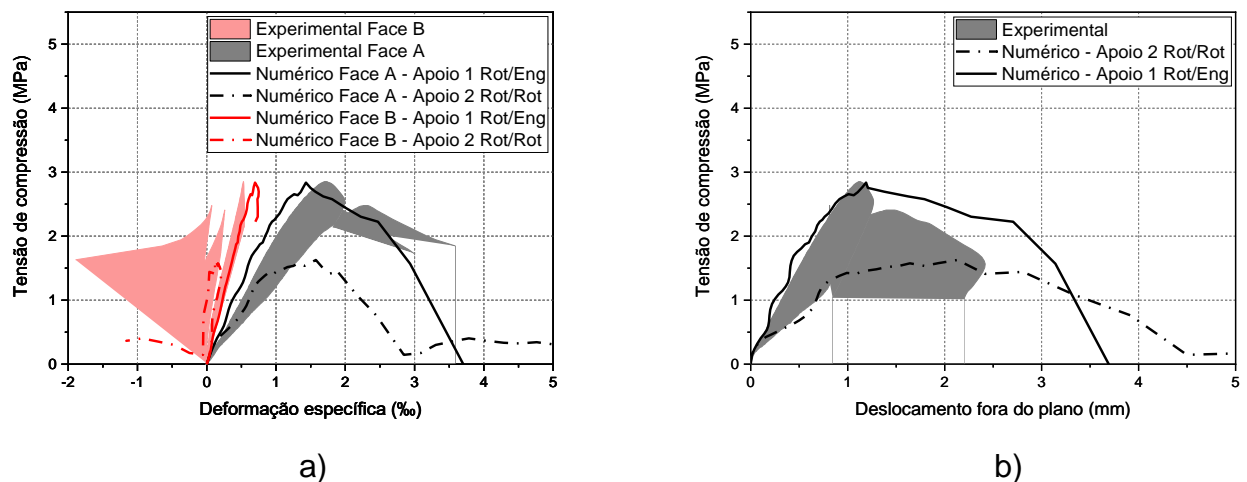
Fonte: Milani (2019).

#### **4.3. PAREDE COM CORTE HORIZONTAL CENTRAL DE 50% DE PROFUNDIDADE (H50C)**

Conforme esperado, com base nos resultados experimentais, o aumento da profundidade de corte ocasiona uma perda da resistência. O Apoio 1 – Rot/Eng

apresentou uma taxa de erro de 10% em relação ao experimental, enquanto o Apoio 2 – Rot/Rot se mostrou com uma divergência de 37%. Assim como nos casos anteriores, o comportamento tensão *versus* deformação se mostra linear até próximo à ruptura, após isso são observados grandes deformações específicas e deslocamento fora do plano. Conforme pode ser observado na Figura 37.

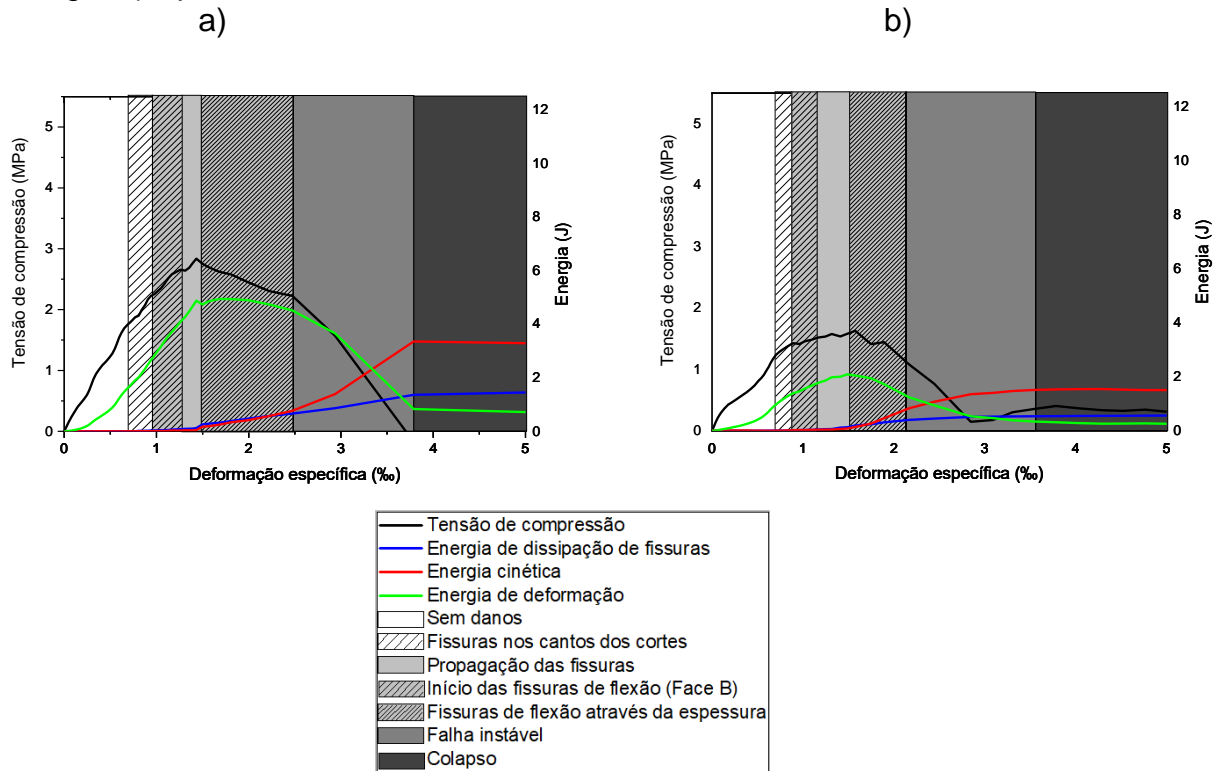
Figura 37 – H50C: Tensão de compressão versus a) deformação específica e b) deslocamento fora do plano.



Fonte: Elaboração própria.

