

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RAQUEL CAROLINE ZYDECK

**ANÁLISE NUMÉRICA EM PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL COM
CORTES HORIZONTAIS ATRAVÉS DE MODELOS DE LDEM EM ESTADO PLANO
DE DEFORMAÇÕES**

**Alegrete
2022**

RAQUEL CAROLINE ZYDECK

**ANÁLISE NUMÉRICA EM PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL COM
CORTES HORIZONTAIS ATRAVÉS DE MODELOS DE LDEM EM ESTADO PLANO
DE DEFORMAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia (PPEng) da Universidade Federal do Pampa, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Luis Eduardo Kostaschi

Coorientador: Alisson Simonetti Milani

**Alegrete
2022**

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) .

Z99a Zydeck, Raquel Caroline

Análise numérica em paredes de alvenaria estrutural com
cortes horizontais através de modelos de LDEM em estado plano
de deformações. / Raquel Caroline Zydeck.

99 p.

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

"Orientação: Luis Eduardo Kostaski".

1. Cortes. 2. Simulações Numéricas. 3. Alvenaria
Estrutural. 4. Comportamento Mecânico. 5. LDEM. I. Título.

RAQUEL CAROLINE ZYDECK

**ANÁLISE NUMÉRICA EM PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL COM CORTES
HORIZONTAIS ATRAVÉS DE MODELOS DE LDEM EM ESTADO PLANO DE
DEFORMAÇÕES**

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: 04 de março de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luis Eduardo Kostascki

Orientador

Unipampa

Prof. Dr. Alisson Simonetti Milani

Co-Orientador

Unipampa

Prof. Dr. André Lubeck

UFSM

Prof. Dr. Rene Quispe Rodriguez

UFSM



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO KOSTESKI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/03/2022, às 16:44, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALISSON SIMONETTI MILANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/03/2022, às 19:09, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **André Lübeck, Usuário Externo**, em 08/03/2022, às 10:14, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Rene Quispe Rodríguez, Usuário Externo**, em 08/03/2022, às 14:27, 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, informando o código verificador 0745515 e o código CRC 6B6D700A.

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a Deus por ter me guiado e me concedido sabedoria para realizar esta etapa.

Aos meus pais Ernesto Zydeck e Lúcia Maria Roiek Zydeck, ao meu irmão Rafael Zydeck e a minha cunhada Olga Zydeck, pelo incentivo, apoio, carinho em cada conquista desta jornada. Mesmo com a distância vocês sempre se fizeram presentes em me aconselhar e me apoiar em todas as minhas decisões. Todas as conquistas são frutos do que vocês semearam, muito obrigada por tudo. Amo vocês.

Aos amores da minha vida, meu companheiro Jaelson Budny e meu querido filho Henrique Zydeck Budny, com vocês essa jornada se tornou mais leve. Agradeço pela paciência, compreensão, carinho, atenção, principalmente no período puerpério, pois foi um dos momentos mais difíceis em conseguir conciliar a maternidade com o mestrado, sem a sua ajuda, esta etapa não seria concluída, muito obrigada por tudo, amo muito vocês.

Ao meu orientador, professor Luis Eduardo Kostascki por toda a paciência e incentivo em fazer eu permanecer no mestrado. Por toda a sua dedicação e orientação ao longo desta pesquisa. Ao professor Alisson Simonetti Milani pela colaboração e considerações.

Aos colegas e amigos, em especial a Diovana Della Flora, Danieli Duó, Juliana Quevedo, Rosiéli Jardim, Nadine Fischer, Matthews Bandeira, Camila Vargas, Kevin Rebolledo, Pedro Jucá e Gustavo Laionel, pela parceria e aprendizados ao longo deste caminho, sem o apoio de vocês com certeza o caminho seria mais árduo.

À UNIPAMPA, a todos os outros professores, profissionais, técnicos e terceirizados que contribuíram ao longo desta caminhada para a minha formação.

À CNPQ pela bolsa de estudos.

À todos meu muito obrigada!

RESUMO

A execução dos cortes em paredes de alvenaria estrutural muitas vezes ocorre pela necessidade de realizar a passagem de instalações elétricas, hidráulicas, gás, entre outras. Ainda hoje em dia os cortes são realizados sem a previsão em projetos, causando assim a diminuição da capacidade de resistência das paredes. Desta forma, o presente trabalho visa estudar um modelo simplificado em estado plano de deformações (2D), para obter o comportamento mecânico das paredes de alvenaria estrutural com cortes horizontais, através de simulações numéricas, utilizando o Método dos Elementos Discretos formado por Barras (do inglês LDEM). Para isso definiu-se as propriedades do material e da malha para realizar as simulações numéricas de forma mais eficiente. Foram simuladas diferentes alturas de cortes horizontais nas paredes, diferentes profundidades de cortes horizontais, sendo eles, 20%, 30% e 50% de espessura. Também foram simuladas diferentes condições de contorno como: rotulado-rotulado e engastado-rotulado. Ainda foi alterada a excentricidade de aplicação do carregamento. Como resultados tem-se: o comprimento de malha que se aproximou mais dos resultados experimentais utilizados como parâmetros para a análise deste estudo foram os comprimentos de malha de 2,8 e 2,0 mm, com um esforço computacional viável, sendo que o comprimento de 2,0 mm foi o escolhido. Analisando as condições de contorno rotulado-rotulado com corte e carregamento central, verificou-se que a fissura inicia no corte e se propaga de forma simétrica para cima e para baixo, enquanto que com a condição engastado-rotulado, a fissura também inicia no corte, porém se propaga para cima até chegar no apoio superior e depois desce para o apoio inferior. Outra conclusão importante é que quando são simuladas as condições de contorno rotulado-rotulado ou engastado-rotulado, para os modelos simples ou mistos, a configuração de falha é semelhante, entre os modelos com a mesma condição de contorno, já quando é simulado os modelos discretizados de argamassa e bloco o modo da configuração de falha é diferente. Analisando o corte central ou corte superior com o carregamento excêntrico, a fissura inicia no corte e se propaga para a parte superior da parede, independentemente da condição de contorno que é simulado.

Palavras-Chave: cortes, simulações numéricas, alvenaria estrutural, comportamento mecânico, LDEM.

ABSTRACT

The execution of chases in structural masonry walls often occurs due to the need to carry out the passage of electrical, hydraulic, gas, among others. Even today, chases are made without forecast in projects, thus causing a decrease in the resistance capacity of the walls. In this way, the present work aims to study a simplified model in plane deformation state (2D), to obtain the mechanical behavior of structural masonry walls with horizontal sections, through numerical simulations, using the Lattice Discrete Element Method (from the English LDEM). For this, the properties of the material and the mesh were defined to perform the numerical simulations more efficiently. Different heights of horizontal chases were simulated in the walls, different depths of horizontal chases, being them, 20%, 30% and 50% of thickness. Different boundary conditions were also simulated, such as: labeled-labeled and crimped-labeled. The load application eccentricity was also changed. As results we have: the mesh length that came closest to the experimental results used as parameters for the analysis of this study were the mesh lengths of 2.8 and 2.0 mm, with a viable computational effort, and the length of 2.0 mm was chosen. Analyzing the labeled-label boundary conditions with shear and central loading, it was verified that the crack starts at the cut and propagates symmetrically up and down, while with the fixed-labeled condition, the crack also starts at the chases, but it propagates upward until it reaches the upper support and then descends to the lower support. Another important conclusion is that when the labeled-labeled or crimped-labeled boundary conditions are simulated, for simple or mixed models, the failure configuration is always similar, between the models with the same boundary condition, already when the models are simulated. Mortar and block discretized the failure configuration mode is different. Analyzing the center chase or top chase with eccentric loading, the crack starts at the cut and propagates to the top of the wall, regardless of the boundary condition that is simulated.

Keywords: chases, numerical simulations, structural masonry, mechanical behavior, LDEM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes modelagens em paredes de alvenaria estrutural	7
Figura 2 – Cortes realizados para a passagem de instalação elétrica em paredes de alvenaria	7
Figura 3 – Relação entre a resistência das paredes sem corte e índice de dano para as paredes, para cada grupo.....	12
Figura 4 – Cortes nas paredes ensaiadas à compressão.....	13
Figura 5 – Exemplos dos cortes nas paredes com blocos cerâmicos.....	14
Figura 6 – Padrão típico das fissuras	14
Figura 7 – Exemplos dos cortes nas paredes de bloco cerâmico.....	15
Figura 8 – Disposição das paredes experimentais a) vistas frontal e lateral; b) e c) amostras com carregamento centrado e excêntrico, respectivamente	17
Figura 9 – Modos de ruptura, com carregamento centrado e excêntrico	17
Figura 10 – Deslocamentos da malha triangular	18
Figura 11 – Exemplo do modelo usado pelos autores a) modelo 3D; b) modo de ruptura; c) gráfico do fator de carga	20
Figura 12 – a) parte do modelo 2D em MEF, b) redução de et dependendo de tch e ach	20
Figura 13 – Modelos das paredes em 3D: a) modelo parede homogênea e b) modelo do bloco cerâmico com as juntas de argamassa	21
Figura 14 – Modelo da parede homogênea com: a) geometria; b) carregamento e condições de contorno no topo e c) condições de contorno da base	22
Figura 15 – Algumas configurações de falha para o modelo numérico apenas com as propriedades homogêneas do bloco em 3D.....	22
Figura 16 – Configurações de falha para os modelos com bloco + junta de argamassa	23
Figura 17 – a) geometrias em escala real e reduzida; b) dimensões do bloco em escala reduzida em milímetros.....	24
Figura 18 – a) pequenas paredes em escala natural e reduzida; b) esquema do ensaio em escala reduzida e c) modo de ruptura das pequenas paredes em escala reduzida	26
Figura 19 – a) Esquemas das profundidades dos cortes nas paredes e b) Corte horizontal na metade da parede, em escala reduzida	27
Figura 20 – Esquema de aplicação da carga para as paredes em escala reduzida	28
Figura 21 – Modo de ruptura para as paredes: a) H20C, b) H30C e c) H50C	29
Figura 22 – Modo de ruptura para as paredes: a) HS30C, b) H30E e c) HS30E	29
Figura 23 – Modos de falha para as paredes: a) H20C, H30C e H50C e b) HS30E	30

Figura 24 – Influência dos cortes na horizontal, redução da resistência a) profundidade do corte e b) redução da área líquida.....	30
Figura 25 – Representação utilizada no LDEM: a) modelo cúbico básico b) corpo prismático ...	31
Figura 26 – Lei constitutiva bilinear	33
Figura 27 – Modelo de tensão pós falha versus deslocamento vinculada à energia de fratura utilizado no <i>Abaqus/Explicit</i>	36
Figura 28 – Esquema das atividades que foram realizadas	38
Figura 29 – Detalhamento da condição de contorno RO-RO: a) parte inferior da parte b) parte superior da parede.....	42
Figura 30 – Detalhamento das malhas estudadas, com os respectivos comprimentos do LDEM	42
Figura 31 – Pontos onde foram medidos os deslocamento após a realização das simulações ...	44
Figura 32 – a) tensão de compressão <i>versus</i> deformação específica; b) tensão de compressão versus deslocamento fora do plano	44
Figura 33 – Configuração de falha deformada para cada comprimento do LDEM simulado.....	45
Figura 34 – Condições de contorno RO-RO: a) modelo simples LDEM; b) e c) modelos mistos LDEM + FEM, com 5 e 7 módulos de altura do FEM, respectivamente	47
Figura 35 – Modelos numéricos da parede em alvenaria estrutural em 2D: a) modelo simples; ..	48
Figura 36 – Parede homogeneizada com 20% de corte: a) Tensão de compressão <i>versus</i> deformação específica; b) Tensão de compressão <i>versus</i> deslocamento fora do plano, para a condição RO-RO	49
Figura 37 – Configuração de falha deformada, com a condição RO-RO: a) modelo simples; b) modelo misto LDEM + 5FEM; c) modelo misto LDEM + 7FEM.....	49
Figura 38 – Condição de contorno EN-RO: a) modelo simples LDEM; b) modelo misto LDEM + 7FEM; c) modelo misto LDEM + 7FEM aplicação do deslocamento invertido	51
Figura 39 – Parede homogeneizada com 20% de corte: a) tensão de compressão <i>versus</i> deformação específica; b) tensão de compressão <i>versus</i> deslocamento fora do plano, para a condição EN-RO	52
Figura 40 – Configuração de falha deformada, com a condição EN-RO: a) modelo simples; b) modelo misto; c) modelo misto com deslocamento invertido.....	52
Figura 41 – Condição de contorno RO-RO: a) modelo simple LDEM; b) Interação entre o LDEM e FEM	54
Figura 42 – Modelo Misto LDEM + FEM (parede e aço): a) Condição de contorno RO-RO; b) Condição de contorno EN-RO; c) Interação entre o LDEM + FEM e FEM + FEM	55

Figura 43 – Condição de contorno RO-RO: a) modelo simples LDEM; b) modelo misto LDEM + FEM (aço); c) Interação entre o LDEM e FEM	57
Figura 44 – a) tensão de compressão <i>versus</i> deformação específica; b) tensão de compressão <i>versus</i> deslocamento fora do plano, para a condição RO-RO	58
Figura 45 – Configuração de falha deformada, para a condição RO-RO: a) modelo simples; b) modelo misto	59
Figura 46 – Condição de contorno EN-RO: a) modelo simples LDEM; b) modelo misto LDEM + FEM (aço); c) Interação entre o LDEM e FEM	60
Figura 47 – a) tensão de compressão <i>versus</i> deformação específica; b) tensão de compressão <i>versus</i> deslocamento fora do plano	61
Figura 48 – Configuração de falha deformada, para a condição EN-RO: a) modelo simples; b) modelo misto	61
Figura 49 – a) configuração do modelo bloco + argamassa; b) representação dos blocos; c) representação da argamassa e d) detalhamento da malha, com a representação do corte	63
Figura 50 – Modelos simulados com corte central com 20% de profundidade e suas respectivas configurações de falha: a) condição RO-RO ; b) condição EN-RO	65
Figura 51 – Corte central com 20% de profundidade: a) tensão de compressão <i>versus</i> deformação específica; b) tensão de compressão <i>versus</i> deslocamento fora do plano	65
Figura 52 – Corte central com 30% de profundidade: a) tensão de compressão <i>versus</i> deformação específica; b) tensão de compressão <i>versus</i> deslocamento fora do plano	66
Figura 53 – Modelos simulados com corte central com 30% de profundidade e suas respectivas configurações de falha: a) condição RO-RO; b) condição EN-RO	67
Figura 54 – Modelos simulados com corte central com 50% de profundidade e suas respectivas configurações de falha: a) condição RO-RO; b) condição EN-RO	68
Figura 55 – Corte central com 50% de profundidade: a) tensão de compressão <i>versus</i> deformação específica; b) tensão de compressão <i>versus</i> deslocamento fora do plano	68
Figura 56 – Corte central com carregamento excêntrico 30% de profundidade: a) tensão de compressão <i>versus</i> deformação específica; b) tensão de compressão <i>versus</i> deslocamento fora do plano	69
Figura 57 – a) Distância da excentricidade e b) distância do corte superior	70
Figura 58 – Corte central com carregamento excêntrico, com sua respectiva configuração de falha: a) condição RO-RO; b) condição EN-RO	70

Figura 59 – Corte superior com carregamento excêntrico 30% de profundidade: a) tensão de compressão <i>versus</i> deformação específica; b) tensão de compressão <i>versus</i> deslocamento fora do plano	71
Figura 60 – Modelos com corte superior com carregamento excêntrico e suas respectivas configurações de falha: a) condição RO-RO; b) condição EN-RO; c) deslocamento invertido ...	72
Figura 61 – Modelos com corte superior e carregamento centrado com a configuração de falha: a) condição RO-RO; b) condição EN-RO	73
Figura 62 – Corte superior com carregamento centrado 30% de profundidade: a) tensão de compressão <i>versus</i> deformação; b) tensão de compressão <i>versus</i> deslocamento fora do plano ...	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pesquisas desenvolvidas numericamente em alvenaria estrutural.....	5
Tabela 2 – Resumos dos limites para os cortes horizontais em paredes de alvenaria estrutural.....	9
Tabela 3 – Resumo dos limites para os cortes verticais em paredes de alvenaria estrutural.....	9
Tabela 4 – Resultados das propriedades mecânicas dos blocos em escala reduzida.....	24
Tabela 5 – Resultados dos ensaios das pequenas paredes em escala reduzida.....	26
Tabela 6 – Descrição das paredes com cortes horizontais ensaiadas por Milani (2019).....	27
Tabela 7 – Parâmetros para a Equação 16.....	39
Tabela 8 – Propriedades utilizadas nas simulações.....	40
Tabela 9 – Tensões de ruptura para cada módulo cúbico básico ensaiado e duração do ensaio ...	43
Tabela 10 – Tensões de ruptura para cada modelo analisado com a condição RO-RO.....	48
Tabela 11 – Tensões de ruptura para cada modelo analisado com a condição EN-RO.....	51
Tabela 12 – Propriedades adaptadas para usar nas simulações numéricas.....	56
Tabela 13 – Propriedades do aço.....	58
Tabela 14 – Tensões de ruptura com o módulo de elasticidade equivalente, condição RO-RO...	58
Tabela 15 – Tensões de ruptura com o módulo de elasticidade equivalente, condição EN-RO...	60
Tabela 16 – Propriedades utilizadas das simulações.....	64
Tabela 17 – Resistência dos modelos simulados.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AS – Australian Standard
- BIS – Bureau of Indian Standards
- BSI – British Standards Institution
- DEM – Método dos Elementos Discretos
- DGFM – Deutsche Gesellschaft Für Mauerwerksbau
- DIN – Deutsches Institut Für Normung
- LDEM – Método dos Elementos Discretos formados por Barras
- LVDT – Transdutor de deslocamento variável linear
- MEF – Método dos Elementos Finitos
- NBR – Norma Técnica Brasileira
- RCE – Relação Constitutiva Elementar

LISTA DE SÍMBOLOS

- e – Excentricidade da aplicação da carga
- t_{ch} - Profundidade do corte
- a_{ch} - Distância entre a laje e o corte
- $\frac{A_{liq}}{A_{bruta}}$ – Relação entre área líquida e área bruta
- L – Comprimento do módulo cúbico do LDEM
- ϕ – Fator de redução da capacidade de carga
- $F(t)$ – Vetor que contém as forças internas que atuam sobre as massas nodais
- ε - Deformação longitudinal
- ε_p – Deformação crítica de falha
- ε_r – Deformação limite de falha
- E – Módulo de elasticidade do material
- A_i – Área da seção transversal do elemento
- i – Índices, que podem ser l e d
- l – Elemento longitudinal
- d – Elemento diagonal
- G_f – Energia específica de fratura
- R_f – Fator de falha
- Y – Parâmetro adimensional dependendo da amostra e geometria da fissura
- a – Defeito intrínseco de tamanho
- K_r – Coeficiente que relaciona ε_p e ε_r
- A_i^f – Área da seção transversal do elemento
- L_i – Comprimento do elemento relacionado ao nível i
- L_{crit} – Comprimento crítico do elemento
- σ_t – Tensão de tração do modelo coesivo
- σ_{tu} – Tensão de falha à tração do modelo coesivo
- u_n – Deslocamento
- u_{n0} – Deslocamento para o qual não são mais transmitidas tensões
- G_{F0} – Valor base da energia de fratura, que depende do $d_{máx}$
- $d_{máx}$ – Diâmetro máximo do agregado
- f_{cm} – Resistência à compressão do bloco na área líquida

f_{cm0} – Valor de 10 MPa conforme CEB-FIP Model Code (1990)

ρ – Massa específica/Densidade do material

ν – Coeficiente de Poisson do material

σ_{rup} – Tensão de ruptura

A_l – Área da seção transversal do elemento longitudinal

A_d – Área dos elementos diagonais

δ – Coeficiente representativo do sólido isotrópico

$P(t)$ – Vetor que contém as forças externas que atuam sobre as massas nodais

M – Matriz de massa

C – Matriz de amortecimento

Δ_t – Incremento de tempo

C_p – Velocidade de propagação da onda longitudinal

t_c – Profundidade do corte

t – Espessura da parede

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização do Tema	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo Geral.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 Justificativa	3
1.4 Estrutura da Pesquisa	4
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 Alvenaria Estrutural.....	5
2.1.1 Estudos sobre Alvenaria Estrutural	5
2.2 Cortes em paredes de alvenaria estrutural.....	7
2.3 Normalizações sobre cortes em paredes de alvenaria estrutural	8
2.3.1 Normas Brasileiras.....	8
2.3.2 Normas Internacionais.....	8
2.4 Pesquisas experimentais desenvolvidas em paredes de alvenaria estrutural com cortes	10
2.5 Simulações numéricas em paredes de alvenaria estrutural com cortes	18
2.6 Trabalho referência para o presente estudo, Milani (2019)	24
2.7 Método dos Elementos Discretos formado por barras (LDEM)	31
2.7.1 Implementação do LDEM no ambiente <i>Abaqus/Explicit</i>	36
3 METODOLOGIA	38
3.1 Definição das propriedades e da malha.....	38
3.1.1 Definição das propriedades do material	39
3.1.2 Definição da malha	40
4 ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	46
4.1 Condição rotulado-rotulado (RO-RO)	46
4.2 Condição engastado-rotulado (EN-RO)	50

4.3 Análise dos resultados obtidos com as condições RO-RO e EN-RO	53
4.4 Condição RO-RO com o módulo de elasticidade equivalente	56
4.5 Condição EN-RO com o módulo de elasticidade equivalente	59
5 MODELOS SIMULADOS COM O LDEM E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	63
5.1 Corte central com 20, 30 e 50% de profundidade, com carregamento centrado.....	63
5.2 Cortes central e superior com 30% de profundidade, com carregamento centrado e excêntrico	69
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
6.1 Sugestões para trabalhos futuros	76
REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Tema

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo, formado por blocos modulares unidos com argamassa. Essa união de elementos formam as paredes, as quais são as responsáveis por absorver todas as ações verticais e horizontais (MOHAMAD, 2020). As paredes de alvenaria estrutural também são usadas para resistir às cargas solicitadas, substituindo os pilares e vigas utilizados nos sistemas de concreto armado, aço ou madeira (ROMAN, ARAÚJO e MUTTI, 1999). De acordo com Duarte (1999), as edificações em alvenaria estrutural são as construções que têm maior aceitação pelo homem, não somente hoje, mas também nas civilizações mais antigas, pois edificações monumentais em alvenaria de pedras ou tijolos permanecem ainda em pé, após mais de 2000 anos passados desde suas construções.

Alguns estudos realizados por especialistas em construção comparam que a alvenaria estrutural com bloco de concreto, permite reduzir o custo das obras em até 30% para edificações de até quatro pavimentos e em 15% para edificações com 20 pavimentos (WORDPRESS, 2015). Ou seja, quando bem executado e projetado esse sistema construtivo tem grandes vantagens, como o baixo custo, agilidade na execução e menores desperdícios em obra quando comparado aos sistemas construtivos tradicionais (MEDEIROS e SABBASTINI 1993; JOAQUIM, 1999).

Apesar dos diversos estudos desenvolvidos para o entendimento do sistema construtivo em alvenaria estrutural, um tema até hoje pouco abordado é o efeito de cortes no comportamento mecânico das paredes. A norma brasileira de alvenaria estrutural NBR 16868 (2020), contém algumas limitações com relação a dimensões máximas de cortes, de forma a não afetar o comportamento estrutural das paredes, porém não traz nenhuma informação ou limitação sobre a profundidade e localização dos cortes, nem orienta como se proceder ou como determinar a resistência residual de uma parede em caso de execução de corte em paredes.

Mesmo com as restrições impostas pela NBR 16868 (2020), é comum encontrar paredes com cortes não previstos em projeto. Em geral esses cortes são executados em duas situações. A primeira é ainda na fase de execução, onde a falta de compatibilização entre projetos estrutural e de instalações resulta em adaptações realizadas em obras. A segunda situação é em casos de reformas ou instalações de equipamentos em posições não previstas em projeto. Um exemplo comum desse caso são cortes executados para passagem de tubulações de condicionadores de ar.

Estudos experimentais mais detalhados são encontrados internacionalmente o que se reflete nas normas desses países. Algumas normas, como por exemplo a da união europeia, contém

valores limites de execução de cortes verticais, horizontais e inclinados, sem a necessidade de verificações adicionais de dimensionamento. Apesar dessas normas apresentarem esses limites, não trazem informações de como se proceder caso eles sejam ultrapassados nem quanto à perda de capacidade resistente desses elementos. Cabe ressaltar que essas normas foram elaboradas utilizando os materiais e métodos construtivos daqueles países, apresentando restrições para aplicação com os materiais usados normalmente no Brasil.

Estudos relacionados à cortes em paredes de alvenaria são relativamente recentes, com poucas pesquisas desenvolvidas. Entre os primeiros trabalhos desenvolvidos estão os de Fisher (1973) e Kirtschig e Metje (1986). Mais recentemente, os trabalhos de Mojsilovic, Notz e Wäfler (2009), Lima (2009), Mojsilovic (2011), Soares (2012), Reichel, Jäger e Bakeer (2013), Vicente *et al.* (2014) e Milani (2019). A maioria desses trabalhos corresponde a estudos experimentais que avaliam diferentes configurações de corte, variando os tipos de blocos, dimensões das paredes, localização, orientação, preenchimento e dimensões dos cortes.

Dentre as pesquisas citadas anteriormente, apenas as desenvolvidas por Mojsilovic (2011) e Reichel, Jäger e Bakeer (2013) realizaram simulações numéricas através de modelos contínuos, buscando correlacionar com resultados experimentais. Mais recentemente Medeiros, Milani, Lubeck *et al.* (2022) realizaram análises numéricas através do Método de Elementos Finitos (MEF) e também com o Método dos Elementos Discretos formados por Barras (LDEM), concluindo que esse último tem um bom potencial para estudos de problemas de cortes em paredes de alvenaria estrutural.

Existem diversos métodos numéricos que podem ser usados para verificar o comportamento da estrutura. Neste trabalho será empregado o método do LDEM, para verificar o comportamento mecânico e prever a carga de ruptura em paredes de alvenaria estrutural cerâmica com cortes horizontais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar um modelo simplificado em estado plano de deformações (2D) com o Método dos Elementos Discretos formados por barras, que permita observar o comportamento de paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos com cortes horizontais.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos deste trabalho, têm-se:

- Definir as propriedades do modelo em estado plano de deformação, sendo elas parâmetros do material e malha para a realização das simulações numéricas de forma mais eficiente;
- Simular a influência dos cortes horizontais na metade e na parte superior das paredes de alvenaria estrutural;
- Simular cortes com 20%, 30% e 50% de profundidade;
- Estudar a alteração dos resultados ao mudar a excentricidade de aplicação do carregamento;
- Alterar as condições de contorno nas simulações numéricas;
- Comparar os resultados das simulações numéricas com os resultados encontrados experimentalmente por Milani (2019).

1.3 Justificativa

A execução de cortes em paredes de alvenaria estrutural pode alterar consideravelmente o comportamento mecânico desses elementos, sendo que, a previsão desse comportamento, bem como a previsão da perda de capacidade de carga desempenham papéis fundamentais no estudo do sistema em alvenaria estrutural.

O custo para realizar testes experimentais sobre alvenaria estrutural dificulta estudar diferentes combinações de efeitos, motivo pelos quais os modelos numéricos se tornam cada vez mais importantes. Atualmente não existem muitas pesquisas através de simulações numéricas, sobre a capacidade de carga das paredes de alvenaria estrutural com cortes, muitas vezes executados para passagem de tubulações e dutos.

O LDEM é um método robusto capaz de simular a fratura de materiais frágeis como a alvenaria, demonstrando ser uma alternativa promissora para o estudo do problema de cortes em paredes de alvenaria. Desta forma este estudo é desenvolvido aplicando o método do LDEM, em paredes de alvenaria estrutural com cortes horizontais, para avaliar o comportamento mecânicos das paredes.

1.4 Estrutura da Pesquisa

O presente trabalho está dividido em seis capítulos para alcançar os objetivos estabelecidos. No primeiro capítulo é apresentada a introdução, os objetivos, a justificativa e a estrutura proposta desta pesquisa.

Uma revisão da literatura é realizada no segundo capítulo, abordando conceitos necessários para a aquisição do embasamento teórico para o desenvolvimento do trabalho. Neste capítulo é realizada a apresentação do conceito de alvenaria estrutural, alguns estudos sobre alvenaria estrutural, a importância de cortes em paredes de alvenaria estrutural, as normas que apresentam limitações sobre cortes em paredes de alvenaria estrutural, algumas pesquisas experimentais e numéricas com cortes em paredes de alvenaria estrutural, o trabalho referência para o presente estudo e o método usado para a realização desta pesquisa.

No terceiro capítulo é definido as propriedades do material e da malha para realizar as simulações numéricas. O quarto capítulo, apresenta as condições de contorno estudadas, assim como uma análise dos resultados encontrados.

No quinto capítulo são apresentados os modelos simulados com o LDEM, juntamente com a análise dos resultados. Por fim, o sexto e último capítulo, apresenta as considerações finais da presente pesquisa, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os tópicos dos conceitos gerais da revisão bibliográfica realizada. No decorrer da revisão bibliográfica é abordada uma contextualização sobre o que é alvenaria estrutural, alguns estudos sobre o sistema, a existência de cortes em paredes, normalizações nacionais e internacionais sobre cortes em paredes de alvenaria estrutural, alguns trabalhos experimentais e numéricos em escala natural e reduzida em alvenaria estrutural com cortes e também é apresentado de forma mais detalhada o trabalho referência para o presente estudo.

2.1 Alvenaria Estrutural

Lourenço (1999) define alvenaria estrutural como um conjunto de peças sobrepostas, ligadas por uma argamassa, tornando o conjunto monolítico. Esse conjunto formado, tem a função de resistir a cargas verticais, promover segurança, resistir a impactos, a ação do fogo, isolar e proteger acusticamente os ambientes. De acordo com as funções estruturais que desempenham, as paredes de alvenaria estrutural podem ser classificadas como paredes armadas, não armadas, confinadas ou de contenção. Prudêncio, Oliveira e Bedin (2002), além de definir a alvenaria estrutural como um tipo de estrutura onde as paredes são elementos compostos unidos por juntas de argamassa, elas também são capazes de resistirem ao seu peso próprio, como outras cargas.

Segundo a NBR 16868 – 1 (2020), parede estrutural é toda parede admitida como participante da estrutura, enquanto parede não estrutural é toda parede não admitida como participante da estrutura.

2.1.1 Estudos sobre Alvenaria Estrutural

Na Tabela 1 é apresentado algumas pesquisas desenvolvidas em alvenaria estrutural, através de modelos numéricos.

Tabela 1 – Pesquisas desenvolvidas numericamente em alvenaria estrutural

Ano	Autores	Pesquisas desenvolvidas
1986	Cheema e Klingne	Desenvolveram um modelo matemático para prever a carga e o modo de ruptura em prismas de blocos de concreto;
1996	Sayed-Ahmad e Shrive	Utilizaram elementos finitos para desenvolver um modelo de análise elasto-plástica em prismas de concreto;

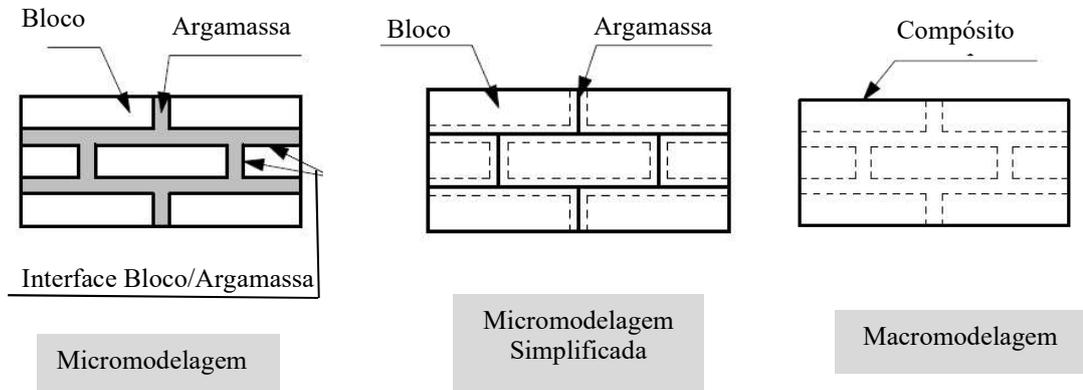
... continuação Tabela 1		
2002	Peleteiro	Realizou modelagens numéricas em painéis de alvenaria estrutural, para verificar a transferência de forças entre as paredes;
	Holanda Júnior	Estudou a influência de recalques em alvenaria estrutural cerâmica;
2003	Nascimento Neto	Estudou painéis de alvenaria, submetidos a carregamentos horizontais;
2005	Capuzzo Neto	Realizou ensaios experimentais e numéricos para avaliar a interação de paredes de alvenaria estrutural cerâmica com amarração direta, submetidas a ações verticais;
	Maurício	Estudou ligações diretas entre paredes e blocos de concreto, através de ensaios experimentais e numéricos;
2011	Haach et al.	Estudaram numericamente a influência dos flanges no comportamento das paredes de alvenarias estrutural não armada sob carregamento horizontal;
2014	Oliveira	Estudou numericamente e experimentalmente a amarração direta e indireta em paredes de alvenaria estrutural, utilizando blocos de concreto e cerâmicos;
	Nascimento Neto et al.	Realizaram um modelo teórico de edifícios altos em alvenaria estrutural;
2015	Izquierdo	Estudou o comportamento da interface graute/bloco em elementos de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos e blocos de concreto, através de ensaios experimentais e numéricos;
2016	Santos	Utilizou modelos numéricos em elementos finitos para verificar a interação de paredes de alvenaria estrutural submetidas a ações verticais com blocos de concreto;
2018	Corrêa et al.	Estudaram o efeito da distribuição de cargas verticais entre paredes de alvenaria, através de ensaios experimentais e numéricos;
2020	Lopes et al.	Realizaram modelagens numéricas tridimensionais de um edifício em alvenaria estrutural para verificar o comportamento do sistema parede-viga.

Fonte: Elaboração própria

De acordo com Lourenço (1996), por se tratar de uma estrutura complexa a qual é composta por um conjunto de blocos modulares sobrepostos com suas interfaces preenchidas por argamassa o desenvolvimento destes modelos numéricos é um desafio. Os modelos numéricos podem ser desenvolvidos de acordo com o nível de precisão e simplicidade desejada, podendo ser classificado

como: micromodelagem, micromodelagem simplificada e macromodelagem (LOURENÇO, 1996). Os diferentes tipos de modelos em paredes de alvenaria estrutural são apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Diferentes modelagens em paredes de alvenaria estrutural



Fonte: adaptado Lourenço (1996)

2.2 Cortes em paredes de alvenaria estrutural

Os cortes em paredes de alvenaria estrutural, geralmente são executados para realizar a passagem de instalações elétricas, hidrossanitárias e de gás (Mojsilovic, 2011). Entretanto, os cortes não deveriam ser executados em paredes de alvenaria estrutural sem sua previsão nos projetos, pois os mesmos diminuem o desempenho mecânico das paredes. Segundo Mojsilovic (2011), os cortes normalmente são executados na vertical ou horizontal, mas na prática, podem ser vistos em qualquer direção, um exemplo disso está apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Cortes realizados para a passagem de instalação elétrica em paredes de alvenaria



Fonte: Adaptado de Mojsilovic (2011)

2.3 Normalizações sobre cortes em paredes de alvenaria estrutural

As normas sobre alvenaria estrutural recomendam os limites existentes para os tipos de cortes em paredes de alvenaria, para a realização de passagens de instalações. Neste sub item do trabalho, são apresentadas brevemente algumas normas nacionais e internacionais sobre cortes e recuos em paredes de alvenaria.

2.3.1 Normas Brasileiras

No Brasil até o ano de 2020 existia basicamente duas normas que abordavam sobre projetos de edificações em alvenaria. A primeira trata de alvenaria de bloco cerâmicos, que é a NBR 15812 – 1 (2010) e a segunda é a NBR 15961 – 1 (2011), com a utilização de blocos de concreto. Em 2020 começou a reger a NBR 16868, que une as duas normas citadas anteriormente. A NBR 16868 (2020), está dividida em três partes: a parte 1, trata sobre projetos, na parte 2 é apresentada a execução e controle de obras e na parte 3 são abordados os métodos de ensaio.