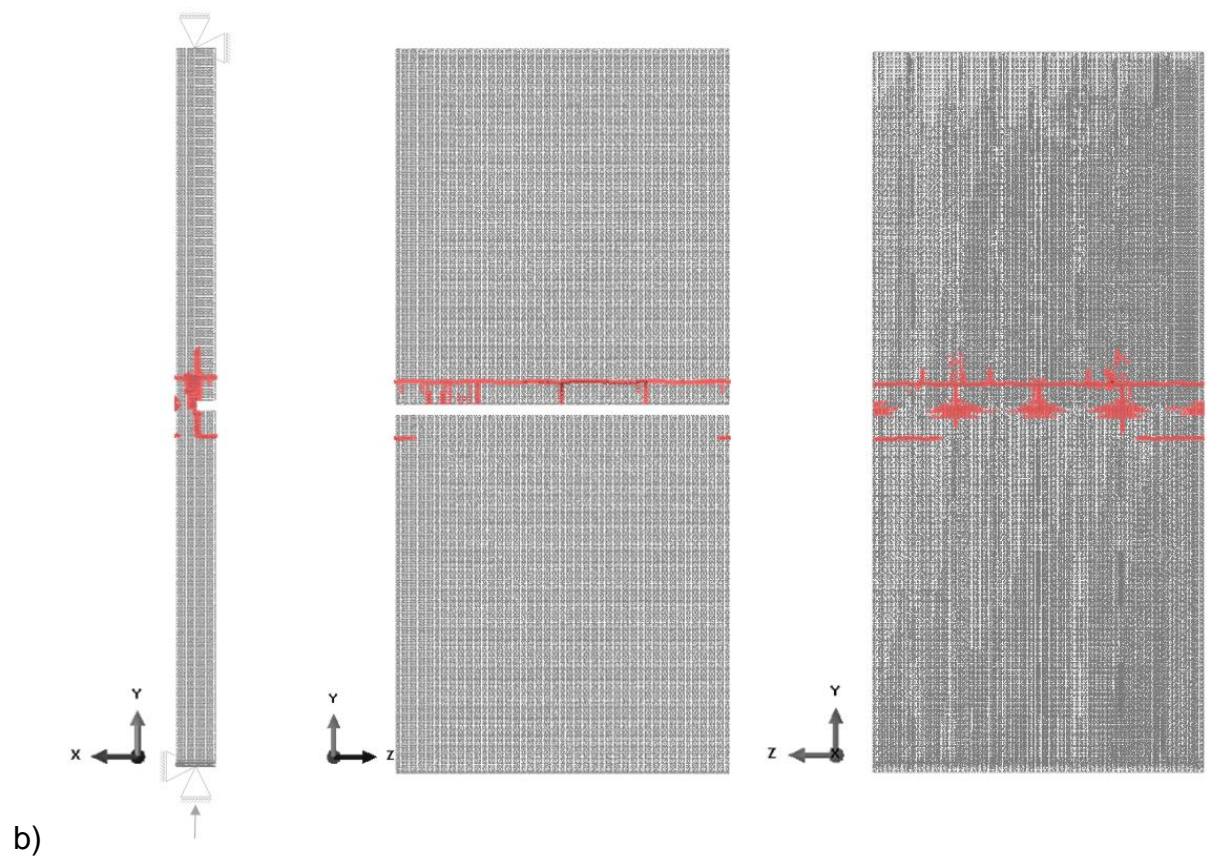
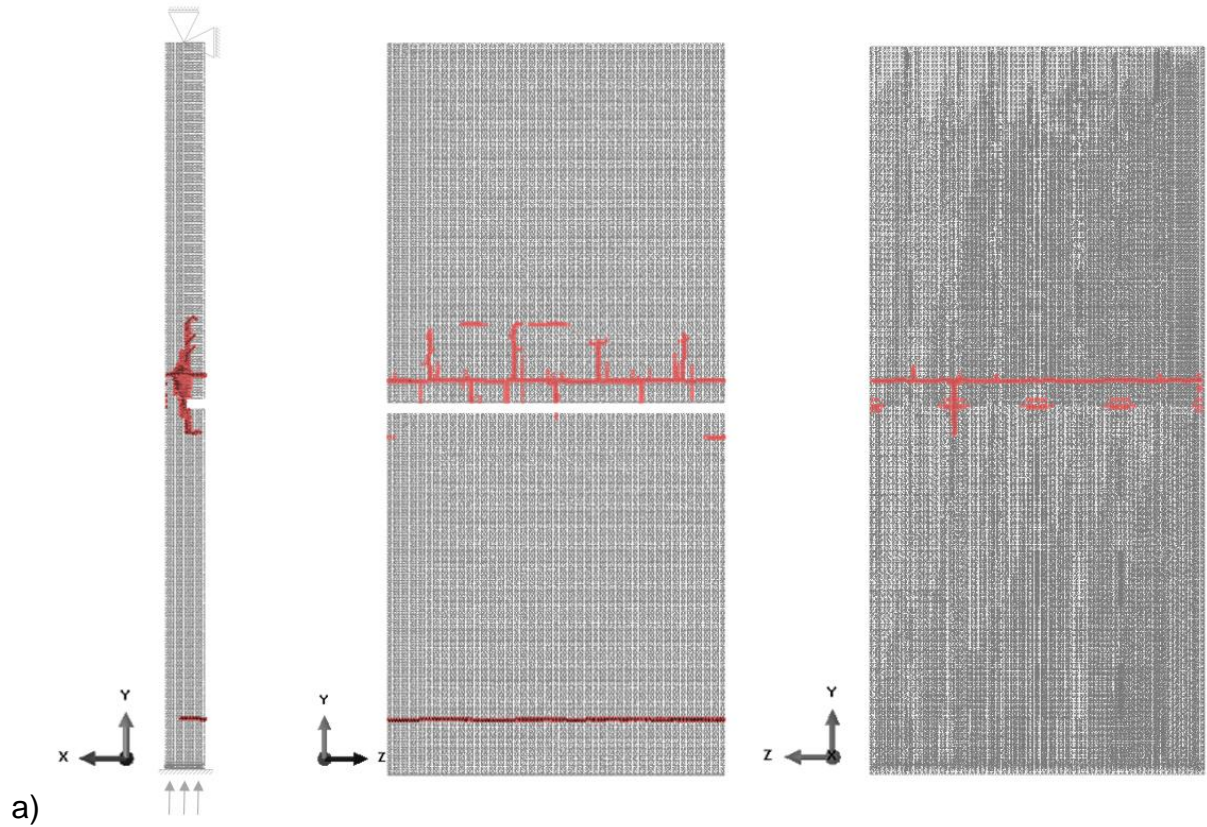
Na Figura 38 estão descritos os comportamentos de tensão e energias da parede H50C. Nesse caso, não houve uma grande dissipação de fissuras, vindo a ocorrer a ruptura antes disso. Aqui, as fissuras de flexão na face oposta ao corte, surgem antes de ocorrer a dissipação das fissuras na vertical na face A, a qual se dá pela argamassa de assentamento. O colapso ocorre com a fissuração ao longo da espessura pela argamassa, sendo mais concentrada na fiada do corte no caso do Apoio 2 - Rot/Rot (ver Figura 39).

Figura 38 – H50C: Relação de tensão, energias e modo de ruptura de: a) Apoio 1 - Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot.



Fonte: Elaboração própria.

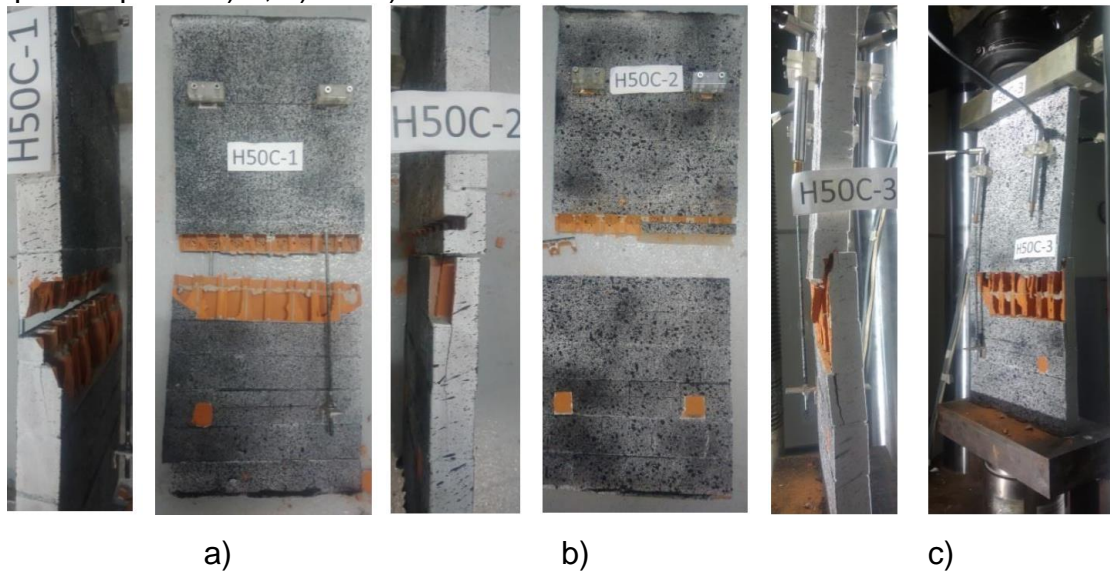
Figura 39 – H50C: Modo de ruptura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot.



Fonte: Elaboração própria.

Conforme Milani (2019) já havia constatado, os cortes horizontais causaram efeitos de flexão nas paredes, se acentuando conforme a profundidade dos cortes era aumentada. Sendo o efeito de flexão resultado do deslocamento do centroide provocado pelo corte. Novamente, pode-se observar que no modelo com Apoio 1 – Rot/Eng houve uma maior fissuração do material. As rupturas obtidas experimentalmente são mostradas na Figura 40.

Figura 40 – H50C :Modo de ruptura dos ensaios experimentais de Milani (2019): corpos de prova a) 1, b) 2 e c) 3.



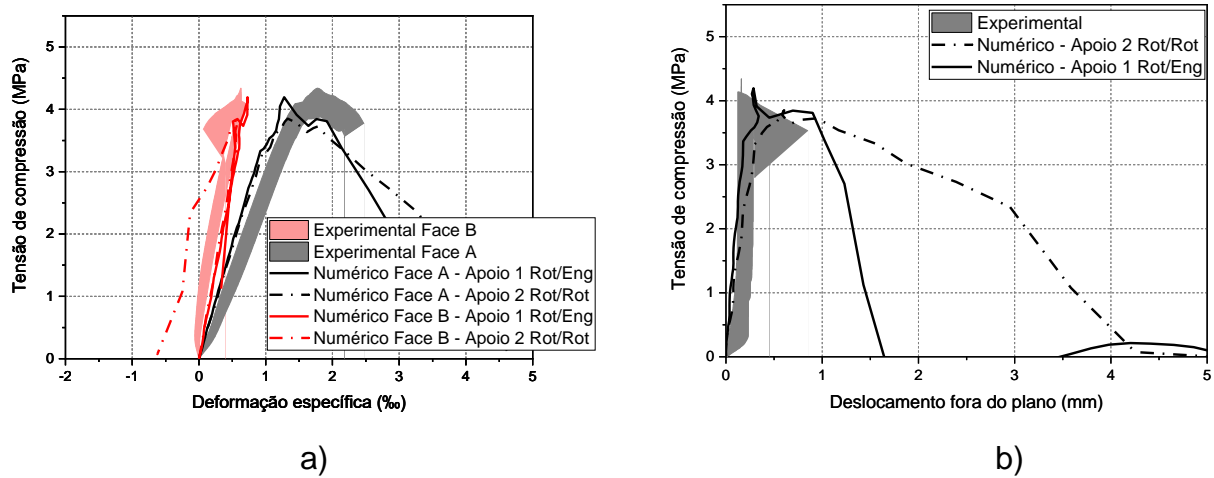
Fonte: Milani (2019).