No capítulo 10, sub item 10.2 em cortes e juntas da NBR 16868 (2020) parte 1, estabelece que os cortes em paredes devem ser previstos no projeto estrutural, caso for cortado algum trecho da parede, deve ser descontado da seção da parede no projeto. Também recomenda que cortes verticais de comprimento superior a 60 cm são considerados como elementos distintos. Ainda não são permitidos condutos de fluidos embutidos em paredes estruturais, exceto quando não é necessário o corte para a manutenção do mesmo.

A NBR 15812 – 1 (2010), ainda indica que em paredes estruturais não é permitido corte individual horizontal de comprimento superior a 40 cm e não são permitidos cortes horizontais em uma mesma parede cujos comprimentos somados ultrapassem 1/6 do comprimento total da parede em planta.

2.3.2 Normas Internacionais

Um resumo é apresentado nas Tabela 2 e Tabela 3 dos principais limites de dimensão e posicionamento para os cortes horizontais e verticais, presentes nas normas internacionais.

Tabela 2 – Resumos dos limites para os cortes horizontais em paredes de alvenaria estrutural

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

Onde: t_{par} = largura da parede; λ_{par} = índice de esbeltes da parede; L_{par} = comprimento máximo da parede; h_{par} = altura da parede; L_{corte} = comprimento do corte.

a - Utilizado para cortes inclinados.

b - Função do comprimento e espessura da parede.

c - Dois casos: paredes carregadas na vertical e paredes carregadas na vertical e na horizontal.

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

Fonte: adaptado de Milani (2019)

Tabela 3 – Resumo dos limites para os cortes verticais em paredes de alvenaria estrutural

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

... continuação Tabela 3

Onde: t_{par} = largura da parede; L_{par} = comprimento máximo da parede; h_{par} = altura da parede; $b_{máx}$ = largura máxima

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

b - Largura total acumulada 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 na horizontal.

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

Fonte: adaptado de Milani (2019)

Analisando todas as normas encontradas, verificou-se que elas possuem diferentes formas de apresentar os limites para cortes verticais e horizontais, não havendo uma concordância entre os países. Sendo que a maioria das normas não apresenta parâmetros como profundidade, comprimento, largura ou posição de execução. Ainda cabe destacar que as normas não apresentam informações sobre a alteração do comportamento mecânico de paredes com cortes, nem qual é a perda de capacidade resistente desses elementos.

2.4 Pesquisas experimentais desenvolvidas em paredes de alvenaria estrutural com cortes

Diversos autores estudaram de forma experimental a influência de cortes horizontais, verticais ou inclinados em paredes de alvenaria estrutural, em escala natural e/ou em escala reduzida, destacando-se alguns trabalhos: Hendry (1963, apud Fischer 1973), Curtin (1963, apud Fischer 1973), Tsi (1973, apud Fischer 1973), Fischer (1973), Kirtsching e Metje (1986), Sahlin (2007), Lima (2009), Mojsilovic, Notz e Wäfler (2009), Mojsilovic (2011), Soares (2012), Reichel, Jäger e Bakeer (2013), Vicente et al. (2014). De forma resumida e simplificada, serão apresentados os trabalhos e os resultados mais importantes dos autores citados.

Em 1963, Hendry (apud Fischer, 1973), concluiu, através de estudos que um corte na vertical de 12 mm de profundidade e 19 mm de largura na metade superior de uma parede de alvenaria estrutural não causaria nenhum efeito na carga de ruptura. No mesmo ano, Curtin (apud Fischer, 1973) concluiu através de estudos experimentais que a realização de cortes em paredes esbeltas deve ser evitada, pois a concentração de tensões pode fragilizar as paredes próximas aos cortes. Ainda em 1963, Tsi (apud Fischer, 1973), verificou que, em pequenas aberturas não haveria uma queda significativa na resistência à compressão, porque em seu estudo não houve nenhum sinal de falha próximo as aberturas.

Em 1973, Fischer estudou o efeito dos cortes na resistência à compressão em paredes com espessuras de 102,5 mm, 178 mm e 215 mm e cortes de 38 mm de largura e 25 mm de profundidade. Foram ensaiadas diferentes configurações de cortes na horizontal, vertical e paredes

sem cortes, para posteriormente comparar os resultados. O autor concluiu que em paredes de 178 mm de espessura, houve uma grande perda de resistência com o aumento da quantidade de cortes, sendo que a maior perda de resistência, em torno de 20% ocorreu na parede com os cortes quadrados para instalações. Já para as paredes com espessuras de 102 mm e 215 mm, a relação de quantidade de cortes com a resistência à compressão não foi tão significativa, sendo que essas paredes foram construídas de tijolo maciço prensado, enquanto as paredes de 178 mm de espessura de tijolo plástico prensado.

Fischer (1973), ainda concluiu que os cortes na horizontal causaram um aumento de fissuração, ocorrendo um deslocamento em torno da região onde foram efetuados os cortes, enquanto que para os cortes na vertical, o autor observou que várias fissuras verticais se originavam devido aos cortes verticais. Concluindo assim que uma quantidade aceitável de cortes na vertical poderia ser realizada na prática, mantendo um nível de segurança, enquanto que os cortes na horizontal não seriam recomendados.

Em 1986 Kirtsching e Metje, estudaram a capacidade de carga em paredes de alvenaria, com cortes horizontais e nichos. Para as dimensões e posições dos nichos, os autores se basearam na norma alemã de 1974, pois para algumas dimensões os cortes são permitidos sem a necessidade de cálculos adicionais. Os autores ensaiaram 71 paredes, divididas em sete seções experimentais. Todas as paredes possuíam 1,24 m de comprimento, sendo que as alturas variavam em 2,5 m, 3 m e 3,5 m e as espessuras das paredes foram de 17,1 cm, 23,7 cm, 29,5 cm e 36 cm. Os cortes variaram em 1,75 cm, 2,4 cm, 3 cm e 3,65 cm, de profundidade e a largura foi fixa em 6 cm. O carregamento foi aplicado de forma centrada ou excêntrica, dependendo à seção analisada.

Entre as conclusões de Kirtsching e Metje (1986), podem-se destacar: a presença dos nichos verticais e os cortes horizontais reduziram a capacidade de carga das paredes de alvenaria; a redução da capacidade de carga foi proporcional à redução da seção transversal, essa relação foi verificada até um limite de 25% da seção transversal; para os nichos que não atravessavam as paredes do topo à base, incluindo as aberturas, houve uma redução adicional de 15%, a qual deveria ser somada à citada anteriormente. Para os cortes na horizontal, o efeito da esbeltez deve ser analisado, pois ocorreu uma carga proporcional à redução na seção transversal; e os cortes horizontais devem ser executados somente em uma região de 35 cm acima ou abaixo da laje para que os limites sugeridos pelos autores sejam válidos.

Em 2007, Sahlin, estudou uma correlação entre o comprimento total dos cortes e a espessura das paredes com a perda de resistência. Para o seu estudo, o autor analisou os resultados encontrado por Fischer (1973), pois todos os cortes apresentavam as mesmas dimensões de

profundidade e largura, sendo que o comprimento total dos cortes foi utilizado como uma medida de dano às paredes. Para os cortes de caixas, considerou-se o comprimento de três vezes o seu lado. O autor correlacionou a razão entre o comprimento total dos cortes e a espessura da parede, a qual ele denominou de índice de dano, pois quanto maior for o dano da parede, maior a perda de resistência. Para Sahlin (2007) analisar todas as paredes ensaiadas por Fischer (1973), ele dividiu em três grupos, os quais são:

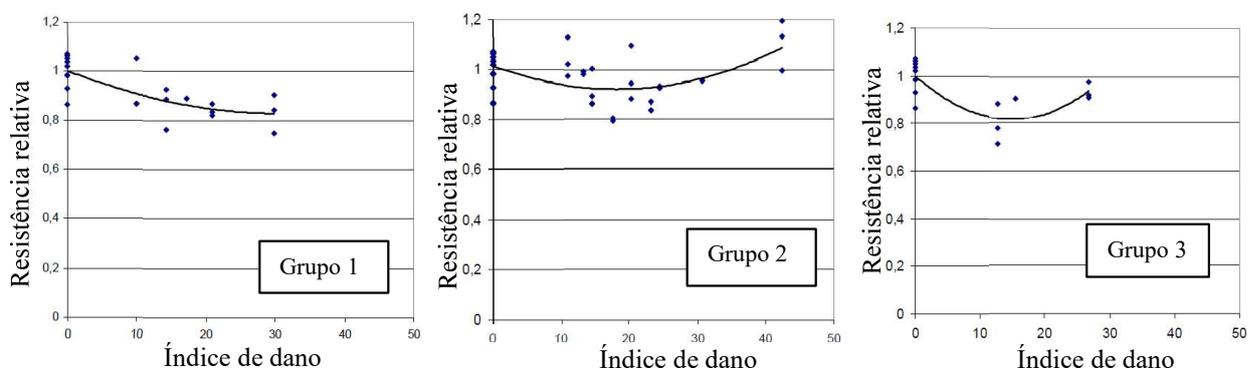
Grupo 1 - cortes verticais apenas na face frontal;

Grupo 2 – cortes verticais na face frontal e um adicional na face traseira;

Grupo 3 – cortes verticais apenas na face frontal, sendo um dos cortes na horizontal.

Na Figura 3, são apresentados os gráficos encontrados por Sahlin (2007), os quais relacionam a resistência relativa das paredes (eixo y) e o índice de dano (eixo x) para cada grupo. Os pontos azuis são os resultados experimentais, enquanto que as curvas traçadas em preto, tem como objetivo verificar o quão próxima é a relação.

Figura 3 – Relação entre a resistência das paredes sem corte e índice de dano para as paredes, para cada grupo



Fonte: adaptado Sahlin (2007)

Sahlin (2007), concluiu que o índice de dano apresentou boa relação para as paredes com cortes em apenas um dos lados. Os cortes horizontais afetaram a resistência para as paredes mais espessas, sendo esse efeito mascarado nas paredes esbeltas pelo efeito de instabilidade. O índice de dano proposto apresentou uma menor correlação para paredes esbeltas, uma vez que a posição do corte, nesses casos foi próximo às extremidades das paredes, considerada menos crítica que os demais casos onde os cortes foram realizados na região central.

Em 2009, Lima, estudou a influência de cortes na horizontal, na vertical e inclinados, com juntas de assentamento constante ou variável, em paredes de alvenaria estrutural. O autor realizou este trabalho para analisar a influência que os cortes e as diferentes espessuras de juntas de

assentamento causavam na resistência das paredes de alvenaria estrutural. Na Figura 4, são apresentadas algumas parede ensaiadas pelo autor, com a variação dos cortes.

Figura 4 – Cortes nas paredes ensaiadas à compressão



Fonte: adaptado Lima (2009)

O autor concluiu que: nas paredes com cortes e sem variação da espessura das juntas, não houve alteração significativa de resistência, já com a execução dos cortes nas paredes com juntas constante, reduziu-se a resistência à compressão em 5,74%, enquanto que com a execução dos cortes e a variação das juntas a resistência reduziu em 11,52%, ou seja, uma variação de junta de assentamento que pode ser considerada um defeito durante a obra, diminuiu a resistência à compressão das paredes em alvenaria estrutural.

Entre os anos de 2009 e 2011, Mojsilovic, Notz e Wäfler e Mojsilovic, respectivamente, estudaram a influência de cortes para a passagem de eletrodutos, em paredes de alvenaria de blocos cerâmicos, sob esforços de compressão. Os autores analisaram cortes na horizontal, na vertical e inclinados. As paredes possuíam dimensões de 1,20 m x 1,20 m e os blocos estudados tinham dimensões de 29 cm x 19 cm x 15 cm e 29 cm x 19 cm x 17,5 cm. Os cortes realizados possuíam 45 mm e 50 mm de profundidade (dependendo à série A, B ou C analisada pelos autores) e todos possuíam 35 mm de largura. Após o corte, era passado o eletroduto e em seguida realizado o preenchimento para o fechamento do corte, sendo que para algumas paredes, não foi realizado o preenchimento, para no final do estudo comparar os resultados. Foram utilizados diferentes tipos de preenchimento. Na Figura 5 a) é apresentado o corte horizontal com o eletroduto, na Figura 5 b) o corte horizontal com preenchimento de argamassa de alta resistência, na Figura 5 c) com preenchimento de gesso e na Figura 5 d) com preenchimento de argamassa convencional.

Figura 5 – Exemplos dos cortes nas paredes com blocos cerâmicos



Fonte: adaptado de Mojsilovic (2011)

Após a realização dos ensaios, Mojsilovic (2011) concluiu que a relação entre a força e a deformação nas as paredes, teve um comportamento aproximadamente linear até a ruptura, ocorrendo um encurtamento entre todas as séries estudadas pelo autor. Na Figura 6, é mostrado o padrão geral das fissuras encontradas pelo autor, sendo que a maioria das fissuras foi na vertical e as primeiras fissuras surgiram com nível de carregamento entre 50 e 60% da carga de ruptura.

Figura 6 – Padrão típico das fissuras



Fonte: adaptado de Mojsilovic (2011)

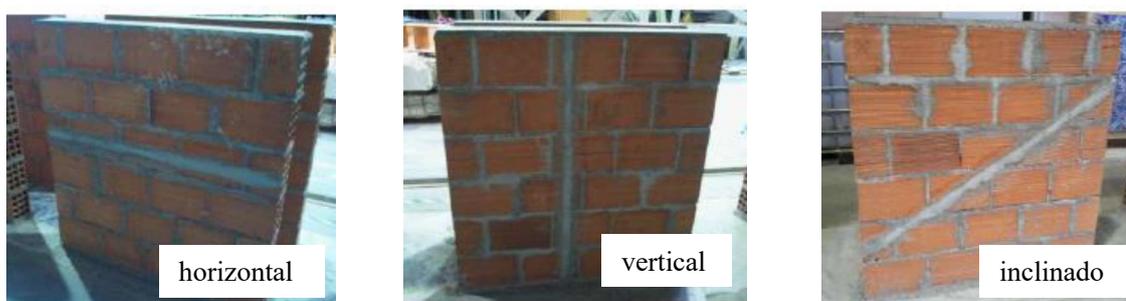
Analisando a orientação e profundidade dos cortes no comportamento da alvenaria, Mojsilovic (2011), concluiu que: a parede que possuía menor resistência foi a de corte inclinado, variando entre 18,9 % e 35,1%; as paredes que foram preenchidas com argamassa de alta

resistência obtiveram resistência à compressão iguais ou superiores à parede de referência (sem corte); para as paredes que tiveram cortes na horizontal nas duas faces a redução de resistência foi de 44,1%, enquanto que cortes na horizontal para uma face, a redução de resistência foi entre 13,8% e 25%; e as paredes com cortes na vertical, apresentaram uma redução de resistência de 27,4%.

Examinando a relação na influência do tipo de preenchimento dos cortes, o autor concluiu: as menores resistências observadas foram nas paredes com cortes não preenchidos; os cortes preenchidos com gesso e argamassa, utilizados em obra, não foi o esperado, pois sua resistência não foi reestabelecida; sendo que para evitar uma perda de resistência em paredes com cortes, devem-se utilizar preenchimentos que tenham rigidez maior ou igual a da alvenaria.

Em 2012, Soares avaliou o comportamento mecânico das paredes com blocos cerâmicos, com cortes para à execução de instalações, respeitando os limites estabelecidos pelo Eurocode 6 (CEN, 2005). Os cortes possuíam dimensões de 48 mm de profundidade e 38 mm de largura, sendo que foram ensaiados cortes na horizontal, na vertical e inclinados. Todos os cortes foram realizados somente em um dos lados da parede. Após a execução dos cortes, foi inserido um eletroduto e em seguida realizado o preenchimento da argamassa. Foram utilizados dois tipos de argamassa, uma argamassa com resistência igual a resistência do bloco e outra argamassa com resistência maior do que a resistência do bloco cerâmico utilizado para os ensaios das paredes. Também foram ensaiadas paredes com cortes sem preenchimento de argamassa e paredes sem cortes, para comparação dos resultados. Todas as paredes ensaiadas foram submetidas a ensaios de compressão axial. Na Figura 7 são apresentadas algumas paredes ensaiadas, com preenchimento, mostrando os diferentes cortes executados. O autor calculou as tensões de falha $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o módulo de elasticidade E , por meio da análise de regressão linear, através dos resultados de tensões e deformações.

Figura 7 – Exemplos dos cortes nas paredes de bloco cerâmico



Fonte: adaptado de Soares (2012)

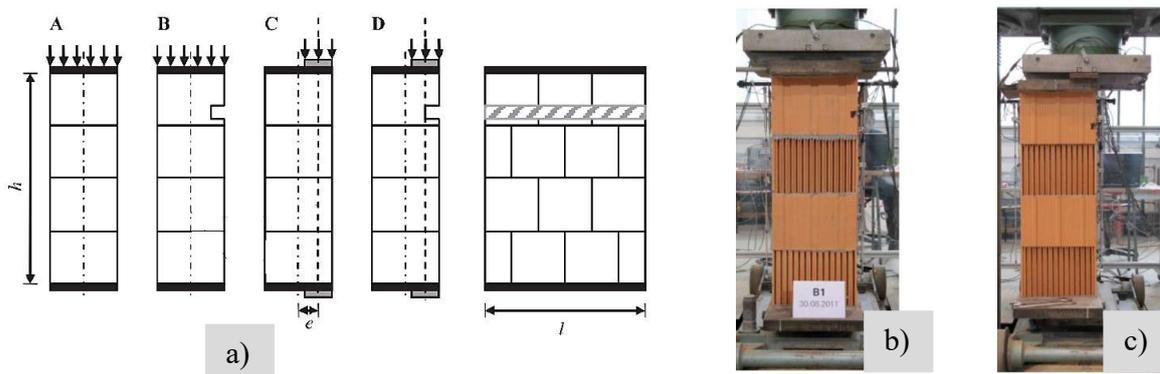
Em 2014, Vicente et al. também estudaram e analisaram os resultados obtidos por Soares (2012), citado anteriormente. Assim Soares (2012) e Vicente et al. (2014), concluem que: os cortes na horizontal e na vertical, sem preenchimento, reduziram a resistência a compressão das paredes de alvenaria em torno de 40% e 20%, respectivamente, quando comparadas a parede sem corte; com o preenchimento dos cortes na horizontal e na vertical, foi reestabelecida a resistência das paredes; para os cortes inclinados reduziu-se a resistência das paredes de alvenaria; quando os cortes foram preenchidos com argamassas de resistência igual ou superior ao blocos cerâmicos, resultou em um aumento de resistência das paredes com cortes na horizontal e na vertical de aproximadamente 27% e 17%, respectivamente, o que não ocorreu para paredes com cortes inclinados, mesmo com o preenchimento pois houve uma redução na resistência de 12%.

Soares (2012) observou que a maioria das fissuras ocorreu ao longo das juntas verticais e horizontais, verificando o destacamento dos septos exteriores nas fiadas superiores aos cortes. Enquanto que para as paredes com cortes inclinados e para uma parede com corte vertical, observou-se que houve instabilidade na ruptura, pois não apareceu nenhuma fissura antes de chegar ao colapso.

Em 2013, Reichel, Jäger e Bakeer, realizaram ensaios experimentais e numéricos, com o objetivo de verificar a influência de cortes horizontais na capacidade de carga de paredes de alvenaria estrutural submetidos a carregamentos centrados e excêntricos, porque um corte muito próximo do local de aplicação de carga, acaba influenciando consideravelmente a capacidade de carga da parede (REICHEL, JÄGER e BAKEER, 2013).

Na Figura 8, é possível verificar os esquemas das paredes ensaiadas pelos autores. Na Figura 8 a), para os casos A e B, toda a seção transversal da parede ensaiada foi carregada, e a carga foi aplicada de forma centrada. Para os casos C e D, a carga foi aplicada apenas em uma parte da seção transversal, entre metade e 1/3 da espessura da parede, apresentando assim uma excentricidade “*e*” em relação ao eixo longitudinal da parede. Na Figura 8 b) é possível observar a vista lateral de uma parede sendo ensaiada com o carregamento centrado, e na Figura 8 c) uma parede em ensaio com a carga excêntrica.

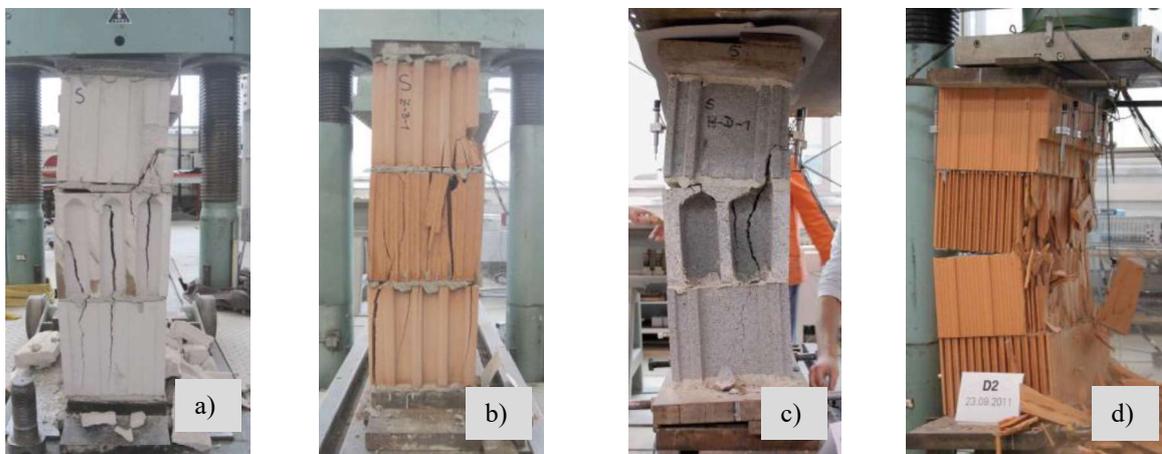
Figura 8 – Disposição das paredes experimentais a) vistas frontal e lateral; b) e c) amostras com carregamento centrado e excêntrico, respectivamente



Fonte: adaptada de Reichel Jäger e Bakeer (2013)

Os corpos de prova foram submetidos a um carregamento crescente até a ruptura, onde foi medida a carga máxima resistida e a deformação vertical para cada ensaio. Na Figura 9, é possível observar alguns modos de ruptura, onde os casos a) e b) possuem carregamento centrado e os casos c) e d) carregamento excêntrico.

Figura 9 – Modos de ruptura, com carregamento centrado e excêntrico



Fonte: adaptada de Reichel Jäger e Bakeer (2013)

Através dos ensaios experimentais, os autores verificaram que a abertura dos cortes nas paredes de alvenaria, causou uma redução da capacidade de carga das paredes, o que já era esperado, sendo que na maioria dos casos, os valores experimentais excederam o valor teoricamente estimado da resistência das paredes. Os autores também concluíram que para as paredes de alvenaria com carregamento centrado, a influência de um corte na horizontal na capacidade de carga pode ser determinada com uma boa aproximação a partir da redução da seção

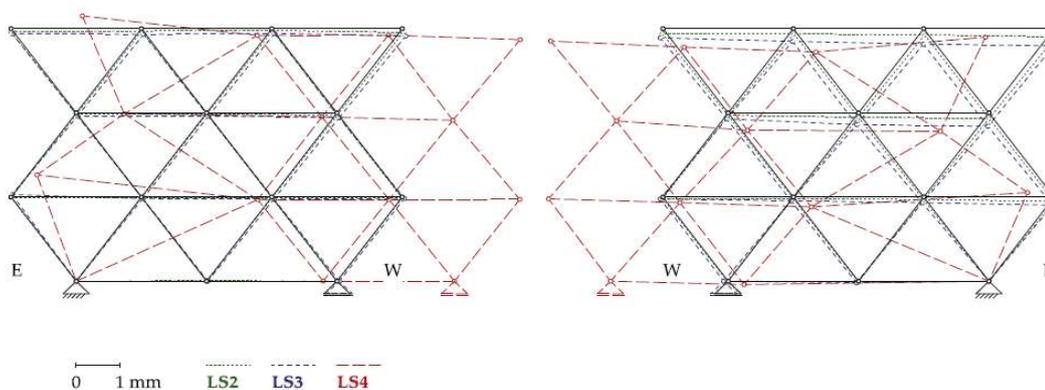
transversal. Enquanto que para os casos com carregamento excêntrico, essa perda da capacidade de carga da parede, pode ser determinada pela redução da área efetiva da região carregada.

2.5 Simulações numéricas em paredes de alvenaria estrutural com cortes

As simulações numéricas são essenciais para conseguir compreender o comportamento da estrutura e desenvolver novas ferramentas eficientes para aprimorar o projeto. Segundo Gomes (2001), para as simulações não existe uma abordagem melhor do que a outra, pois todas são válidas, desde que a sua escolha seja vinculada ao tipo de fenômeno a ser estudado. Atualmente existem poucos estudos sobre cortes em alvenaria estrutural, utilizando elementos finitos, devido a sua complexidade. De acordo com Oliveira (2014), um dos fatores pela dificuldade da utilização de modelos numéricos em paredes de alvenaria estrutural é que as juntas de argamassa atuam como planos de ruínas, acabando por serem as responsáveis pela maior parte dos fenômenos não-lineares que ocorrem na estrutura. A seguir serão apresentados os trabalhos encontrados, sobre simulações numéricas com cortes em paredes de alvenaria estrutural.

Em 2011, Mojsilovic, além de realizar um estudo sobre a influência de cortes para a passagem de eletrodutos em paredes de alvenaria de forma experimental, calculou as deformações e analisou as curvas a partir das medições dos deslocamentos através de uma rede triangular de pontos. Utilizando um *software* de elementos finitos (MEF), foi modelada uma treliça plana (*lattice model*), estatisticamente indeterminada, sendo que as mudanças de comprimento dos elementos da treliça, foram aplicados como carregamentos, com isso foi possível obter os deslocamentos. A Figura 10 apresenta o deslocamento obtido para as duas faces da parede ensaiada, em três estágios de carga: LS2, LS3 e LS4, correspondentes a 160 kN, 320 kN e 430 kN, respectivamente.

Figura 10 – Deslocamentos da malha triangular



Fonte: adaptado de Mojsilovic (2011)

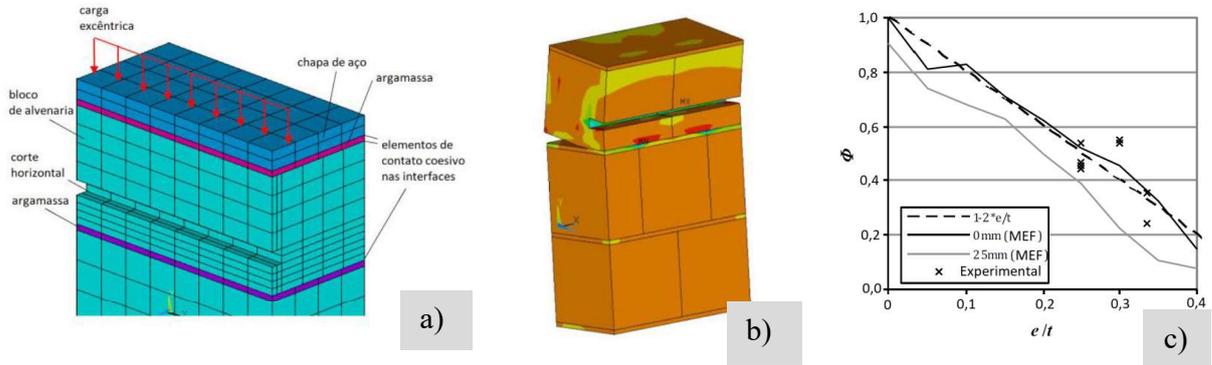
A partir das deformações obtidas em um dos dois lados da parede, foi possível obter as curvas das paredes, com os resultados o autor traçou os círculos de Mohr para analisá-los. Com isso o autor observou que as deformações foram maiores na superfície com corte, causando assim curvaturas nas paredes.

Mojsilovic (2011) ainda propôs um modelo de treliça que permite analisar de forma analítica a influência dos cortes no comportamento das paredes em alvenaria, baseando-se no critério de falha de tensão de tração na alvenaria. O autor se baseou na distribuição elástica das tensões em uma parede com corte horizontal, através de uma modelagem em elementos finitos utilizando elementos quadráticos bidimensionais. Através deste modelo o autor concluiu que o uso da tensão resistente de tração do bloco como um parâmetro de comparação, pode levar a uma subestimação da capacidade de resistência da parede. Isso ocorre porque as condições de restrições das deformações laterais dos blocos, quando colocados na alvenaria, aumenta a resistência de tração.

No modelo numérico proposto por Reichel, Jäger e Bakeer (2013), foi utilizado o método dos elementos finitos, com modelos tridimensionais, com o objetivo de reproduzir os resultados experimentais e também para analisar outras combinações, como: variação dos cortes, variação da excentricidade para aplicação da carga e condições de apoio. Para as simulações os blocos e a argamassa foram gerados de forma individual, e um elemento de contato coesivo foi inserido na interface bloco-argamassa, como pode ser observado na Figura 11 a). Para o bloco cerâmico foi utilizado um modelo de material elasto-plástico, baseado no critério de ruptura de *Willam-Warnke*. A Figura 11 b) apresenta o modo de ruptura para um modelo com carregamento de forma excêntrica, o qual falha por perda de estabilidade. O gráfico da Figura 11 c) apresenta o fator de redução da capacidade de carga (ϕ), que é função da profundidade (t) dos cortes e da excentricidade (e) da carga aplicada, o qual é determinado pela Equação 01.

$$\phi = 1 - 2 \times \frac{e}{t} \quad \dots(01)$$

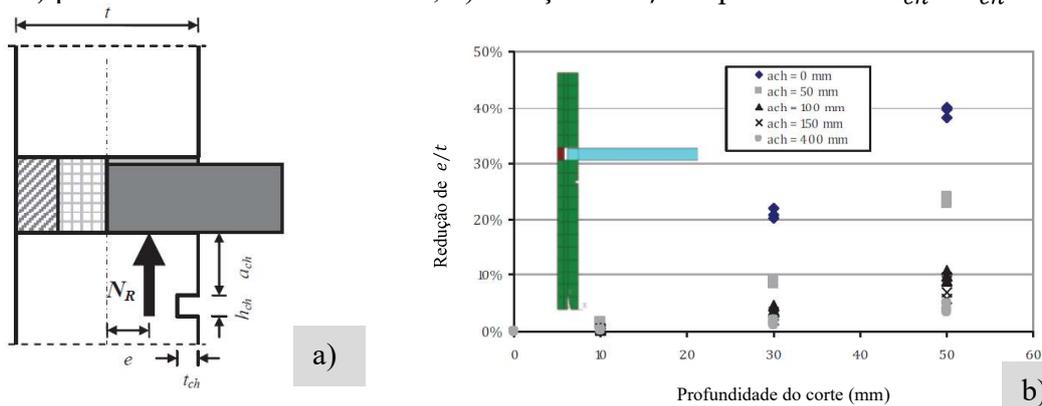
Figura 11 – Exemplo do modelo usado pelos autores a) modelo 3D; b) modo de ruptura; c) gráfico do fator de carga



Fonte: adaptada de Reichel Jäger e Bakeer (2013)

Os autores ainda apresentam um estudo que está em desenvolvimento, com alguns resultados preliminares. Este estudo tem como objetivo analisar a geometria e a influência da posição dos cortes horizontais, se eles afetam a excentricidade da força normal resultante na parte superior da parede. Foi realizada uma modelagem bidimensional de uma parede externa que suporta uma laje em um dos lados, sendo que foi considerado todo o pé direito abaixo da laje e meio pé direito acima da laje, (como pode ser observado um detalhe da simulação na Figura 12 b)). Na Figura 12 a) é mostrado uma parte do modelo 2D gerado, e na Figura 12 b), a redução da razão e/t , dependendo da profundidade do corte t_{ch} e da distância entre a laje e o corte a_{ch} .

Figura 12 – a) parte do modelo 2D em MEF, b) redução de e/t dependendo de t_{ch} e a_{ch}



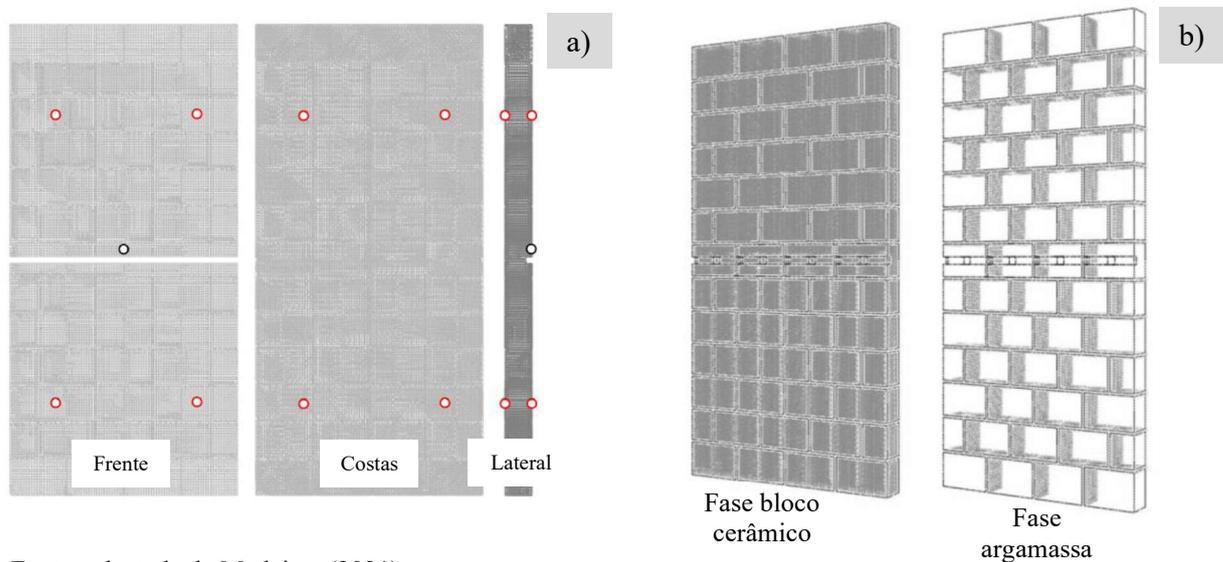
Fonte: adaptada de Reichel Jäger e Bakeer (2013)

Os resultados preliminares indicam uma correlação aproximadamente linear entre a redução da excentricidade da carga normal e a profundidade do corte. (REICHEL, JÄGER E BAKEER, 2013).

Um dos trabalhos mais recentes sobre simulações numéricas com cortes em alvenaria estrutural é o trabalho de Medeiros (2021). O autor analisou o comportamento mecânico das paredes de alvenaria estrutural com cortes horizontais, verticais e inclinados e também analisou paredes sem cortes. Para suas análises numéricas, Medeiros (2021) usou os resultados experimentais encontrados por Milani (2019). Foram simuladas paredes em escala reduzida de 24 cm de largura por 52 cm de altura, com 2,8 cm de espessura. Para os cortes horizontais, foi variada a altura da posição do corte, onde foram realizados cortes na região central da parede e cortes no terço superior em relação à altura. A profundidade do corte também foi variada em 20%, 30% e 50% da espessura das paredes.

Para as modelagens numéricas das paredes em elementos discretos, Medeiros (2021), utilizou o *software Abaqus/CAE 6.13*, considerando uma análise elástico-linear. Foram simulados dois modelos em 3D, o primeiro modelo sendo uma parede inteira, com as propriedades homogêneas do bloco, com corte de 20% de profundidade, um detalhamento desse modelo pode ser observado na Figura 13 a). No segundo modelo o autor discretizou os blocos e as juntas de argamassa (Figura 13 b).