#### 4.4. PAREDE COM CORTE HORIZONTAL SUPERIOR DE 30% DE PROFUNDIDADE (HS30C)

As paredes com cortes horizontais no terço superior da parede apresentaram uma taxa de erro de 1,8% e 6,5%, para os apoios 1 (Rot/Eng) e 2 (Rot/Rot), respectivamente, em relação à tensão de compressão máxima obtida experimentalmente. As curvas de tensão *versus* deformação específica e deslocamento fora do plano se encontram na Figura 41.



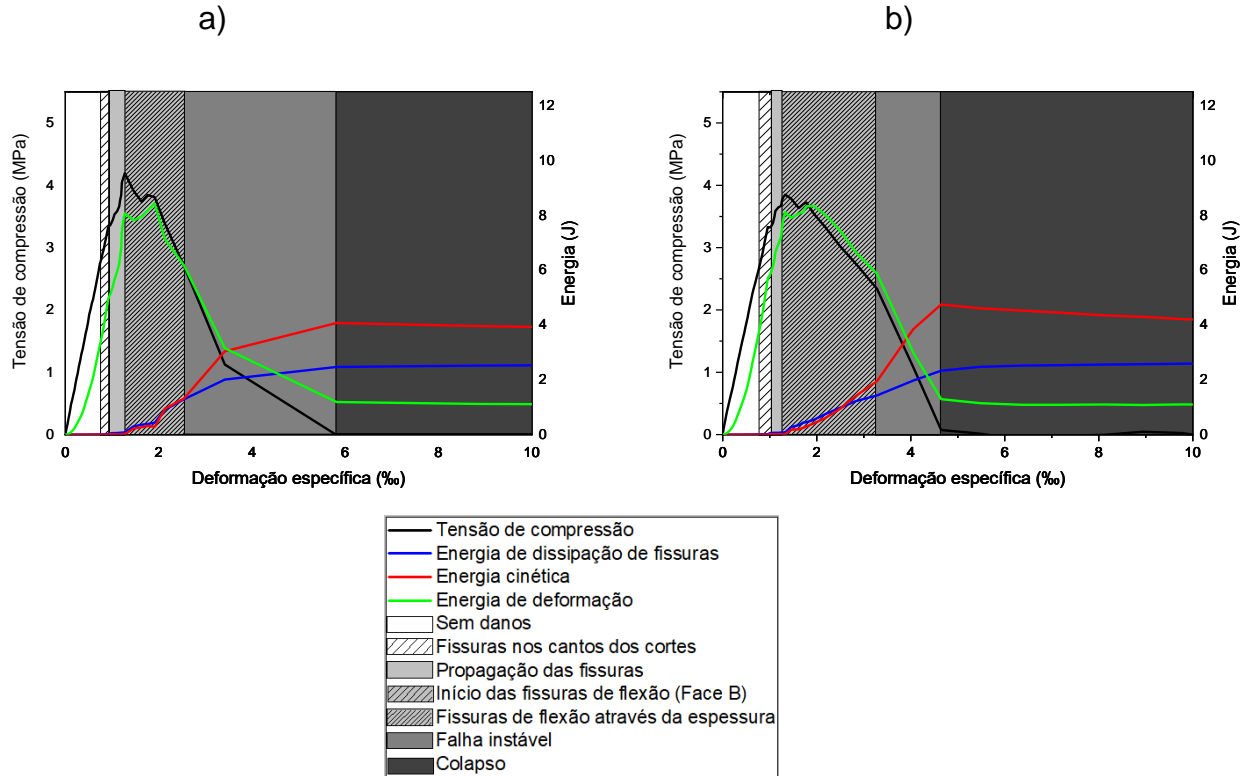
Figura 41 – HS30C: Tensão de compressão versus a) deformação específica e b) deslocamento fora do plano.



Fonte: Elaboração própria.

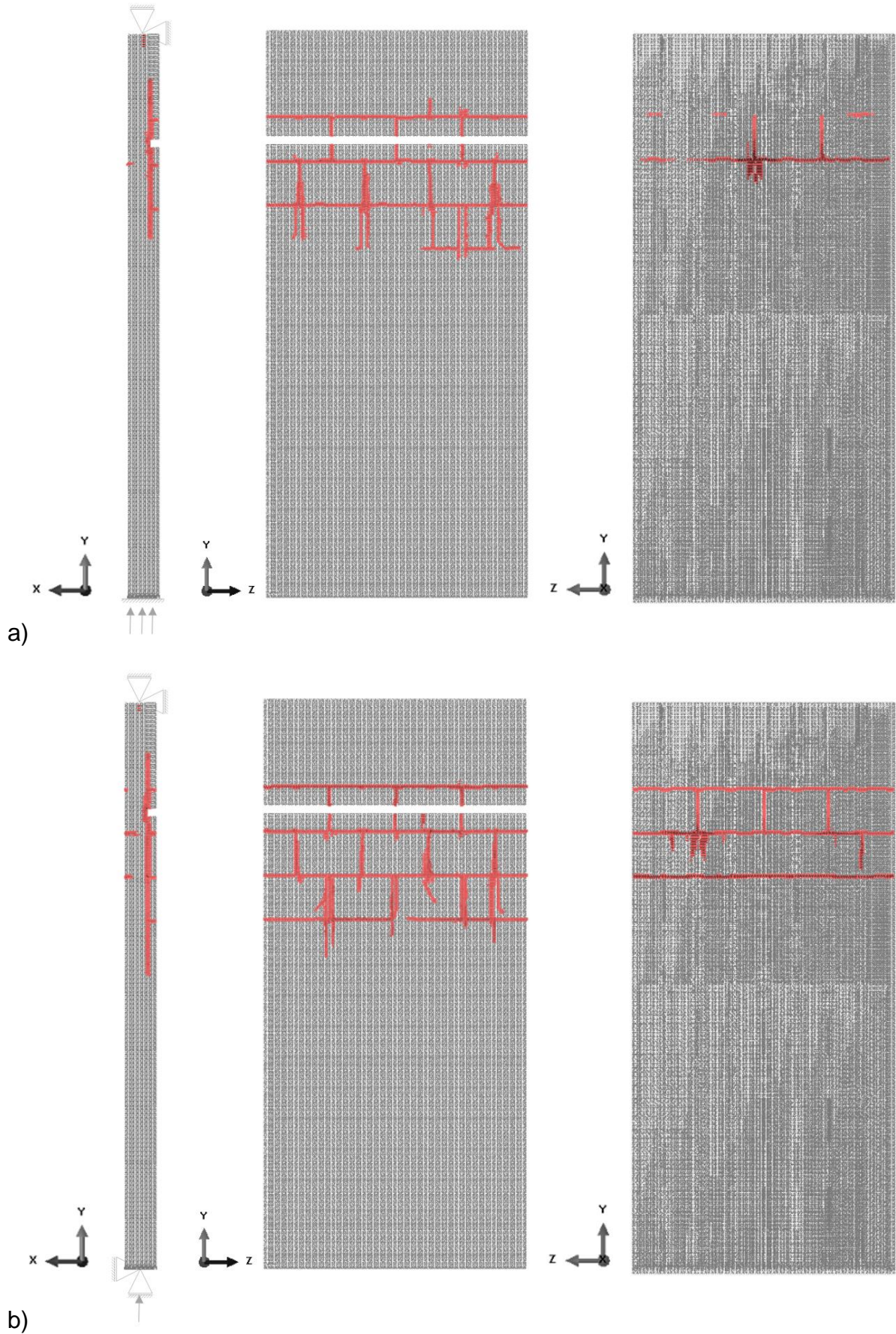
Na Figura 42 e Figura 43 constam as curvas de energias de fratura e o processo de ruptura da parede HS30C, respectivamente. Para os dois casos o comportamento observado foi bastante semelhante, o início das fissuras ocorre nas bordas do corte e posteriormente se propaga em torno deste, nesse momento ainda sem danificar a argamassa, apenas o bloco. Na sequência, as fissuras se propagam pela espessura da parede por meio da argamassa de assentamento, e simultaneamente as fissuras se propagam verticalmente pelo bloco na face de corte. Posteriormente, as fissuras se propagam pela espessura agora danificando o bloco, o que acaba ocasionando a falha instável e, por fim, o colapso.

Figura 42 – HS30C: Relação de tensão, energias e modo de ruptura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot.