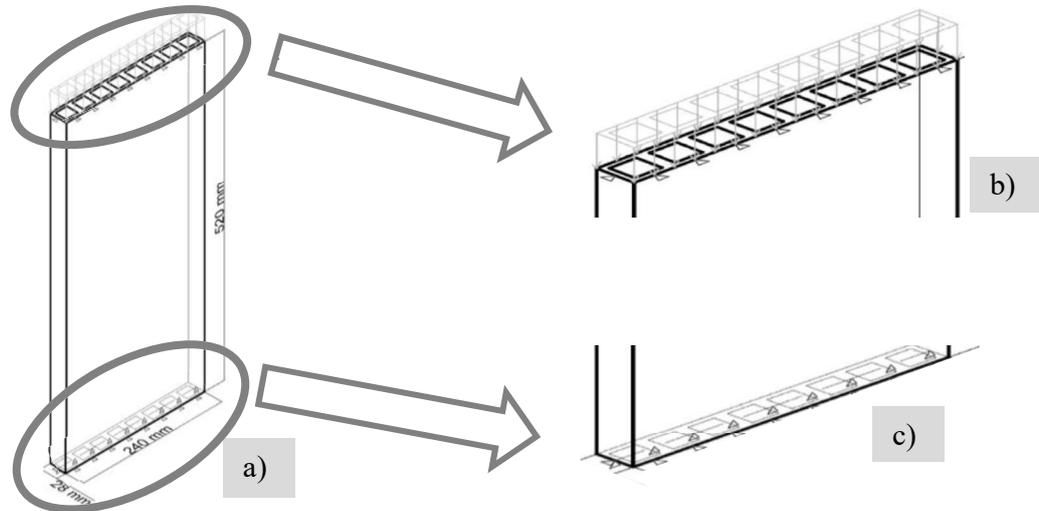
Figura 13 – Modelos das paredes em 3D: a) modelo parede homogênea e b) modelo do bloco cerâmico com as juntas de argamassa



Fonte: adaptada de Medeiros (2021)

Como condição de contorno Medeiros (2021), restringiu os deslocamentos nas direções ortogonais a aplicação do carregamento (na face superior e inferior da alvenaria) e também na direção do carregamento na base. Na Figura 14, estão apresentadas as condições de contorno aplicadas pelo autor.

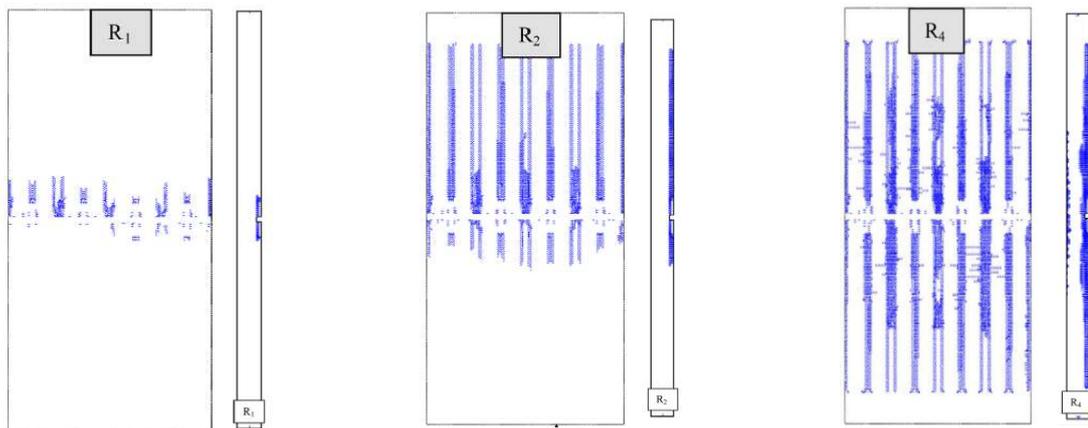
Figura 14 – Modelo da parede homogênea com: a) geometria; b) carregamento e condições de contorno no topo e c) condições de contorno da base



Fonte: adaptada de Medeiros (2021)

Na Figura 15, está apresentado alguns modos de falha para o primeiro modelo simulado por Medeiros (2021), com a condição de contorno simples apoiada. Através dessas análises o autor concluiu que com a técnica de homogeneização do LDEM para simular a alvenaria estrutural, não foi capaz de reproduzir a falha e a capacidade de resistência, devido à falta das juntas de argamassa.

Figura 15 – Algumas configurações de falha para o modelo numérico apenas com as propriedades homogêneas do bloco em 3D



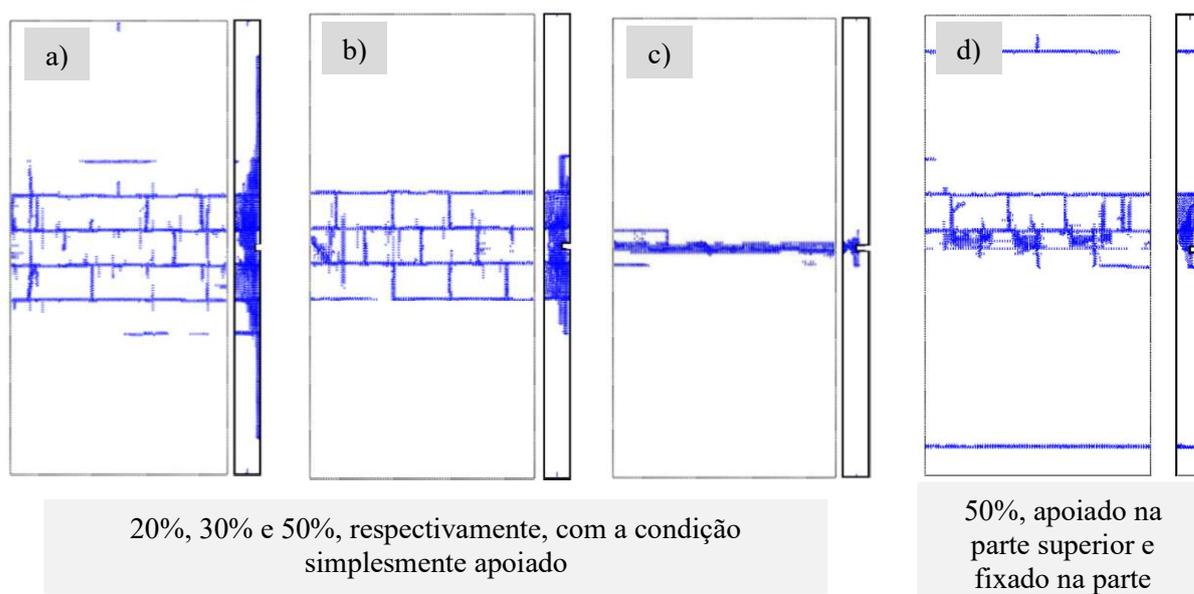
Fonte: adaptada de Medeiros (2021)

Através das simulações com os modelos discretizados dos blocos e da argamassa, com a condição de contorno simplesmente apoiada, Medeiros et al. (2022), concluíram que para as paredes com cortes de 20% e 30% o modo de falha e a resistência de compressão máxima, foi bem parecida com o experimental, porém para o corte com 50% de profundidade o modo de propagação

de fissura não foi igual ao experimental, devido a condição de contorno utilizada, pois quanto maior a profundidade do corte, algumas rotações na parede são mais evidentes. Desta forma os autores, alteraram a condição de contorno, utilizando simplesmente apoiada na parte superior com o deslocamento e fixada na parte inferior da parede, realizando essa simulação apenas para a parede com 50% de profundidade de corte.

Na Figura 16, estão apresentadas as configurações de falha para o modelo com a discretização da argamassa e dos blocos. Sendo que nas Figura 16 a), b) e c), são apresentados os resultados com cortes de 20%, 30% e 50% de profundidade, com a condição de contorno simplesmente apoiado. Já na Figura 16 d) com corte de 50% de profundidade com a condição de contorno apoiada na parte superior e fixado na parte inferior.

Figura 16 – Configurações de falha para os modelos com bloco + junta de argamassa



Fonte: adaptada de Medeiros et al. (2022)

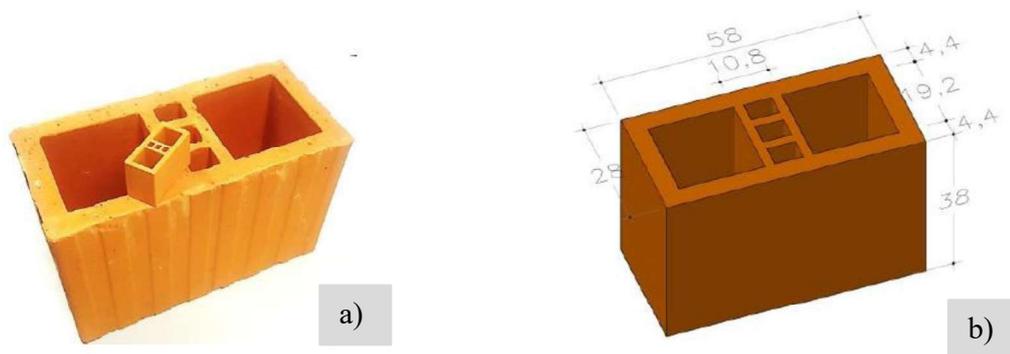
Através da modificação da condição de contorno, o autor verificou que o modo de falha e a resistência de compressão máxima ficou mais parecida com o experimental de Milani (2019). De modo geral o autor concluiu que o primeiro modelo testado obteve um bom desempenho na obtenção dos valores de deslocamento no plano e fora do plano, quando comparado com os dados experimentais de Milani (2019). Através da modelagem discreta de paredes pelo método do LDEM, foi possível gerar modelos que apresentavam mais detalhes sobre o comportamento mecânico das alvenarias, apesar da necessidade de um maior esforço computacional. Ou seja, houve uma boa concordância entre os modelos numéricos e os resultados experimentais, assim o

método do LDEM demonstrou ser uma ferramenta numérica poderosa para estudar o comportamento e prever mecanismos de falha em paredes de alvenaria com cortes horizontais.

2.6 Trabalho referência para o presente estudo, Milani (2019)

Em 2019, Milani analisou a influência da execução de cortes horizontais, verticais e inclinados em paredes de alvenaria estrutural submetidas a um carregamento axial. O estudo foi realizado através de blocos de alvenaria estrutural, em modelos de escala reduzida, na escala 1:5, com dimensões de 2,8 cm x 3,8 cm x 5,8 cm de largura, altura e comprimento, respectivamente. O bloco em escala natural possui dimensões de 14 cm x 19 cm x 29 cm de largura, altura e comprimento, respectivamente. A geometria dos blocos é mostrada na Figura 17.

Figura 17 – a) geometrias em escala real e reduzida; b) dimensões do bloco em escala reduzida em milímetros



Fonte: Milani (2019)

Milani (2019) realizou a caracterização dos blocos, na escala natural e reduzida. Foram realizados ensaios para determinar as características geométricas, características físicas e ensaios mecânicos de resistência à compressão, módulo de deformação e resistência à tração indireta. Todos os ensaios foram realizados conforme as descrições das normas técnicas. Na Tabela 4, estão apresentados os resultados dos ensaios mecânicos encontrados pelo autor para os blocos em escala reduzida.

Tabela 4 – Resultados das propriedades mecânicas dos blocos em escala reduzida

	Ensaio	Valor médio	Nº de corpos de prova
Carga máxima (N)	Tração	2222,56	10
	Compressão	33340,00	13

....continuação Tabela 4			
Tensão (MPa)	Tração	3,87	10
	Compressão	39,28	13
Módulo de Elasticidade (MPa)		10449	6

Fonte: adaptado de Milani (2019)

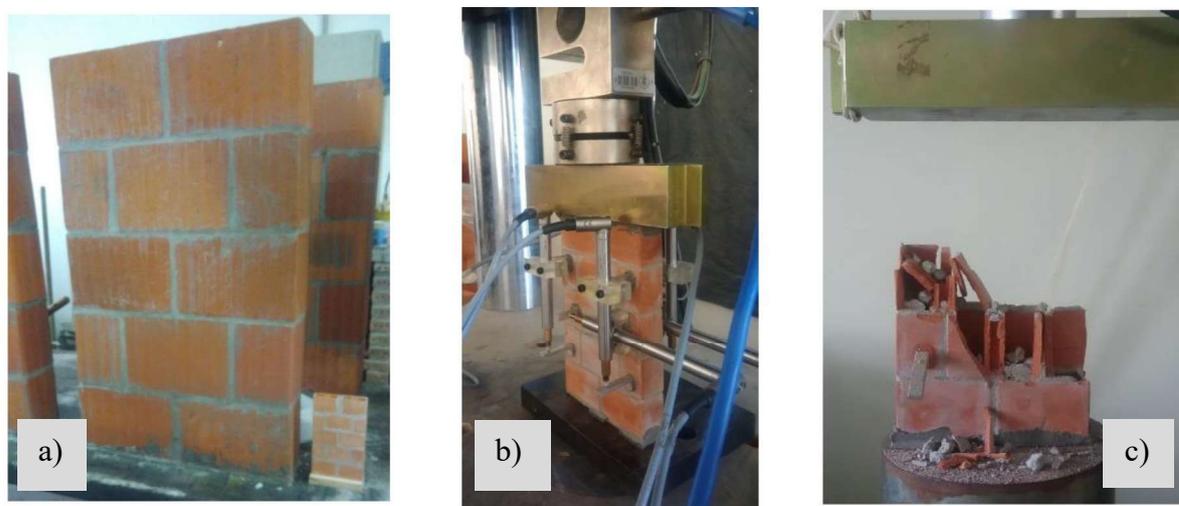
Após a realização da caracterização dos blocos em escala natural e reduzida, o autor concluiu que houve semelhança geométrica satisfatória, ocorrendo uma pequena diferença na relação da $\frac{A_{liq}}{A_{bruta}}$ de 5,18%. Para as características físicas, foi verificado que ocorreu uma semelhança adequada entre as escalas, o que já era esperado, pois a matéria prima utilizada na produção dos blocos em escala reduzida foi coletada na indústria onde os blocos em escala natural são produzidos, apesar de não pertencer ao mesmo lote de produção.

Para os ensaios de caracterização mecânica dos blocos o autor verificou que os blocos na escala reduzida apresentaram resistência à compressão superior aos blocos em escala natural, característica conhecida como efeito escala, pois ocorre uma diferença na tensão para que a liberação de energia corresponda à energia da fratura. Através desses ensaios de caracterização dos blocos, o autor acredita que os blocos em escala reduzida representam adequadamente o comportamento dos blocos em escala natural, inclusive, os modos de ruptura são semelhantes.

Após essas conclusões, Milani (2019) iniciou a caracterização da argamassa, onde o autor adotou um traço de 1:0,5:4,5 de cimento, cal e areia, sendo que a relação água/cimento utilizada foi de 1,25, a qual foi determinada para se obter uma trabalhabilidade adequada para o assentamento dos blocos. O autor realizou os ensaios de granulometria da areia, resistência à tração na flexão e à compressão da argamassa e do módulo de deformação da argamassa. Todos os ensaios também foram realizados conforme os procedimentos das normas técnicas. Milani (2019) encontrou 7272 MPa de módulo de deformação médio da argamassa, com um coeficiente de variação de 11,35%.

Ainda foram realizados ensaios de caracterização da alvenaria em escala natural e reduzida, a fim de avaliar o comportamento do conjunto, bloco – argamassa. As pequenas paredes em escala reduzida, possuíam dimensão de 11,8 cm de comprimento por 19,8 cm de altura. Na Figura 18 a) são apresentadas as pequenas paredes em escala natural e reduzida, na Figura 18 b) e na Figura 18 c) o esquema do ensaio de compressão e o modo de ruptura, respectivamente, ambas para as pequenas paredes em escala reduzida. Na Tabela 5 estão apresentados os resultados encontrados para os ensaios das pequenas paredes em escala reduzida.

Figura 18 – a) pequenas paredes em escala natural e reduzida; b) esquema do ensaio em escala reduzida e c) modo de ruptura das pequenas paredes em escala reduzida



Fonte: adaptada de Milani (2019)

Tabela 5 – Resultados dos ensaios das pequenas paredes em escala reduzida

	Média	Desvio Padrão
Carga de Ruptura (kN)	42,35	1,72
Tensão de Ruptura f_{par} (MPa)	12,25	0,50
Módulo de deformação E_{par} (MPa)	4791	182
Coefficiente de Poisson ν_{par}	0,18	0,07
Deformação na Ruptura ϵ_{par} (%)	4,07	0,23

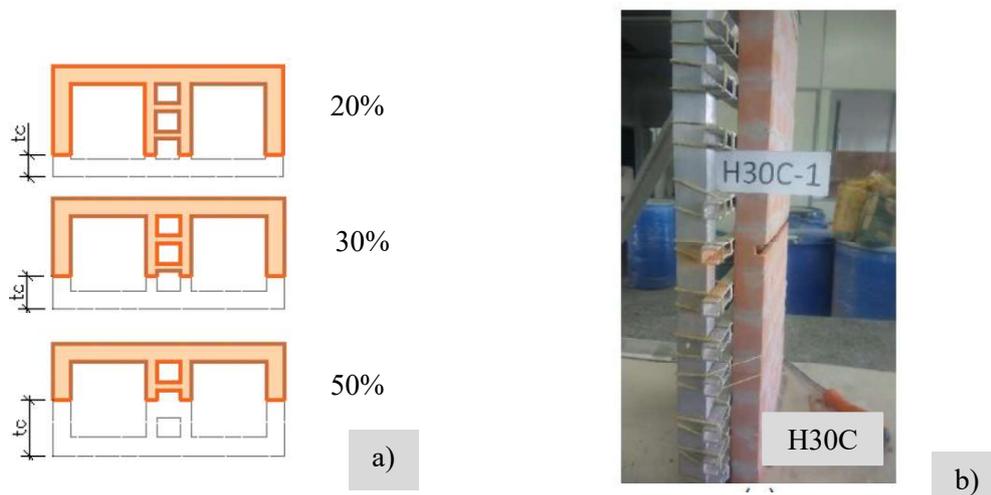
Fonte: adaptado de Milani (2019)

Após os ensaios de caracterização da alvenaria, Milani (2019) concluiu que há uma boa correlação entre os prismas e as pequenas paredes nas escalas naturais e reduzidas, demonstrando assim que é possível reproduzir o comportamento da escala natural até a ruptura em escala reduzida. Desta forma o autor iniciou o estudo sobre cortes em alvenaria estrutural, para avaliar o comportamento mecânico da alvenaria.