Fonte: Elaboração própria.

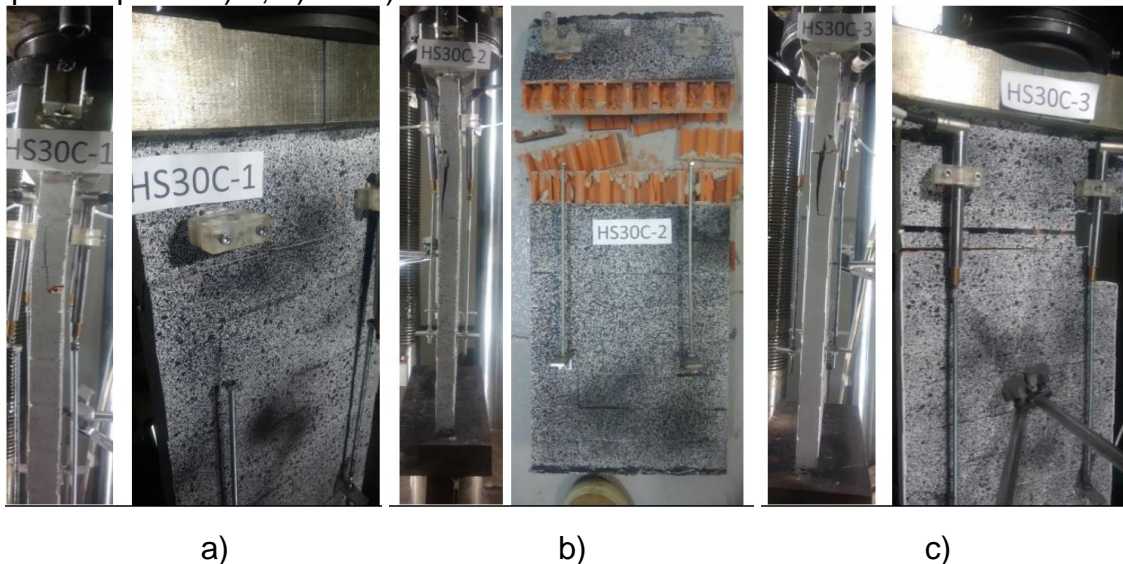
Figura 43 – HS30C: Modo de ruptura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot.



Fonte: Elaboração própria.

A ruptura obtida experimentalmente consta na Figura 44, sendo semelhante ao das paredes com cortes horizontais à meia altura, ocorrendo por flexão na direção do corte.

Figura 44 – HS30C :Modo de ruptura dos ensaios experimentais de Milani (2019): corpos de prova a) 1, b) 2 e c) 3.

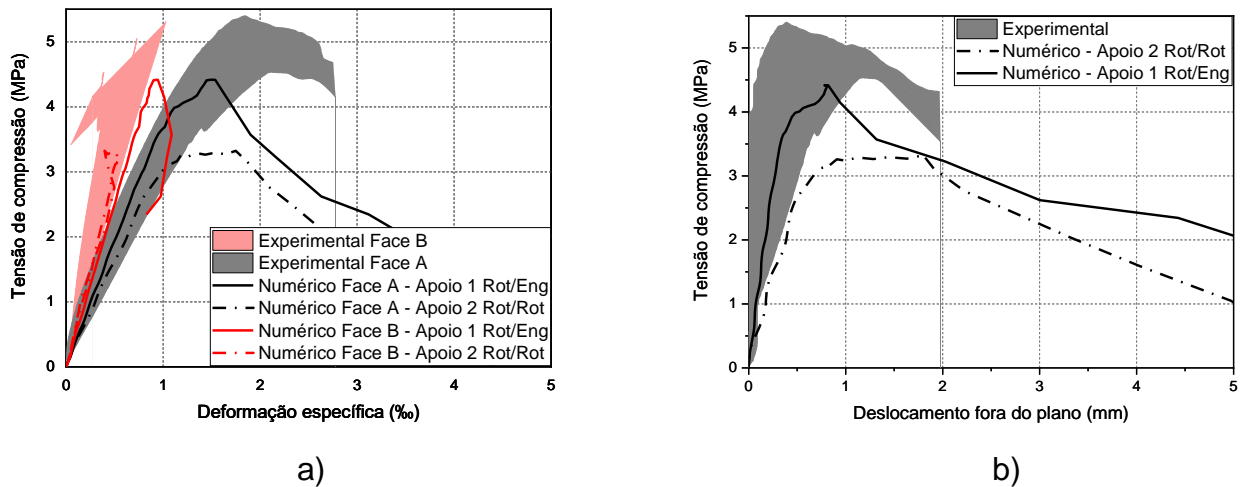


Fonte: Milani (2019).

#### 4.5. PAREDE COM CORTE INCLINADO DE 30% DE PROFUNDIDADE (I30C)

As tensões de resistência à compressão máximas obtidas na tipologia I30C foram 11,7% e 33,5%, para os apoios 1 (Rot/Eng) e 2 (Rot/Rot), respectivamente, menores que a tensão obtida de forma experimental. As curvas de tensão versus deformação específica e deslocamento fora do plano podem ser visualizadas na Figura 45. Comparando os resultados experimentais e numéricos, o melhor desempenho foi obtido pelo Apoio 1.

Figura 45 – I30C: Tensão de compressão versus a) deformação específica e b) deslocamento fora do plano.

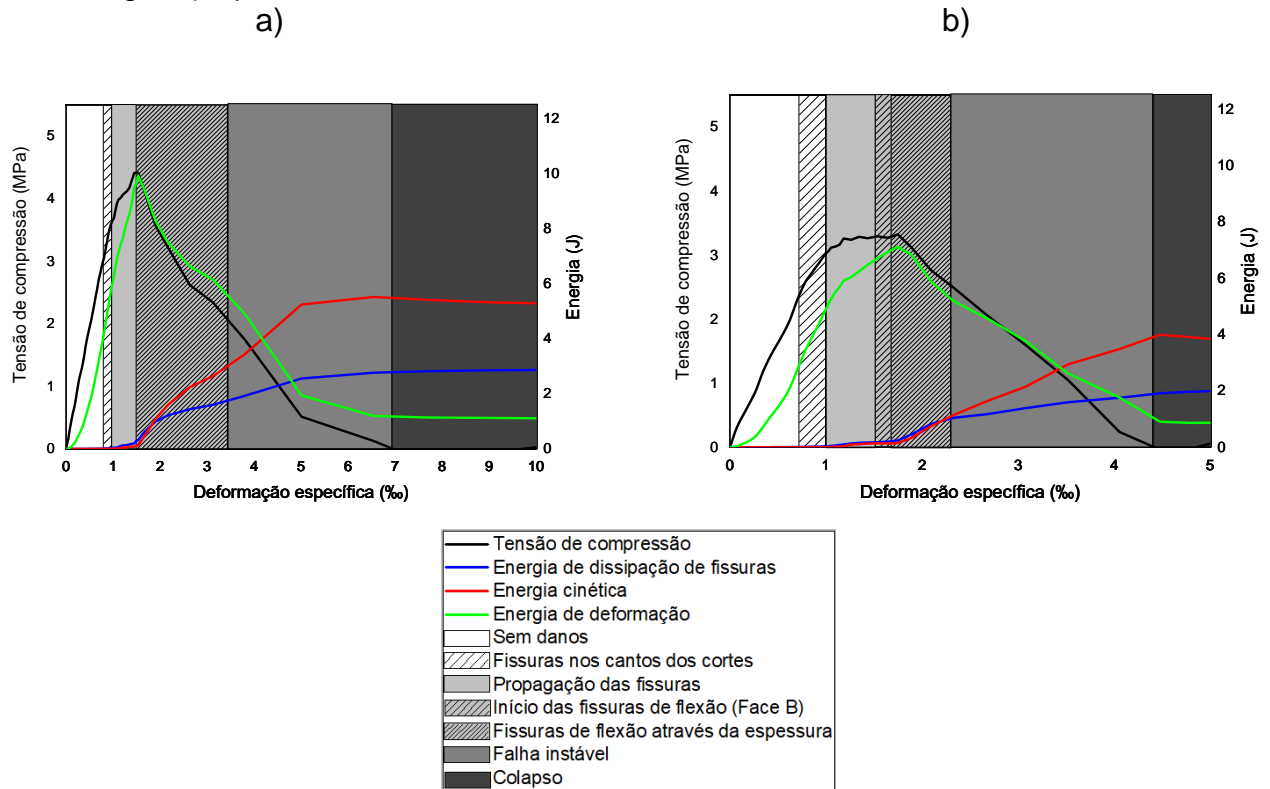


Fonte: Elaboração própria.

O processo de ruptura pode ser visualizado na Figura 46 e Figura 47. Assim como nos outros casos, o Apoio 2 (Rot/Rot) apresentou o início da fissuração para uma tensão menor que no modelo com o Apoio 1 (Rot/Eng). Nas duas situações a fissuração se inicia nas bordas dos cortes e se propaga em torno do corte e na direção vertical na face do corte, danificando apenas o bloco. Só então a argamassa é danificada com fissuras se propagando através da espessura da parede. No caso do apoio do tipo rotulado-rotulado, em paralelo a isso surgem fissuras na argamassa na face oposta ao corte.

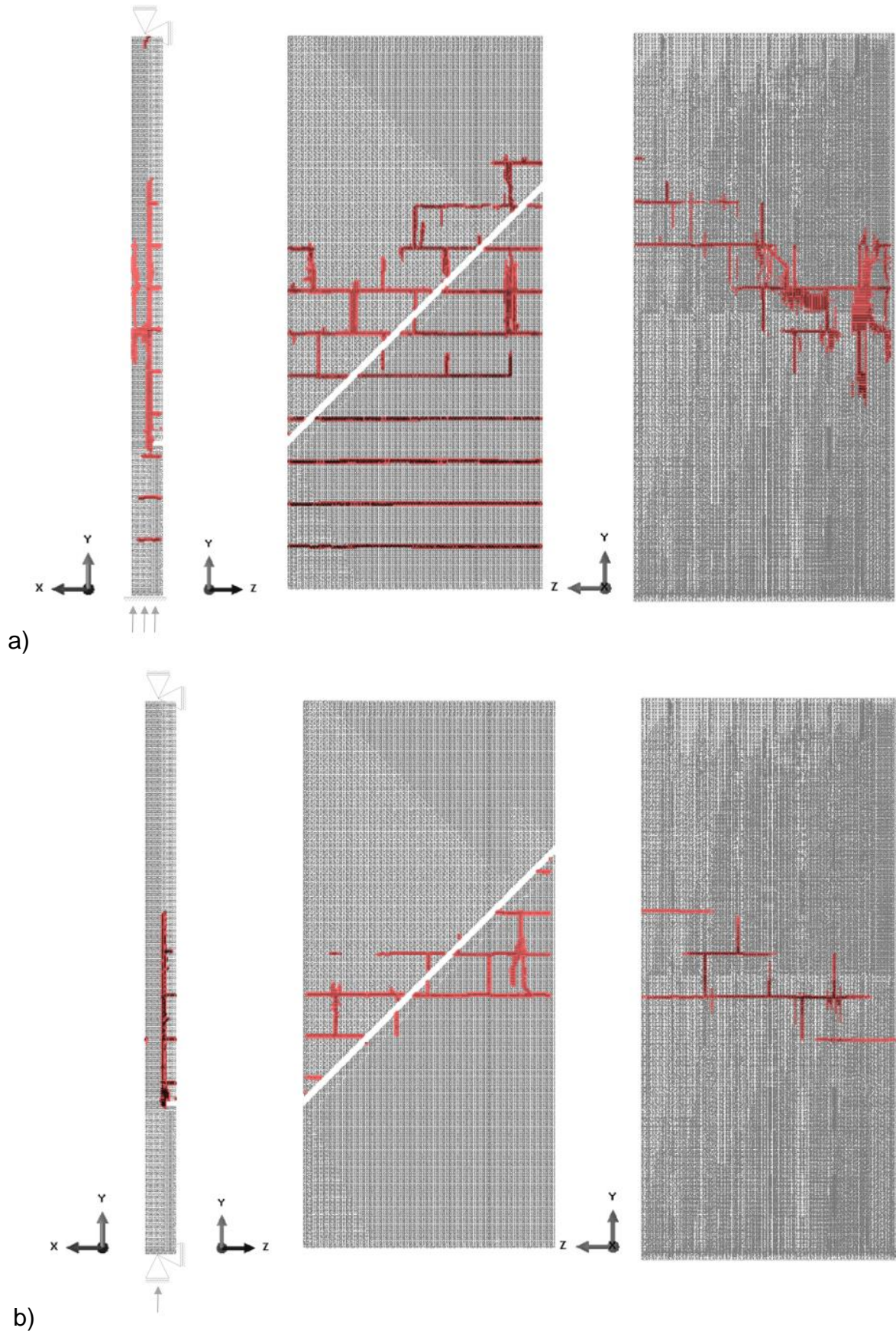
A falha instável nos dois casos ocorre com a fase de fissuração na direção da espessura da parede, danificando agora não só a argamassa, mas também o bloco. A ruptura no caso da condição de contorno rotulado-rotulado se dá por flexão na região central da parede, já no caso rotulado-engastado se percebe um leve deslizamento na seção do corte.

Figura 46 – I30C: Relação de tensão, energias e modo de ruptura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot.



Fonte: Elaboração própria.

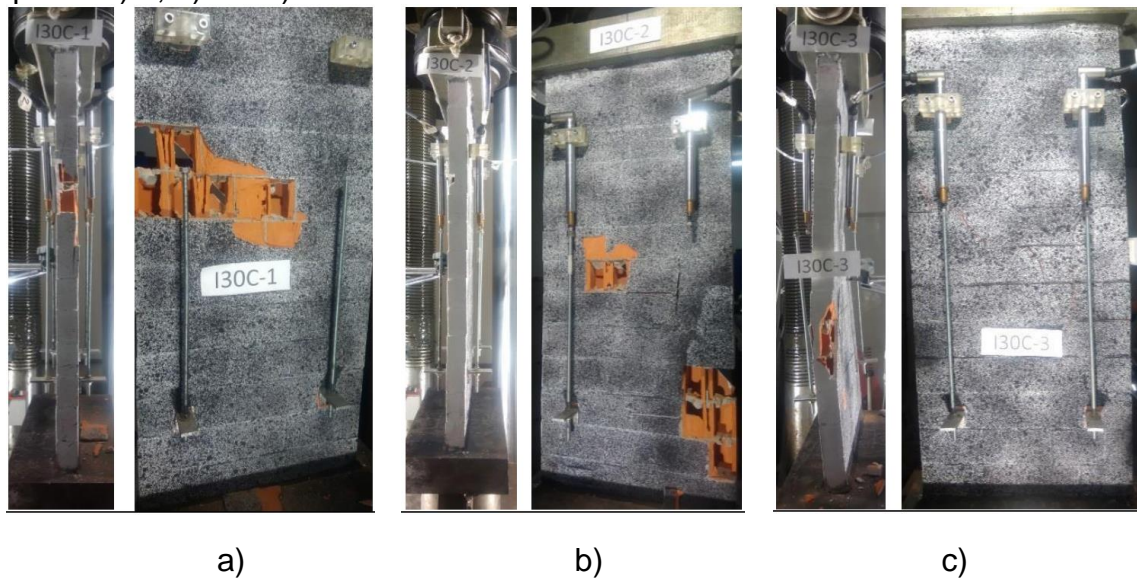
Figura 47 – I30C: Modo de ruptura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot.



Fonte: Elaboração própria.

Experimentalmente, no caso I30C as fissuras também iniciaram nos cantos dos cortes e se propagaram na vertical, em sequência surgiram fissuras na face oposta, sendo o modo de ruptura semelhante à alvenaria sob compressão com expulsão das paredes dos blocos com leve flexão, o qual pode ser visualizado na Figura 48.

Figura 48 – I30C :Modo de ruptura dos ensaios experimentais de Milani (2019): corpos de prova a) 1, b) 2 e c) 3.



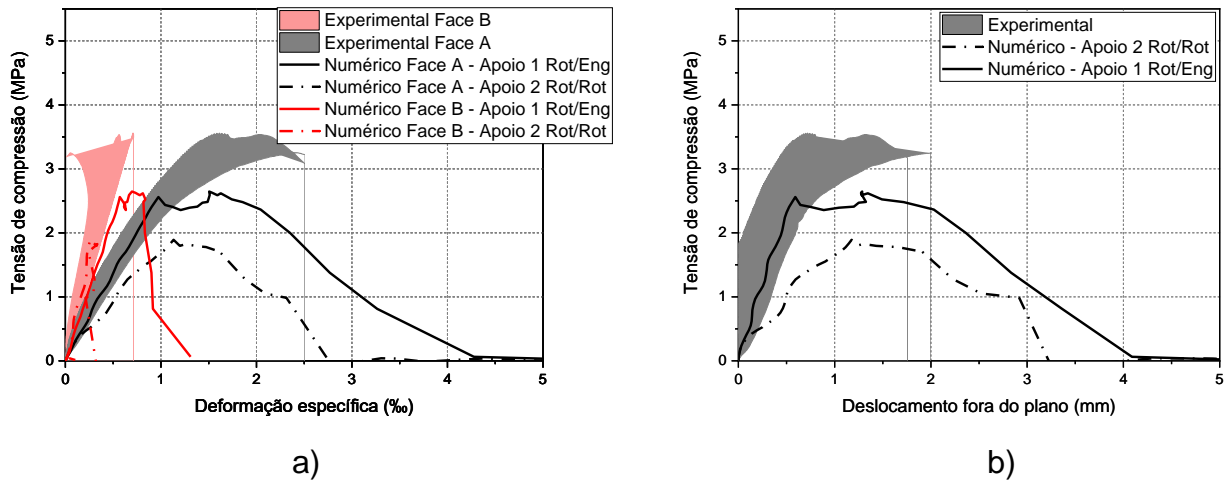
Fonte: Milani (2019).