As paredes em escala reduzida, possuíam dimensões de 24 cm de largura por 52 cm de altura, o que corresponde na escala natural uma parede com dimensões de 1,20 m x 2,60 m de largura x altura, respectivamente. Foram ensaiadas paredes com cortes na horizontal, vertical e inclinados. Para os cortes na horizontal, foi variada a posição em relação à altura, onde foram analisados cortes na região central da parede e cortes no terço superior em relação à altura. Para

os cortes na horizontal e inclinados, foi variada a profundidade do corte (t_c), em 20%, 30% e 50%, de redução da espessura da parede. Na Figura 19 a) pode ser observado um esquema das profundidades dos cortes realizados nas paredes. A largura dos cortes na horizontal e inclinados foi o mesmo, 8 mm, o que corresponderia a 4 cm na escala natural. As paredes na escala reduzida possuíam espessura de 28 mm, o que corresponde a 14 cm na escala natural. Na Tabela 6 são apresentadas as nomenclaturas das paredes com cortes horizontais que foram estudadas pelo autor, os dados dos cortes como direção, localização e redução da espessura e a forma de aplicação do carregamento.

Figura 19 – a) Esquemas das profundidades dos cortes nas paredes e b) Corte horizontal na metade da parede, em escala reduzida



Fonte: adaptada de Milani (2019)

Tabela 6 – Descrição das paredes com cortes horizontais ensaiadas por Milani (2019)

Parede	Dados dos cortes			Excentricidade da carga
	Direção	Localização	Redução espessura	
1	H20C	Horizontal	20 %	Não
2*	H30C		30%	Não
3*	H30E			Sim
4	H50C		50%	Não
5	HS30C	Superior	30%	Não
6	HC30E			Sim

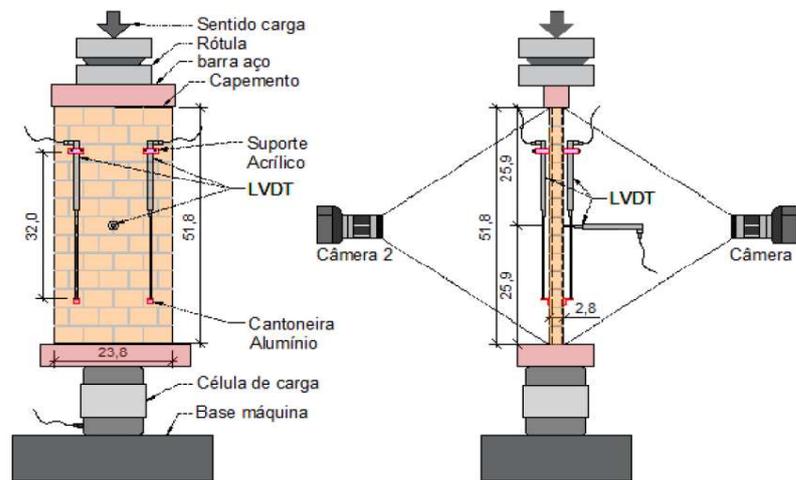
Em geral 3 exemplares por esquema (* quatro exemplares)

Fonte: adaptada de Milani (2019)

Após a produção das paredes em escala reduzida, foram realizados os cortes nas paredes, um exemplo de corte horizontal na metade da parede pode ser observado na Figura 19 b). Com os cortes finalizados, foram instalados cinco LVDT para medir os deslocamentos. Os LVDT foram colocados nas seguintes posições: dois na vertical frontal, dois na vertical posterior da parede e um perpendicular ao plano, esta posicionada na região central na parede, conforme pode ser observado na Figura 20. Ainda na Figura 20 é possível observar as condições de contorno usadas para os ensaios. Na parte superior da parede foi aplicado o carregamento, onde a carga foi transmitida no travessão superior por uma rótula acoplada a uma barra de aço de grande rigidez para ocorrer a distribuição do carregamento, e na parte inferior da parede, foi adicionada uma célula de carga e sobre essa célula uma placa para a distribuição do carregamento.

Para analisar o efeito da excentricidade da carga nas paredes, tentando buscar semelhança ao efeito causado por uma laje apoiada sobre paredes periféricas de uma edificação, Milani (2019), ainda realizou ensaios mudando a excentricidade da aplicação da carga, onde foi considerada que a reação da laje está atuando a $1/3$ da espessura da parede (t), a partir da sua face, o que resulta em uma excentricidade ($t/6$).

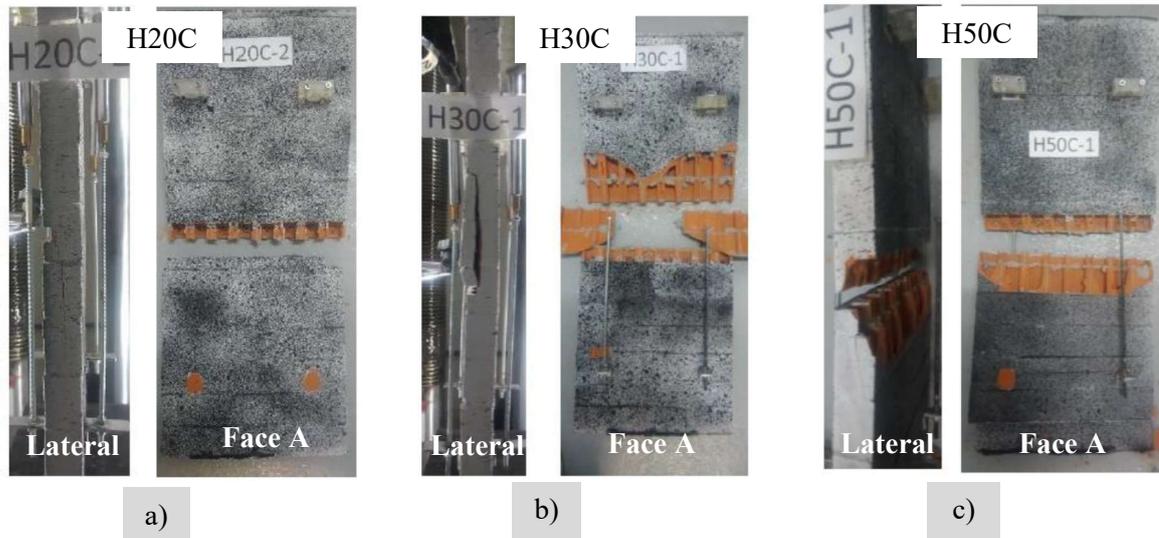
Figura 20 – Esquema de aplicação da carga para as paredes em escala reduzida



Fonte: adaptada de Milani (2019)

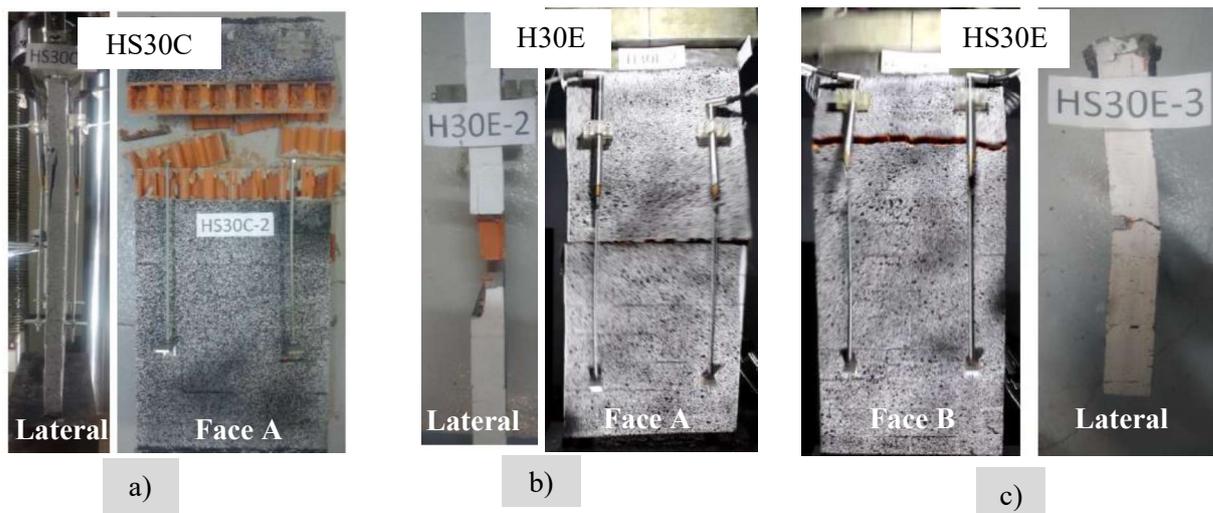
Nas Figura 21 a), b) e c) são apresentados alguns modos de ruptura para as paredes com cortes horizontais e carregamento centrado, variando a profundidade de 20%, 30% e 50%, respectivamente. Na Figura 22 a) é mostrado o modo de ruptura para as paredes com cortes horizontais na parte superior e com carga centrada, na Figura 22 b) o modo de ruptura para as paredes com cortes horizontais com carregamento excêntrico e na Figura 22 c) com cortes horizontais na parte superior da parede e com carregamento excêntrico.

Figura 21 – Modo de ruptura para as paredes: a) H20C, b) H30C e c) H50C



Fonte: adaptada de Milani (2019)

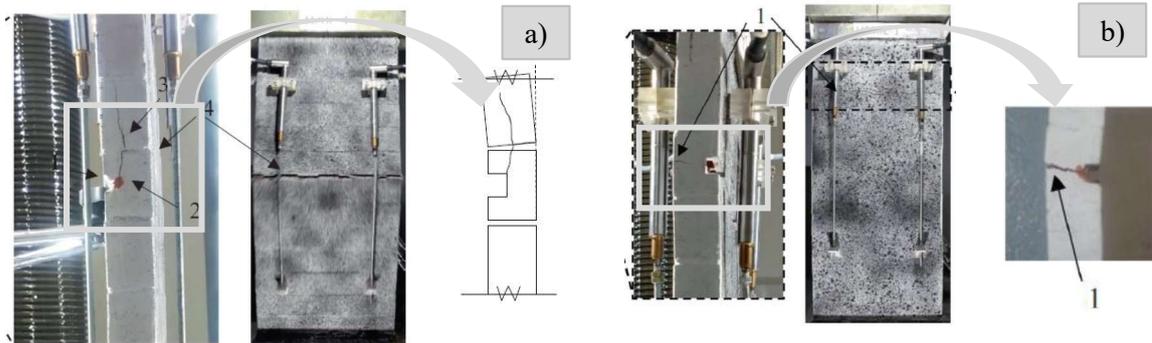
Figura 22 – Modo de ruptura para as paredes: a) HS30C, b) H30E e c) HS30E



Fonte: adaptada de Milani (2019)

Nas Figura 23 a) e b) estão apresentadas as configurações de falha para as paredes com cortes horizontais centrais e carregamento centrado (H20C, H30C, H50C) e corte superior com carregamento excêntrico (HS30E), indicando de forma mais detalhada a propagação das fissuras.

Figura 23 – Modos de falha para as paredes: a) H20C, H30C e H50C e b) HS30E



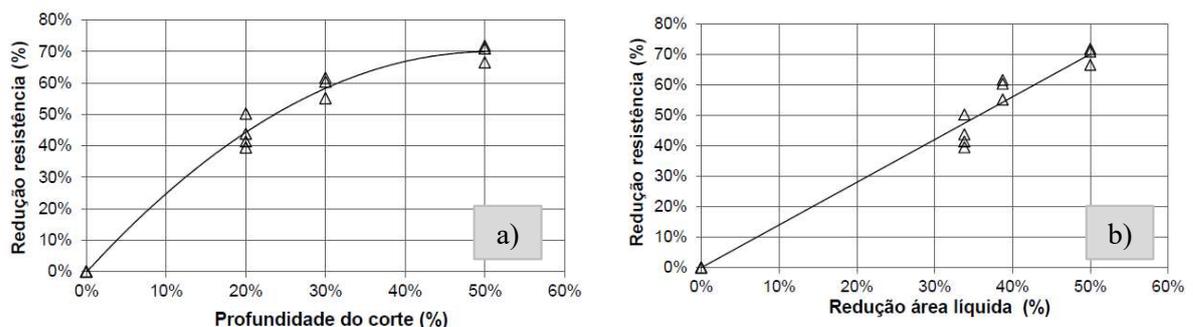
Fonte: adaptada de Milani et al. (2021)

Através das Figuras anteriores, Milani et al. (2021), concluíram que para os cortes centrais, o mecanismo de falha iniciava com o surgimento de fissuras no canto do corte, o qual dividia o bloco até atingir a interface da argamassa, como pode ser observado na Figura 23 a). Sendo que o mecanismo do modo de falha da alvenaria ocorre de forma muito frágil, após o aparecimento da primeira fissura.

Comparando a alvenaria com corte horizontal com a mesma profundidade H30C e H30E, mas alterando a condição de carregamento, um com carregamento centrado e outro com carga excêntrica, Milani et al. (2021), verificaram que a resistência diminui em torno de 12,6%. Já quando é comparado para os cortes na parte superior da parede HS30C e HS30E, verificou-se que a redução foi bem mais significativa, em volta de 70,9%.

Milani (2019), analisou a influência que os cortes horizontais e inclinados causavam na redução das paredes. Na Figura 24 a) está apresentado o gráfico de redução da resistência *versus* profundidade do corte na horizontal com a carga centrada e na Figura 24 b) a redução da resistência *versus* a redução da área líquida do corte na horizontal com a carga centrada.

Figura 24 – Influência dos cortes na horizontal, redução da resistência a) profundidade do corte e b) redução da área líquida



Fonte: adaptada de Milani (2019)

De modo geral o autor concluiu que os cortes na horizontal, reduziram consideravelmente a resistência das paredes para todas as profundidades, 20%, 30% e 50%, estudadas por ele. Verificou que os cortes na horizontal modificaram o modo de ruptura das paredes, passando a ocorrer efeitos de flexão, sendo mais visíveis com o aumento da profundidade dos cortes. Os cortes na horizontal a meia altura foram os que apresentaram maior perda de resistência, em seguida foram os horizontais superior e por última os cortes inclinados, todos apresentando diferenças significativas em relação à parede de referência.

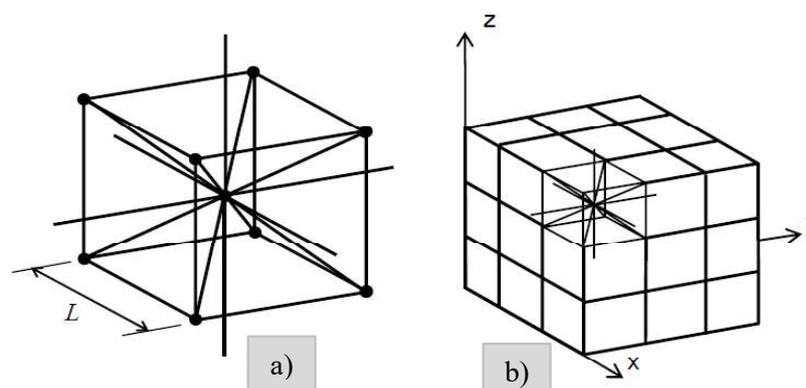
Para os três tipos de cortes, a excentricidade do carregamento provocou uma perda adicional de resistência, sendo mais elevada para os cortes na horizontal superior, seguida dos cortes inclinados e dos horizontais a meia altura. Para as paredes com cortes inclinados e na horizontal superior, a excentricidade da carga modificou o modo de ruptura.

Algumas propriedades dos materiais foram utilizadas para as simulações deste trabalho e também ao final do trabalho os resultados encontrados foram comparados com os resultados experimentais encontrados por Milani (2019).

2.7 Método dos Elementos Discretos formado por barras (LDEM)

O método dos elementos discretos utilizado neste trabalho, inicialmente foi desenvolvido por Riera (1984), o qual foi baseado na ideia de Narfeh e Hezfy (1978). Segundo Kostascki (2012), este método consiste na representação do contínuo através de barras representadas por um arranjo espacial, onde sua estrutura apresenta massas concentradas em suas extremidades, sendo ela constituída pelo volume de influência do elemento. Na Figura 25 é apresentado o módulo cúbico básico, o qual é composto por 20 elementos de barra e nove nós, sendo que cada nó possui três graus de liberdade, os quais correspondem aos três componentes do vetor de deslocamento em um sistema de coordenadas cartesianas.

Figura 25 – Representação utilizada no LDEM: a) modelo cúbico básico b) corpo prismático



Fonte: Kostascki (2012)

As equações que relacionam as propriedades dos elementos com as constantes elásticas de um meio contínuo e isotrópico são as seguintes:

$$A_l = L^2 \frac{(9+8\delta)}{2(9+12\delta)} \quad \dots(02)$$

$$A_d = \frac{2\sqrt{3}}{3} A_l \quad \dots(03)$$

$$\delta = \frac{9\nu}{4-8\nu} \quad \dots(04)$$

sendo que A_l é a área da seção transversal do elemento longitudinal, L o comprimento do modelo cúbico básico, δ coeficiente representativo do sólido isotrópico, A_d a área dos elementos diagonais e ν o coeficiente de Poisson. Nos trabalhos de Nayfeh e Hefzy (1978) e Dalguer et al. (2001), são apresentados todos os detalhes de cálculos da seção transversal equivalente por unidade de comprimento das barras longitudinais e diagonais, como mostrado nas Equações 2 e 3.

É importante observar que para $\nu = 0,25$, há uma equivalência direta entre o modelo discreto e o contínuo isotrópico, porém para $\nu \neq 0,25$, ocorrem diferenças nos termos de cisalhamento (KOSTESKI et al. (2014) e RIERA, MIGUEL e ITURRIOZ (2016)). Portanto equações representativas de movimento e condições de equilíbrio, podem ser aplicadas sobre as forças atuantes do sistema sob cada nó do modelo, o qual forma:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + F(t) - P(t) = 0 \quad \dots(05)$$

onde M representa a matriz de massa, \ddot{x} o vetor de aceleração, C a matriz de amortecimento, \dot{x} o vetor de velocidade e $F(t)$ e $P(t)$ representam os vetores das forças internas e externas que atuam nas massas nodais, respectivamente. A Equação 05 pode ser integrada no domínio do tempo e de forma explícita sob diferenças finitas, sendo que a estabilidade do esquema de integração em materiais elásticos lineares é garantida com tanto que o espaço de tempo não seja maior que o resultado obtido pela Equação 06, segundo Miguel, Iturrioz e Riera (2014).