#### 4.6. PAREDE COM CORTE INCLINADO DE 50% DE PROFUNDIDADE (I50C)

A parede I50C apresentou resistência à compressão 23,3% (Apoio 1 – Rot/Eng) e 45,2% (Apoio 2 – Rot/Rot) menores do que a resistência obtida no ensaio experimental. Na Figura 49 é possível visualizar a divergência dos ensaios experimentais e numéricos para os resultados de tensão, deformação específica e deslocamento fora do plano.



Figura 49 – I50C: Tensão de compressão versus a) deformação específica e b) deslocamento fora do plano.

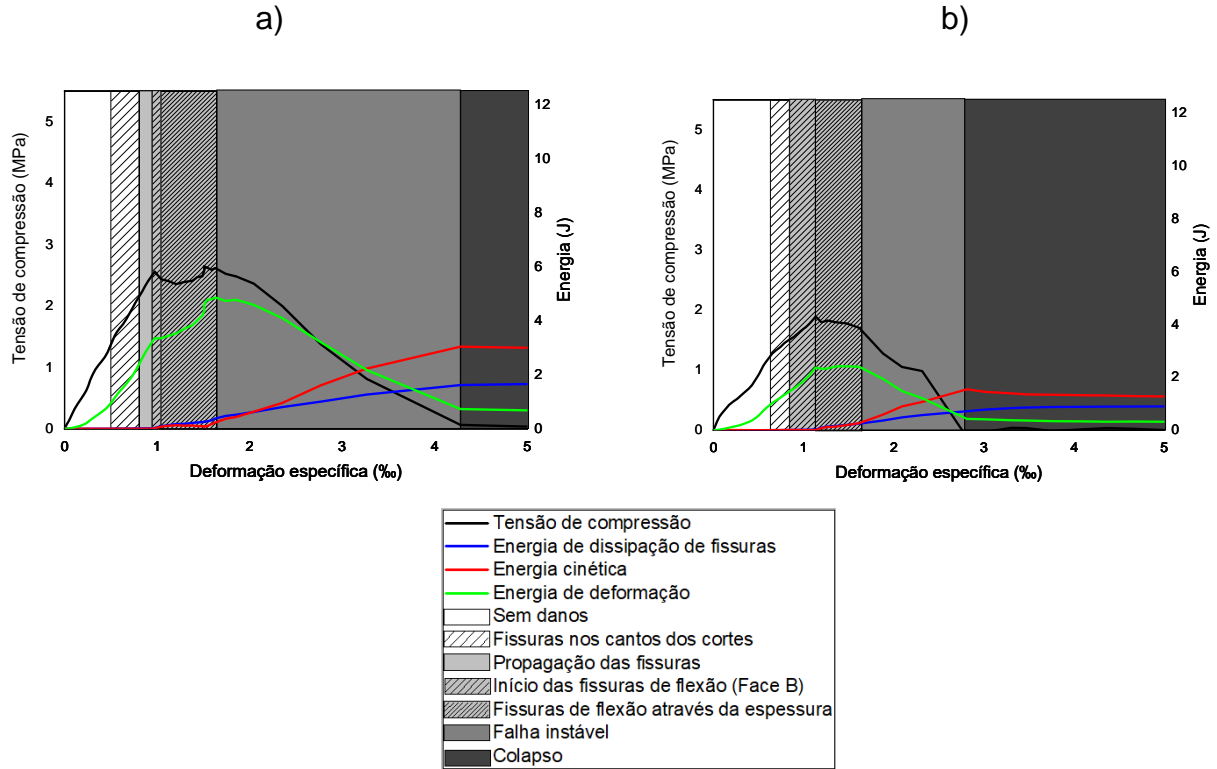


Fonte: Elaboração própria.

O processo de ruptura pode ser visualizado na Figura 50 e Figura 51. No Apoio 2 (Rot/Rot), a ruptura ocorre antes do que pode ser visualizado no Apoio 1 (Rot/Eng), de forma que isso também altera a dissipação das fissuras. O modelo com condição de contorno rotulado-engastado inicia os danos com fissuras nas bordas dos cortes, danificando apenas o bloco. Na sequência as fissuras surgem na argamassa na face oposta ao corte. A dissipação das fissuras ocorre pela argamassa de assentamento, indo da borda do corte em direção às duas faces simultaneamente, se propagando pela espessura, danificando a argamassa.

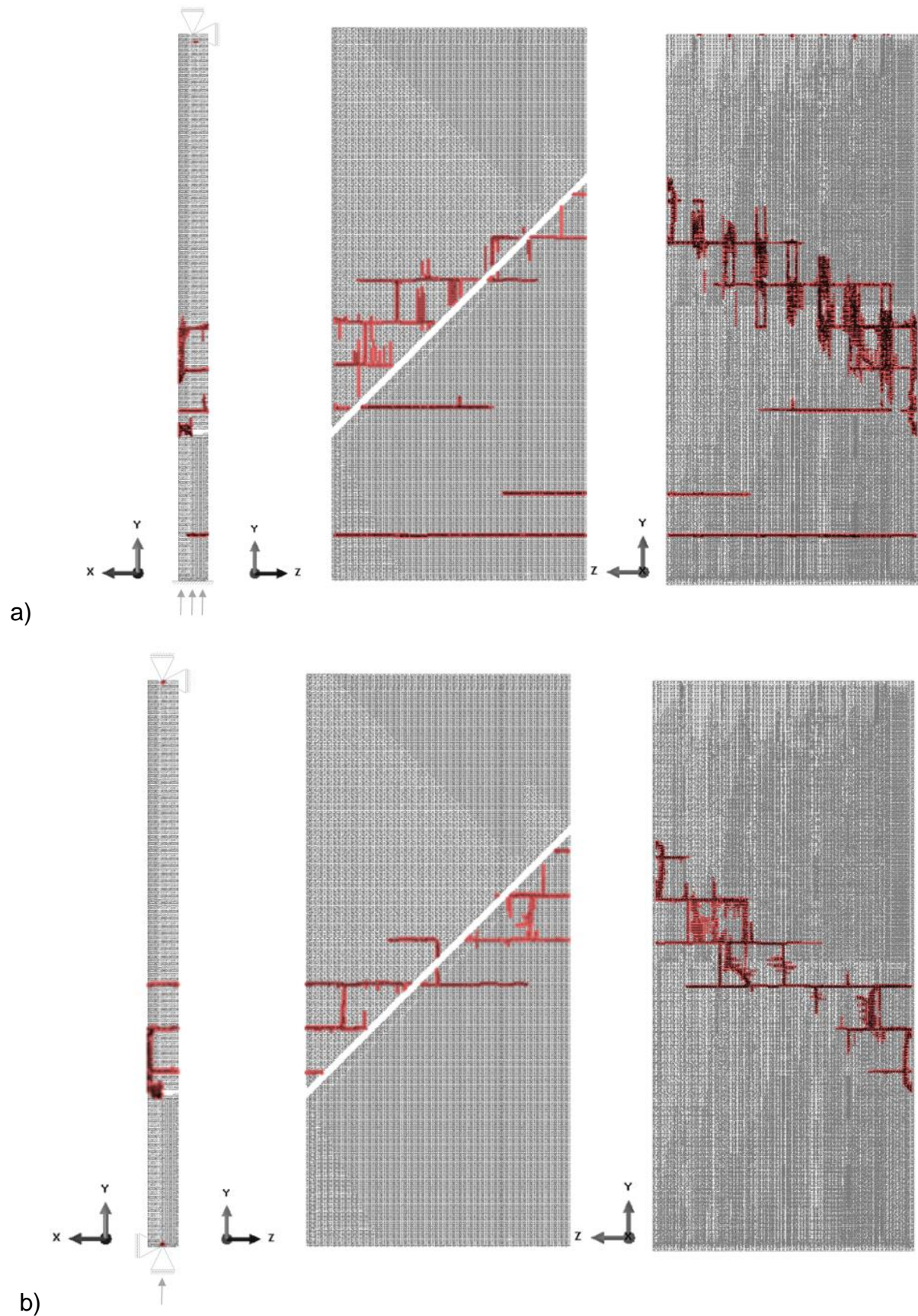
O comportamento de fissuração do modelo com apoios rotulados se dá da mesma maneira. Nos dois casos a falha instável acontece quando por fim as fissuras se dissipam pela espessura da parede, agora afetando não só a argamassa, mas também o bloco. Em ambos os casos o colapso ocorreu por cisalhamento.