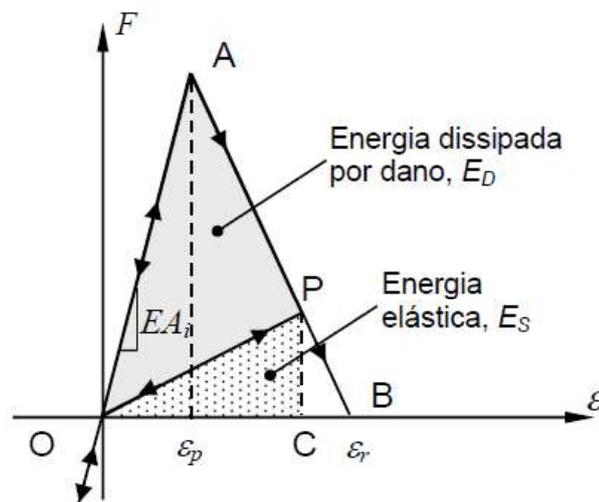
$$\Delta_t \leq \frac{0,6L}{c_p} \quad \dots(06)$$

onde a velocidade de propagação de ondas longitudinais (C_p) é determinada pela Equação 07, E é o módulo de elasticidade do material e ρ a densidade específica do material.

$$C_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \dots(07)$$

Quando um elemento se quebra, geram-se áreas de fratura equivalente, liberando assim energia de fratura, esta energia de fratura depende da área da fratura e da equação constitutiva do material usado para a simulação. Riera (1984) e Riera e Rocha (1991) adotaram a lei proposta por Hillerborg (1978) para materiais quase frágeis como Relação Constitutiva Elementar (RCE), utilizando assim o Método dos Elementos Discretos para problemas de fratura frágil. A lei constitutiva do LDEM permite modelar trincas e defeitos no material, conseguindo assim representar o efeito irreversível da nucleação e propagação das fissuras. Na Figura 26, é apresentado a lei constitutiva.

Figura 26 – Lei constitutiva bilinear



Fonte: Kostascki (2012)

Os parâmetros do modelo constitutivo apresentados da Figura 26, são: $F(t)$, Força agindo sobre o elemento em função da deformação longitudinal (ϵ), ϵ_p é a deformação crítica de falha, ou seja, é a deformação máxima antes do início do dano, ϵ_r o limite da deformação de falha; E módulo de elasticidade do material; A_i é a área da seção transversal do elemento i , onde os índices de i podem ser l ou d , sendo elementos longitudinais ou diagonais, respectivamente. A área do triângulo OAB da Figura 26, representa a densidade da energia necessária para ocorrer a ruptura na barra do elemento, a área do triângulo OPC é a densidade de energia elástica armazenada no

elemento e a área do triângulo OAP é a densidade de energia dissipada por fratura. Quando a densidade de energia dissipada por dano é igual à energia de fratura, o elemento falha perdendo assim sua capacidade de carga.

Na definição apresentada do LDEM, admite-se que a falha ocorrerá apenas por tração, essa falha do elemento ocorre pela igualdade entre a densidade de energia dissipada por dano e a energia de fratura. Já quando o elemento for submetido a tensões de compressão o material se comporta como elástico linear, fazendo com que a falha passe a ser provocada por tração indireta. Kupfer e Gerstle (1973), aceitam esta suposição para materiais quase frágeis, pois a tensão última de compressão uniaxial é cinco a dez vezes maior que a tração uniaxial do elemento.

Como foi definido por Riera (1984) e Riera e Rocha (1991), a deformação crítica de falha ϵ_p , representada pelo ponto A na Figura 26, é a deformação máxima atingida antes do início do processo de dano do elemento. Já a relação entre ϵ_p e a energia de fratura G_f é determinada pela Mecânica da Fratura Elástica Linear, conforme a Equação 08.

$$\epsilon_p = R_f \sqrt{\frac{G_f}{E}} \quad \dots(08)$$

Onde R_f é o fator de falha, determinado pela Equação 09.

$$R_f = \frac{1}{Y \sqrt{a}} \quad \dots(09)$$

O parâmetro Y depende das dimensões do elemento quanto da trinca gerada sob o elemento e a presença de um defeito intrínseco de tamanho é representada pelo parâmetro a . Sendo que o tamanho desse defeito intrínseco é pré-determinado e pode ser considerado como uma propriedade do material (KOSTESKI, PINTO e ITURRIOZ, 2010). Segundo Kostaschi (2012), a deformação limite ϵ_r , representada no ponto B da Figura 26, ocorre quando o elemento perde sua capacidade de carregamento e pode ser determinada através da Equação 10.

$$\epsilon_r = K_r \epsilon_p \quad \dots(10)$$

Esta deformação limite ainda pode estar relacionada com a deformação crítica de falha, representada pela constante K_r . Cada material é definido por uma área de rigidez e outra de fratura, onde ambas são em função da discretização do módulo básico do LDEM e do seu comprimento L ,

conforme pode ser observado na Figura 25 a). O módulo de elasticidade e a energia específica de fratura são propriedades do material, onde o limite de deformação deve ser ajustado após a falha do elemento para satisfazer a condição de igualdade entre a densidade de energia dissipada e o produto da área de influência do material e sua energia específica de fratura pelo comprimento do seu elemento, como é representado na Equação 11.

$$\int_0^{\varepsilon_r} F(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{G_f A_i^f}{L_i} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_p EA_i}{2} = \frac{K_r \varepsilon_p^2 EA_i}{2} \quad \dots(11)$$

onde os sub índices i devem ser substituídos por l e d , sendo um elemento longitudinal ou diagonal, respectivamente. O coeficiente K_r é uma função das propriedades do material e do comprimento do elemento L_i , descrito na Equação 12.

$$K_r = \left(\frac{G_f}{E \varepsilon_p^2} \right) \left(\frac{A_i^f}{A_i} \right) \left(\frac{2}{L_i} \right) \quad \dots(12)$$

Segundo Riera e Rocha (1991), o algoritmo precisa ser estável para alcançar a estabilidade, o valor da constante K_r deve ser maior ou igual a 1. Sendo então necessário definir o comprimento crítico do elemento. Para facilitar, é definido um único valor de comprimento crítico do elemento, para elementos longitudinais e diagonais. Portanto, a condição de estabilidade antes apresentada pode ser expressa através das Equações 13 e 14.

$$K_r = \frac{L_{crit}}{L_i} \geq 1 \quad \dots(13)$$

$$L_i \leq L_{crit} \quad \dots(14)$$

Ainda assim, existe um comprimento máximo de elemento que preserve a Relação Constitutiva Elementar (RCE). Além disso os parâmetros utilizados para definir a RCE, são propriedades que dependem somente do material, da discretização, ou tanto de um como de outro. Sendo que ε_p , R_f , E e G_f , são propriedades do material, A_i^f e L dependem unicamente da discretização do modelo e ε_p , R_f e ε_r dependem tanto das propriedades do material como da discretização. Lembrando que o LDEM usa uma lei de dano escalar para descrever o comportamento uniaxial dos elementos.

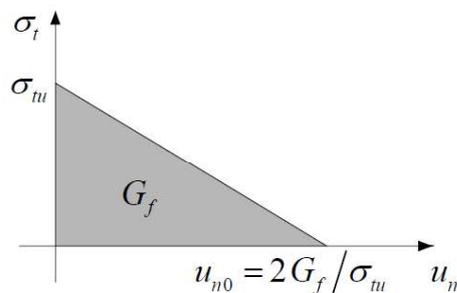
2.7.1 Implementação do LDEM no ambiente *Abaqus/Explicit*

Conforme Kostascki (2012) o *software* comercial *Abaqus* permite fazer o uso de dois métodos numéricos mistos: o LDEM e o FEM, onde os dois métodos juntos proporcionam maior flexibilidade na simulação de problemas com geometria e condições de contorno mais complexas. O *software Abaqus* é um dos programas comerciais de análise de elementos finitos, possibilitando soluções precisas, robustas e de alto desempenho para problemas não lineares complexos e aplicações dinâmicas em grande escala. *Abaqus/Explicit* é um produto do ambiente *Abaqus* de análise de elementos finitos, que é particularmente bem adaptado para análise não linear, transiente e dinâmico de sólidos ou de estruturas, utilizando uma integração numérica explícita.

Ou seja, quando se conhece a região crítica do material o uso de elementos formados em partes pelo LDEM e em partes pelo FEM é extremamente vantajoso, pois juntando os dois diminui-se assim os recursos computacionais reduzindo ainda mais o tempo necessário para rodar as simulações. Para criar o módulo LDEM básico e conseqüentemente sua repetição para criar o modelo, são implementados no *Abaqus* elementos de treliça tridimensionais, com dois nós (T3D2).

No *Abaqus/Explicit* é disponível um modelo de fissuras distribuídas (*smearred crack model*), para representar a descontinuidade e comportamento frágil do concreto. Esse modelo de ruptura, tem características similares a da lei constitutiva bilinear, onde o comportamento à compressão e o modo de ruptura são elástico lineares e também pode-se remover os elementos quando eles forem totalmente danificados, o qual usa a taxa de liberação de energia em Modo I e G_f como parâmetro de fratura. Na Figura 27 é mostrada a relação constitutiva após a tensão máxima e na Equação 15 a tensão de falha.

Figura 27 – Modelo de tensão pós falha versus deslocamento vinculada à energia de fratura utilizado no *Abaqus/Explicit*



Fonte: Kostascki (2012)

$$\sigma_{tu} = E \varepsilon_p \quad \dots(15)$$

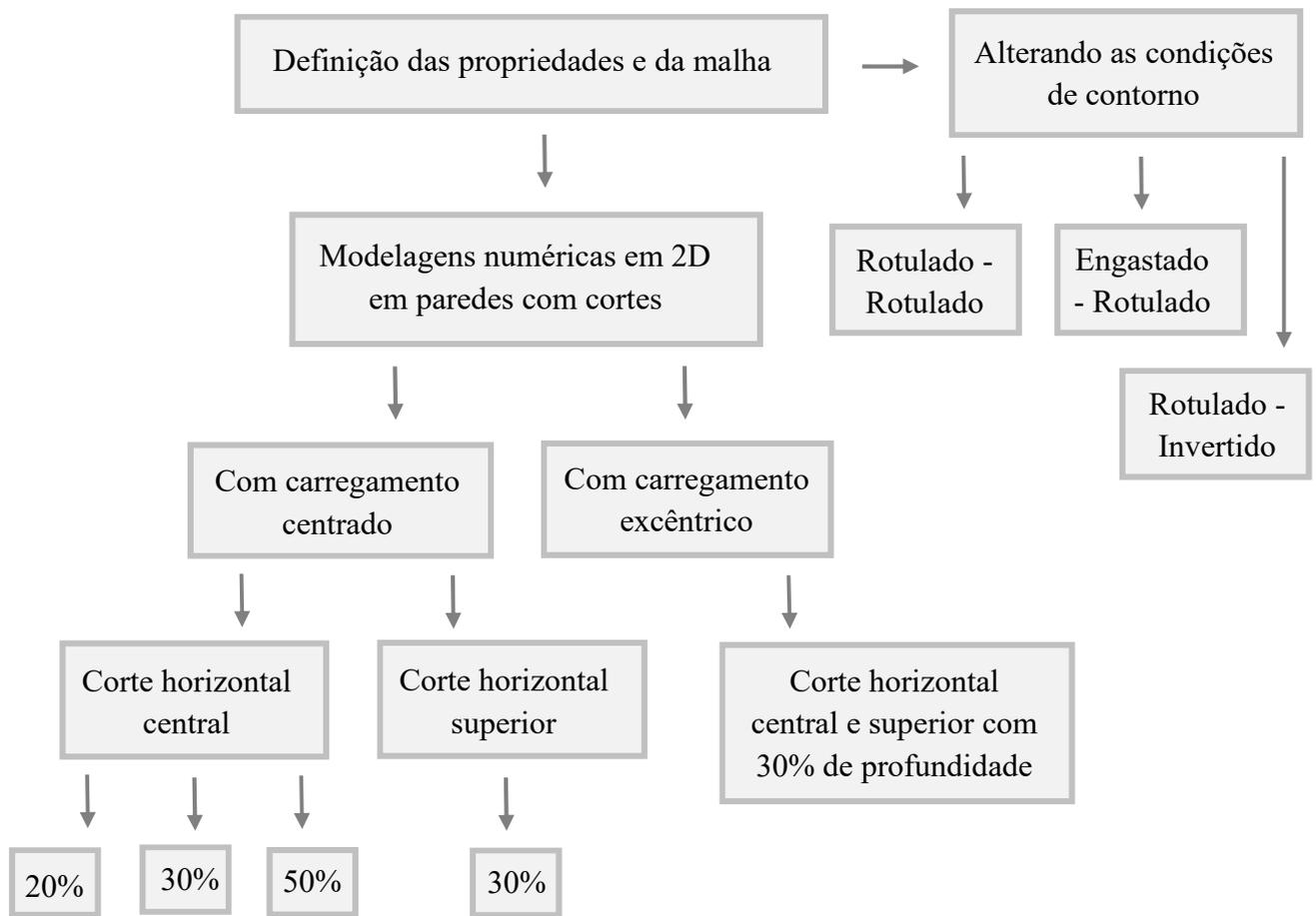
O deslocamento não transmite mais tensões e u_{n0} se encontra diretamente relacionado com a deformação limite ϵ_r . Sendo assim, quando é efetuado a modelagem do sistema, leva-se em conta o valor da deformação crítica no lugar do deslocamento.

Conforme Rocha (1989) é possível usar a aleatoriedade nas propriedades do material, pois assim consegue-se levar em conta as imperfeições ao tamanho do cubo elementar, em escala real. Para introduzir a aleatoriedade é considerada a tenacidade do material como uma variável aleatória. Kostaski, Pinto e Iturrioz (2010), Kostaski (2012) e Soares e Iturrioz (2015), definiram a aleatoriedade em seus trabalhos e comprovaram que diferentes elementos levam a diferentes modelos constitutivos, no entanto com formas similares.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado a definição das propriedades numéricas e a escolha do tamanho da malha para a realização das simulações numéricas. A Figura 28 indica a esquematização dos procedimentos metodológicos que foram realizados para atingir os objetivos propostos.

Figura 28 – Esquema das atividades que foram realizadas



Fonte: elaboração própria

3.1 Definição das propriedades e da malha

Neste item são apresentadas as propriedades adotadas dos materiais e também a análise da malha, com o tamanho da malha escolhido.

3.1.1 Definição das propriedades do material

Como comentado anteriormente, o trabalho experimental de Milani (2019) foi o trabalho referência para esta pesquisa. Alguns resultados encontrados pelo autor foram usados nas simulações numéricas, como o módulo de elasticidade das paredes em escala reduzida e a densidade do bloco cerâmico em escala reduzida. Esses parâmetros são aplicados direto no modelo numérico. Este modelo é gerado no *software Matlab*, e após o processamento dele é possível obter um arquivo de entrada do tipo “.inp” o qual é carregado no *software Abaqus/Explicit* para completar as condições do ensaio.

Além do módulo de elasticidade e a densidade, outros parâmetros são necessários para completar o modelo, como: coeficiente de Poisson do material, deformação crítica da falha e a energia de fratura. O coeficiente de Poisson utilizado foi de 0,25, valor limite para este método numérico. A deformação crítica de falha, foi determinada através da Equação 15, onde a tensão média de tração é 3,87 MPa, valor encontrado nos ensaios experimentais de Milani (2019).

Outro parâmetro importante para a realização das simulações numéricas é a tenacidade à fratura do material. Para este caso será utilizada a tenacidade dos blocos cerâmicos, pois a fissura começa nestes elementos e se propaga por eles, considerando que este valor seria o crítico na falha. Entretanto não é um parâmetro fácil de ser encontrado ou do qual se tenham muitos registros, assim a energia de fratura foi determinada segundo o CEB-FIP Model Code (1990), a qual é obtida pela Equação 16 e é definida para concretos.

$$G_f = G_{F0} \left(\frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)^{0.7} \quad \dots(16)$$

Onde f_{cm0} é 10 MPa, G_{F0} é o valor base da energia de fratura o qual depende do diâmetro máximo do agregado ($d_{m\acute{a}x}$), conforme a Tabela 7 e f_{cm} é a resistência à compressão do bloco na área líquida. Ainda na CEB-FIP Model Code (1990), é apresentado uma tabela que fornece direto os valores da energia de fratura para diferentes resistências de concreto.

Tabela 7 – Parâmetros para a Equação 16

$d_{m\acute{a}x}$ (mm)	G_{F0} (Nmm/mm ²)
8	0.025
16	0.030
32	0.058

Fonte: adaptada de CEB-FIP Model Code (1990)

Em 2015, Genikomsou e Polak, usaram a Equação 16 para determinar G_f em suas simulações, encontrando um valor de 0.026 N/mm. Os autores realizaram simulações numérica em elementos finitos para verificar a punção em lajes de concreto. No mesmo ano Izquierdo, estudou a interface bloco/graute em elementos de alvenaria estrutural através de análises numéricas e experimentais, em blocos cerâmicos e de concreto. Para obter a e energia de fratura dos blocos cerâmicos e de concreto a autora também utilizou a Equação 16, para conseguir realizar as simulações numéricas com todos os parâmetros necessários.

Por mais que a Equação 16 seja aplicada para blocos em concreto, como Izquierdo (2015) aplicou para blocos cerâmicos e os resultados encontrados pela autora foram satisfatórios, para este trabalho também foi optado em utilizar a Equação 16, para obter o parâmetro de energia de fratura.

Como os diâmetros máximos dos agregados utilizados por Milani (2019), foram menores que 8 mm, é possível determinar o G_{F0} através da Tabela 7, e com 39,28 MPa, valor da resistência à compressão do bloco na área líquida, em escala reduzida, encontrado também por Milani (2019), é possível determinar a energia de fratura. Aplicando todos os valores na Equação 16, obtém-se assim 65,14 N/m, de energia de fratura. Na Tabela 8, estão apresentadas as propriedades da parede homogeneizadas que foram utilizadas para realizar as simulações numéricas.

Tabela 8 – Propriedades utilizadas nas simulações

Propriedades	Parede homogeneizada
E (MPa)	4839
ρ (Kg/m ³)	1900
ν	0,25
ϵ_p	$7,998 \times 10^{-4}$
G_f (N/m)	65,14

Fonte: elaboração própria

3.1.2 Definição da malha

Com o intuito de obter um modelo simples, relativamente rápido e que consiga resultados confiáveis, neste trabalho é proposto realizar modelos em estado plano de deformações (2D). Na análise computacional, o tamanho da malha utilizada na simulação é um parâmetro muito importante, pois quanto mais fina a malha, mais preciso são os resultados, porém mais custosa

computacionalmente fica a análise. Desta forma a relação ótima de custo-benefício deve ser analisada, buscando um refinamento a nível aceitável na qualidade dos resultados.