Figura 50 – I50C: Relação de tensão, energias e modo de ruptura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot.



Fonte: Elaboração própria.

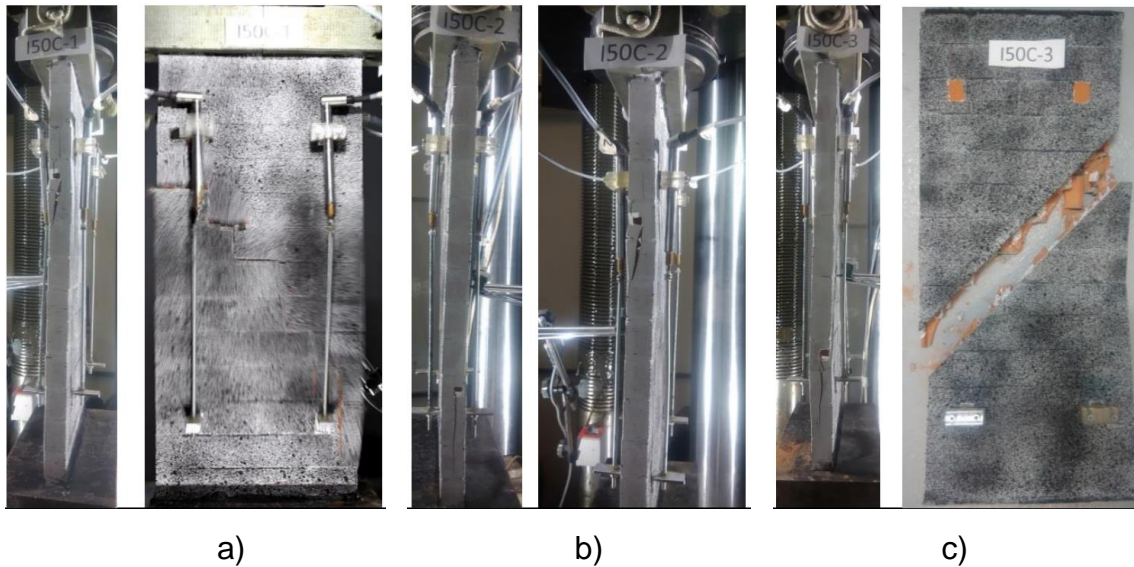
Figura 51 – I50C: Modo de ruptura de: a) Apoio 1 – Rot/Eng e b) Apoio 2 – Rot/Rot.



Fonte: Elaboração própria.

A parede I50C, semelhante ao caso anterior, apresentou fissuras nos cantos dos cortes, as quais se propagaram na vertical e em seguida a parede rompeu por flexão, conforme mostrado na Figura 52.

Figura 52 – I50C :Modo de ruptura dos ensaios experimentais de Milani (2019): corpos de prova a) 1, b) 2 e c) 3.



Fonte: Milani (2019).

#### 4.7. RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Um resumo dos resultados obtidos com as simulações utilizando o modelo em 3D representando as paredes de alvenaria em pequena escala, constituídas por blocos e argamassa, está descrito na Tabela 13 para as diferentes configurações de cortes. A cor em destaque indica as menores taxas de erro entre as duas condições de contorno em relação à resistência à compressão experimental.

Tabela 13 – Tensão máxima obtida em relação aos resultados experimentais.

Parede	Tensão máxima (MPa)				
	Experimental	Modelo numérico			
		Apoio 1 (Rot/Eng)	Erro (%)	Apoio 2 (Rot/Rot)	Erro (%)
<b>H20C</b>	4,80	5,19	+8,1	4,57	-4,9
<b>H30C</b>	3,49	4,61	+32,1	3,70	+6,0
<b>H50C</b>	2,58	2,84	+10,0	1,63	-36,9
<b>HS30C</b>	4,12	4,19	+1,8	3,85	-6,5
<b>I30C</b>	5,00	4,42	-11,7	3,32	-33,5
<b>I50C</b>	3,45	2,65	-23,3	1,89	-45,2

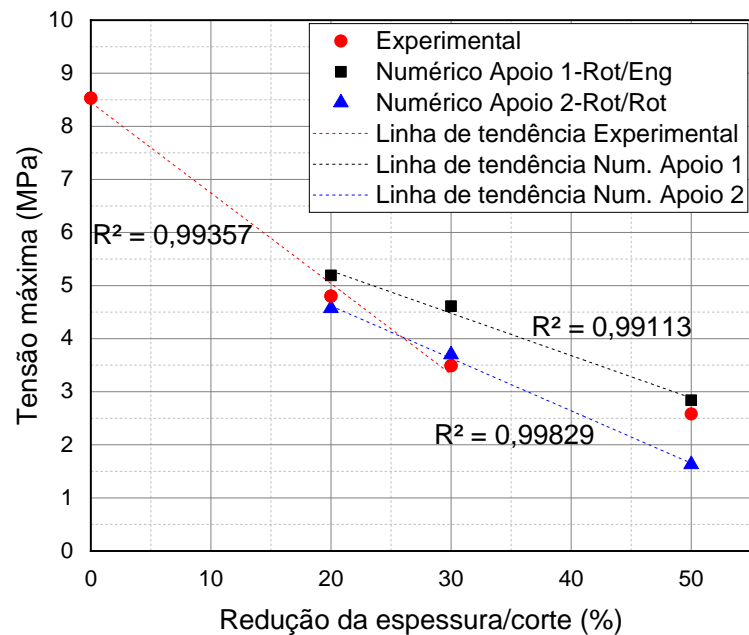
Fonte: Elaboração própria.

Em todos os casos ensaiados, o modelo simulado com as condições de contorno referentes ao Apoio 1 (Rot/Eng) apresentou maior resistência à compressão em relação ao modelo com Apoio 2 (Rot/Rot). Na maioria das simulações se encontraram resultados mais próximos dos experimentais quando foi utilizado o Apoio 1 (Rot/Eng) destacados na tabela anterior.

A resposta de todos os modelos com Apoio 1 (Rot/Eng) é superior ao experimental exceto nos modelos com corte inclinado e, assim como analisado experimentalmente, a resistência à compressão diminui conforme a espessura do corte aumenta

Quando se analisa a influência dos cortes horizontais centrais, os resultados numéricos mostram uma variação linear com a espessura independentemente do tipo de apoio utilizado, conforme Figura 53. Porém o comportamento experimental claramente não é linear. Para melhorar esta análise, é incluído o resultado experimental da parede de referência (ver Milani (2019)). Quando se leva em consideração também esse resultado se pode ver uma variação linear ( $R^2=0,99357$ ) da resistência à compressão axial da parede sem corte, com corte de 20% e com corte de 30%. O ponto que representa o corte com 50% da espessura fica fora desta correlação.

Figura 53 – Análise dos resultados das paredes com cortes horizontais centrais.

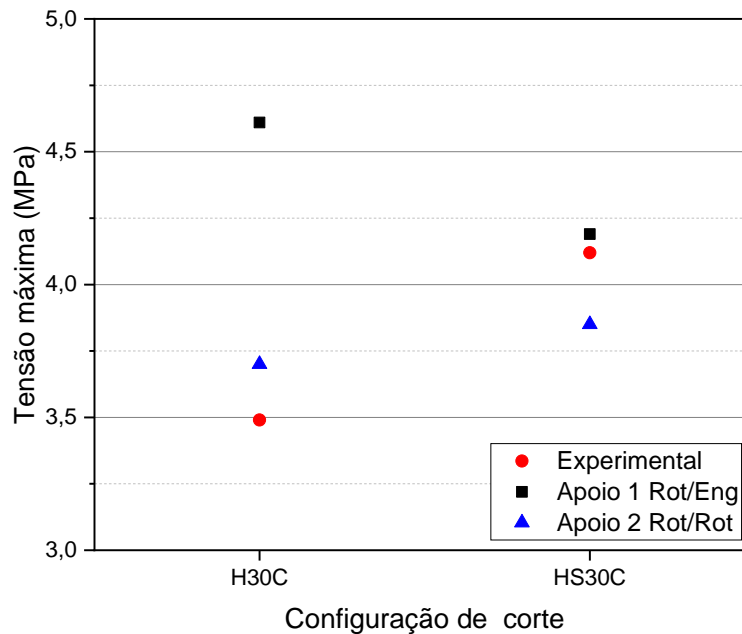


Fonte: Elaboração própria.

Na compressão das paredes experimentais aparecem fissurações nas extremidades, gerando uma rótula no apoio da base, o que faz que o comportamento se aproxime de uma condição de contorno rotulada-rotulada. Dessa forma, os resultados da simulação com essas condições de contorno são semelhantes aos resultados experimentais. Porém quando o corte da parede é grande, no caso 50% da espessura, pode acontecer da falha ocorrer antes dessa fissuração ou esmagamento nos apoios. Neste caso, a simulação com condições rotulada-engastada assemelha-se mais aos resultados experimentais.

Comparando agora os modelos com corte de 30% central e superior (efeito da posição do corte horizontal) também se observa que as simulações com apoios rotulados-rotulados representam melhor os mecanismos de falha aproximando mais a resistência encontrada experimentalmente (ver Figura 54). No entanto quando o corte se encontra mais afastado do apoio engastado esse deixa de ter muita influência nos resultados mostrando praticamente o mesmo resultado.

Figura 54 – Análise dos resultados das paredes com cortes de 30% horizontais centrais e superiores.



Fonte: Elaboração própria.

A variação entre a resistência obtida experimentalmente com corte horizontal (3,49 MPa) e com corte inclinado (5,00 MPa), ambos de 30%, é 0.7. A mesma relação entre as resistências experimentais para o corte de 50% é de quase 0.75 (ver Tabela 13). Portanto, a parede com corte central horizontal resiste aproximadamente 0.7 vezes menos que a parede com corte inclinado, independentemente da profundidade do corte. Também se percebe que o mecanismo de falha é de flexão. E ainda, a relação entre o comprimento do corte central (24 cm) e o comprimento corte inclinado a 45° (34 cm) é 0.7, o mesmo valor encontrado entre as relações da resistência.

Já quando se analisam as simulações, tanto com o Apoio 1 (Rot/Eng) e com o Apoio 2 (Rot/Rot), o comportamento é diferente. Ao invés de aumentar a resistência no corte inclinado (independente da espessura analisada) ela diminui (com exceção do modelo rotulado-rotulado com corte de 50% da espessura que não representa corretamente o comportamento da parede nem do mecanismo de falha). Acredita-se que isto ocorre porque o modelo numérico representa outro modo de falha e não o que está acontecendo experimentalmente, já que Milani (2019) descreveu o modo de falha das paredes inclinadas como ruptura por flexão, e numericamente observou-se ruptura por cisalhamento.

## 5 CONCLUSÕES

A partir deste trabalho foi possível simular numericamente ensaios experimentais de resistência à compressão de paredes de alvenaria em pequena escala, as quais possuíam cortes de diferentes localizações e profundidades. Os modelos foram simulados utilizando o Método dos Elementos Discretos formado por barras. As principais conclusões são descritas a seguir:

- Conseguiu-se uma boa representação dos resultados experimentais com a aplicação do LDEM, alcançando taxas de variação de resistência à compressão menores que 10% em alguns casos;
- Assim como esperado, devido aos resultados experimentais, o comportamento mecânico das paredes foi afetado pela espessura dos cortes, reduzindo a resistência à compressão conforme a espessura dos cortes aumentava;
- O modo de fratura caracterizado por flexão obtidos nos ensaios experimentais foi alcançado, exceto no caso das paredes inclinadas com cortes de 50%, onde foi identificado ruptura por cisalhamento;
- Em relação às condições de contorno utilizadas, 4 (quatro), das 6 (seis) configurações de cortes simuladas, tiveram a resistência à compressão e o modo de falha mais próxima da experimental no caso dos apoios rotulado-engastado;
- O apoio do tipo engastado torna a estrutura mais rígida, quando se rotula consegue-se captar melhor o comportamento e se aproximar do experimental, porém em alguns casos não se capta isso;
- As paredes com cortes horizontais superiores não demonstraram tanta discrepância entre os resultados obtidos pelos apoios 1 (Rot/Eng) e 2 (Rot/Rot), o que pode ser justificado pelo fato de o corte estar mais distanciado do apoio que diferencia a condição de contorno, diminuindo a influência destes nos resultados.

### 5.1. TRABALHOS FUTUROS

A seguir serão apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.



- Utilizar o modelo em questão aplicando diferentes condições de contorno para prever o comportamento das paredes em pequena escala;
- Simular paredes em escala real;
- Analisar numericamente o modelo sob carregamento excêntrico e comparar com os resultados experimentais de base;
- Simular o preenchimento desses cortes e analisar se ocorre a recuperação dos danos causados pelos cortes;
- Ajustar a resposta esperada a fim de analisar as determinações normativas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AS. AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3700-2011**: Masonry structures. Sidney, 2011.

BANDEIRA, M. V. V. **Análise da variação da resistência à compressão axial do concreto com a direção da aplicação de carregamento e com as condições de contorno**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Pampa, 2017.

BIS. BUREAU OF INDIAN STANDARDS. **IS 1905 – 1987**: Code of practice for structural use of unreinforced masonry. Nova Delhi, 2002.

BSI. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS NA EN 1996-1-1 (2005): UK National Annex to Eurocode 6**: Design of masonry structures. general rules for reinforced and unreinforced masonry structures. Londres, 2007.

CEB – EUROPEAN COMMITTEE FOR CONCRETE. **CEB-FIP MODEL CODE 1990**: Design code. Londres, 1993.

CEB – EUROPEAN COMMITTEE FOR CONCRETE. **CEB-FIP MODEL CODE 2010**: First complete draft. Lausanne, 2013.

CEN. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1996-1-1:2005**: Eurocode 6 - design of masonry structures - part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. Bruxelas, 2005.

COLPO, A. **Análise numérica e experimental do efeito de escala em materiais quase frágeis**. 2016. Dissertação (Mestrado) — Dissertação mestrado em engenharia, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, RS, 2016.

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.

DIN. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 1996-1-1**: Bemessung und konstruktion von mauerwerksbauten - teil 1-1: Allgemeine regeln für bewehrtes und unbewehrtes mauerwerk; Änderung a2. Berlim, 2015.

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.

GONÇALVES, N. D. F. **Método dos Volumes Finitos em Malhas não estruturadas**. 2007. Dissertação (Mestrado) — Porto: Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, 2007.

HILLERBORG, A. **A model for fracture analysis**. Division of Building Materials, LTH, Lund University, 1978.

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.

MSJC. MASONRY STANDARDS JOINT COMMITTEE. **TMS 402-08/ACI 53008/ASCE 5-08**: Building code requirements and specification for masonry structures. EUA, 2008.

MURUGARATNAM, K.; UTILI, S.; PETRINIC, N. A combined dem–fem numerical method for shot peening parameter optimisation. **Advances in Engineering Software**, Elsevier, v. 79, p. 13–26, 2015.

NAYFEH, A. H.; HEFZY, M. S. Continuum modeling of three-dimensional truss-like space structures. **Aiaa journal**, v. 16, n. 8, p. 779–787, 1978.

OLIVEIRA, L. M. F. **Estudo teórico e experimental do comportamento das interfaces verticais de paredes interconectadas de alvenaria estrutural**. 2014. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

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.

RIERA, J. D. Local Effects In Impact Problems In Concrete Structures. Em: proceedings, **Conf. on Structural Analysis and Design of Nuclear Power Plants**, UFRGS. Porto Alegre, 1984.

ROCHA, M. **Ruptura e efeitos de escala em materiais não homogêneos**. 1989. Tese (Doutorado) — MS thesis. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

SAHLIN, S. **Fisher's Tests on Chasing Revisited: The Effect of Chasing on the Compressive Strength of Brickwork**, (3.IBMAC, Essen 1973). Sweden, 2007.

SANTOS, E. A. F. **Estudo da influência das propriedades elásticas da interface bloco-argamassa na rigidez de paredes de alvenaria**. 2014. Dissertação (Mestrado) — Dissertação mestrado em engenharia de estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2014.

SILVA, G. S. d. **Estudo da fratura e da propagação de ondas em um meio sólido utilizando o método dos elementos discretos composto por barras no ambiente Abaqus**. 2018. Dissertação (Mestrado) — Dissertação mestrado em engenharia, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, RS, 2018.

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.

SOARES, F. L. **Comportamento mecânico de alvenaria. A influência de abertura de roços**. 2012. 88 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Aveiro, 2012.

VICENTE, R.; VARUM, H.; FIGUEIREDO, A.; FERREIRA, T. M., MENDES DA SILVA, J.A.R. **Proceedings of 9th International Masonry Conference: Hollowed clay brick masonry elements with chases: behaviour under compression**. in: 9th international masonry conference. Guimarães, 2014.

VIDAL, C. D. M. **Avaliação do comportamento anisotrópico do material com método dos elementos discretos formado por barras**. 2019. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pampa, 2019.

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.

ZYDECK, R. C. **Simulações em paredes de alvenaria estrutural com cortes horizontais aplicando o Método dos Elementos Discretos formado por barras**. 2022. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pampa, 2022.