Para a definição da malha, foi escolhido a parede com corte de 20% de profundidade, pela mesma não apresentar diferenças significativas entre a parede de referência (sem cortes) nos resultados de compressão encontrados por Milani (2019), entretanto o mecanismo de falha é completamente diferente. É importante salientar que o objetivo desta análise é verificar apenas o tamanho da malha que será utilizada para simular os cortes nas paredes. As paredes em 2D possuem dimensões de 2,8 cm de espessura por 52 cm de altura. Foram simulados quatro comprimentos do módulo cúbico básico (L) do LDEM, os quais são:

- $L = 5,6$ mm;
- $L = 2,8$ mm;
- $L = 2$ mm;
- $L = 1,4$ mm.

Como condição de contorno, foi ensaiada a condição rotulada – rotulada, ou seja, para todos os modelos de malha foi rotulado na parte inferior e na parte superior da parede nos eixos x e y , sendo que essa rotula foi aplicada no nó central do comprimento total da parede, como pode ser observado um detalhe na Figura 29 a). Como carregamento foi aplicado um deslocamento compressivo na parte superior da parede (eixo y), como também pode ser observada na Figura 29 b). Na Figura 30 é apresentado o modelo final de cada malha estudada, com um detalhe da malha no corte. É possível observar que para a malha mais grossa, com comprimento do módulo cúbico básico de 5,6 mm, o corte é representado apenas com a eliminação de um módulo cúbico básico do LDEM, enquanto que para a malha mais refinada é eliminado 4 módulos no eixo x e 6 módulos no eixo y . Também na Figura 30 é possível observar que as extremidades das paredes estão mais escuras, nesses locais foi necessário aumentar em 10 vezes a resistência da parede, pois através de ensaios preliminares verificou-se que a ruptura iniciava nas extremidades das paredes devido à concentração de tensões introduzidas pela representação dos apoios, o que não ocorria nos ensaios experimentais, justificando assim a necessidade de aumentar a resistência desses módulos. Foram reforçados 16, 11, 8 e 4 módulos para as malhas com comprimento de 1,4 mm, 2 mm, 2,8 mm e 5,6 mm, respectivamente, totalizando assim uma distância de 22,4 mm para as malhas de comprimento 1,4 mm, 2,8 mm e 5,6 mm e para a malha com comprimento de 2 mm uma distância de 22 mm.

Figura 29 – Detalhamento da condição de contorno RO-RO: a) parte inferior da parte b) parte superior da parede

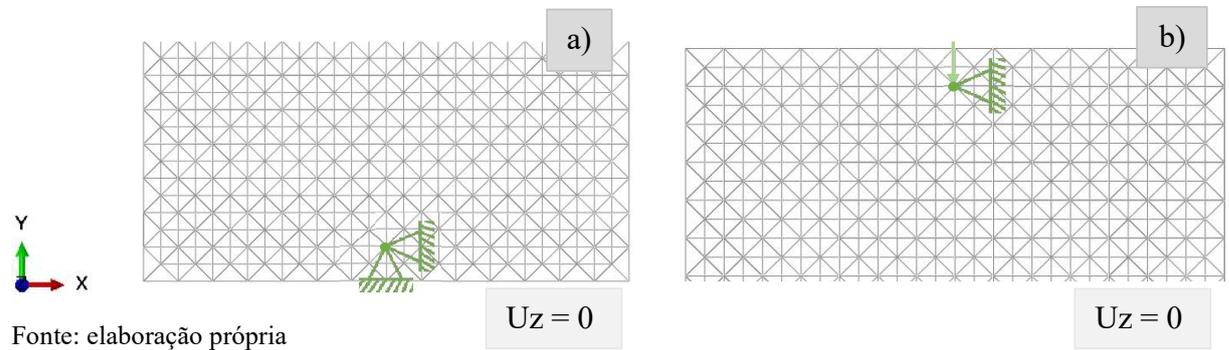
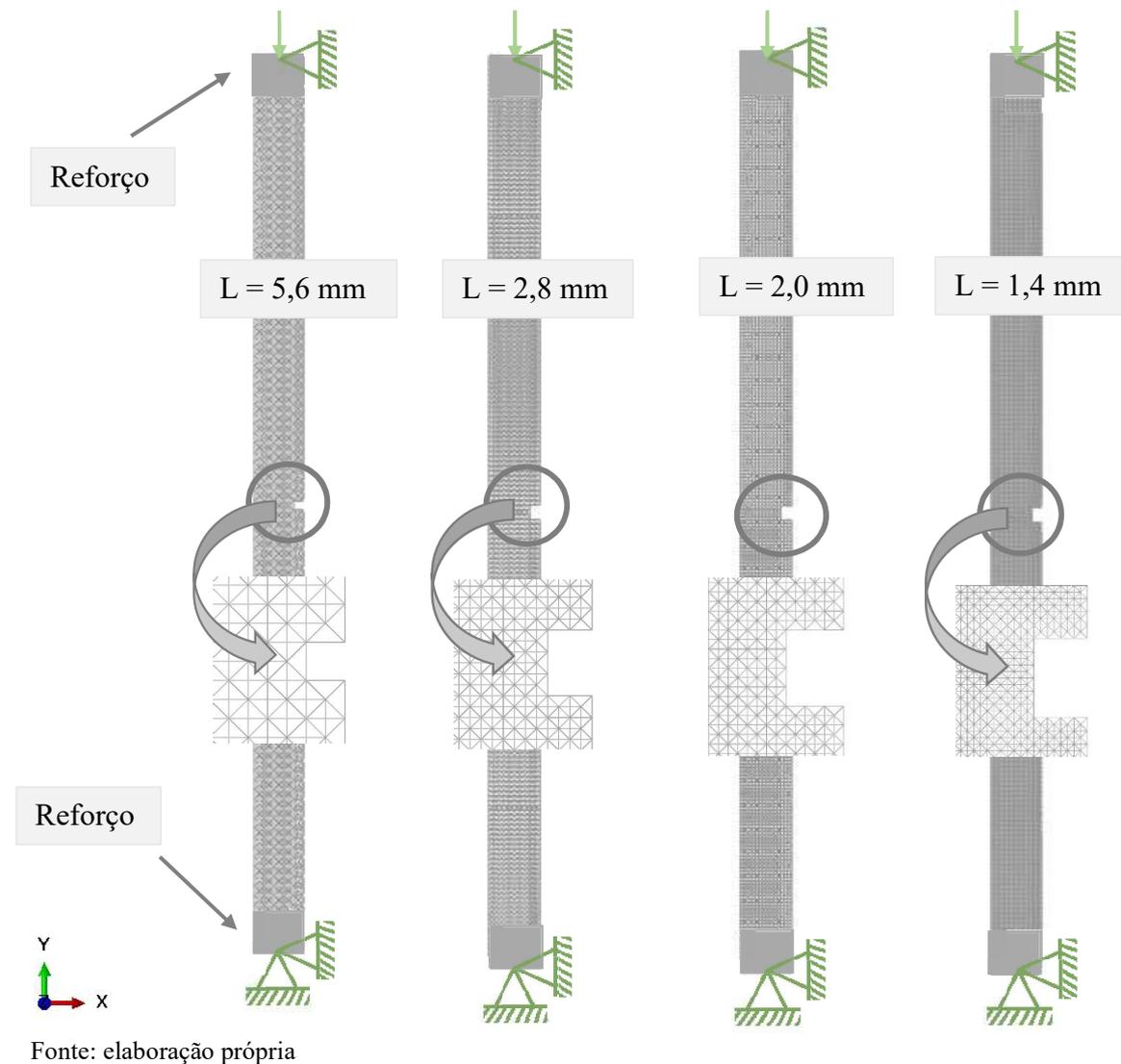


Figura 30 – Detalhamento das malhas estudadas, com os respectivos comprimentos do LDEM



Após a definição das propriedades do material, e os comprimentos das malhas a serem estudados, todos os parâmetros foram introduzidos no modelo através de um “script” (ou

programação) realizada no *software Matlab*. Com este programa, é possível obter um arquivo do tipo “.inp”, que é carregado no *software Abaqus/Explicit* para completar e simular o problema. No arquivo “.inp” está representada toda a configuração geométrica da parede de alvenaria estrutural, bem como todas as propriedades dos materiais apresentadas na Tabela 8. Após a realização das simulações numéricas no *software Abaqus/Explicit* para cada comprimento do LDEM, foram plotadas as curvas de tensão de compressão *versus* deformação e tensão de compressão *versus* deslocamento fora do plano.

Para poder comparar os resultados numéricos com os resultados experimentais de Milani (2019), foi necessário uniformizar as tensões experimentais e numéricas. Assim, como os modelos numéricos são em estado plano de deformação, as tensões nestes modelos são calculadas através da área líquida da parede, enquanto que os resultados apresentando por Milani (2019), foram obtidos pela área bruta. Para uniformizar as tensões, todos os resultados ficam relacionados à área bruta, visto isso, foi utilizada a relação entre essas áreas encontradas por Milani (2019), que foi de 0,5.

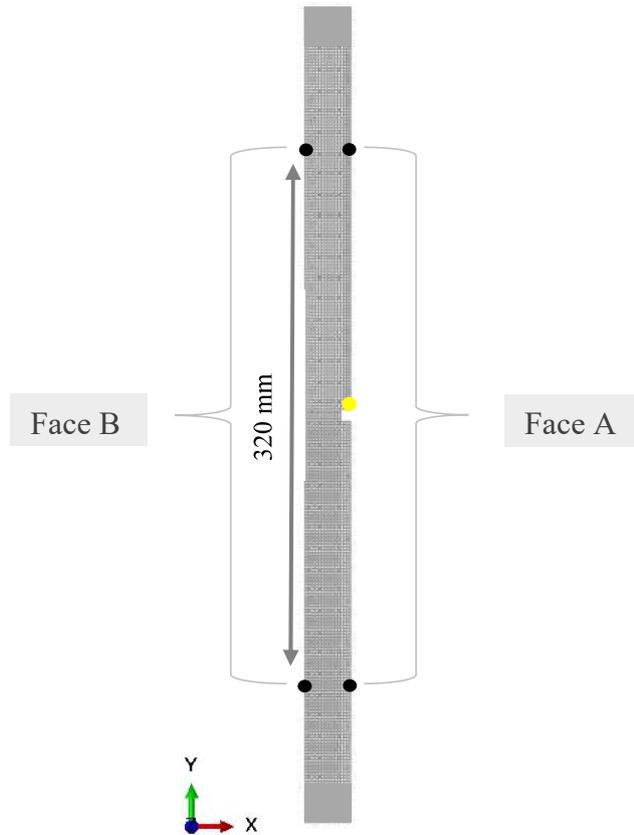
Na Figura 31, está apresentado o modelo com comprimento do LDEM de 2 mm, onde os círculos pretos representam os locais onde foram medidos os deslocamentos verticais, para obter as deformações específicas, enquanto que o círculo amarelo ilustra o local onde foi medido o deslocamento fora do plano, lugares exatamente onde foram instalados os LVDTs nos ensaios experimentais de Milani (2019). Na Figura 32 são apresentadas as curvas de tensão de compressão *versus* deformação específica e tensão de compressão *versus* deslocamento fora do plano, respectivamente. Na Tabela 9 está apresentado os valores das tensões máximas de compressão e a duração de ensaio para cada módulo cúbico básico simulado, sendo que o processador do computador para a realização de todos os ensaios é Intel® Core™ i7-5500U CPU @ 2.40GHz; RAM de 8.00 GB; sistema operacional de 64 bits.

Tabela 9 – Tensões de ruptura para cada módulo cúbico básico ensaiado e duração do ensaio

L (mm)	σ_{rup} (MPa)	Tempo (minutos)
Milani (2019)	4,80	-
5,6	4,90	7
2,8	5,50	28
2	5,40	53
1,4	5,56	122

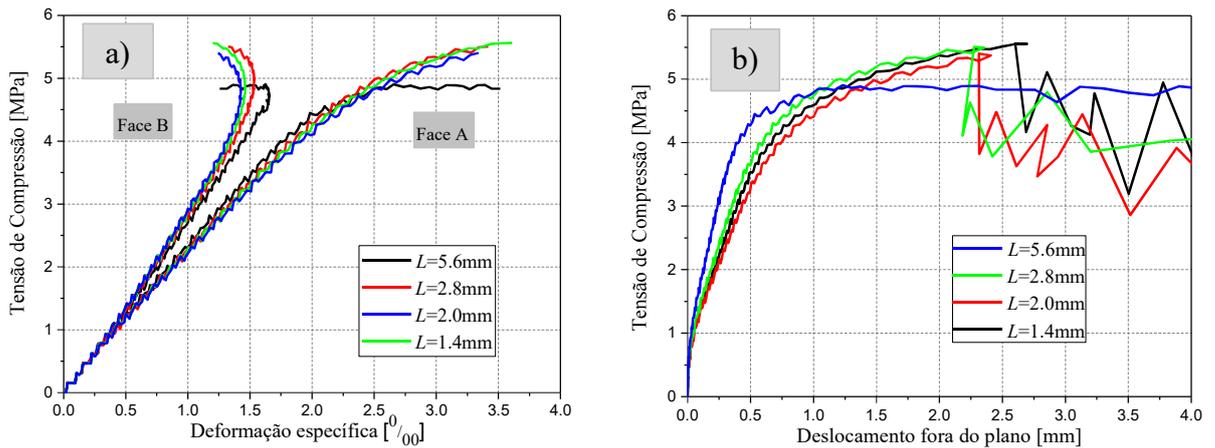
Fonte: elaboração própria

Figura 31 – Pontos onde foram medidos os deslocamentos após a realização das simulações



Fonte: elaboração própria

Figura 32 – a) tensão de compressão versus deformação específica; b) tensão de compressão versus deslocamento fora do plano

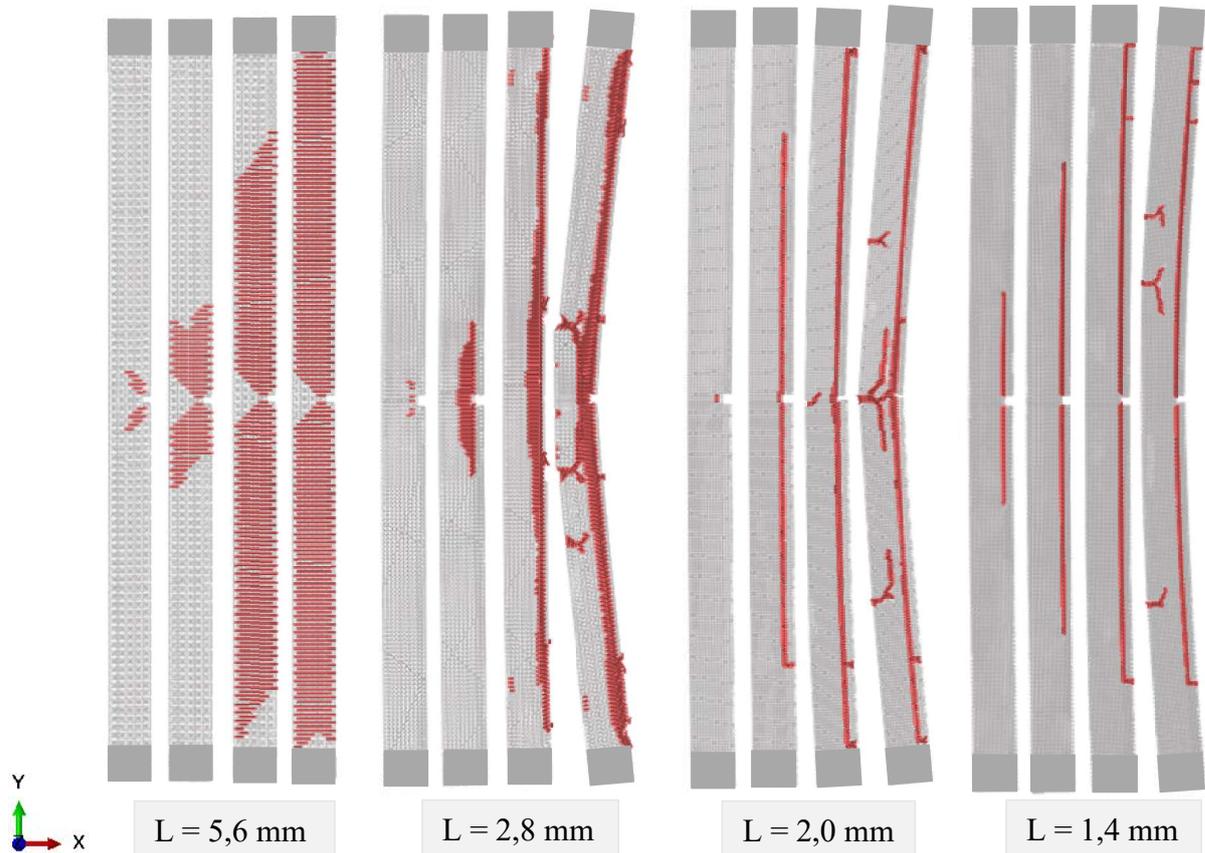


Fonte: elaboração própria

Analisando a inclinação inicial das curvas da Figura 32 a), é possível verificar que é bem parecida para os quatro casos de malha simulados, porém quando a linearidade é alterada, apenas as três malhas com os menores tamanhos apresentaram um comportamento semelhante. Na Figura 33, estão apresentadas as configurações de falha deformadas, para cada comprimento de malha

simulado. Nesta Figura as barras em vermelho representam os elementos quebrados durante a simulação, isto é, indicam onde estão as fissuras e as falhas no modelo, sendo que cada imagem, foi obtida no mesmo tempo de simulação.

Figura 33 – Configuração de falha deformada para cada comprimento do LDEM simulado



Fonte: elaboração própria

Através da configuração de falha, pode-se observar que o mecanismo de falha é bem semelhante ao que Milani (2019) encontrou, mesmo não sendo modelada nenhuma interface de argamassa. Quando as falhas são comparadas entre as malhas, é possível verificar que para a malha mais grossa com comprimento de 5,6 mm, a ruptura não seguiu uma direção vertical, ela atravessou a parede inteira, enquanto que para as malhas mais finas, as fissuras iniciam nos cantos dos cortes e se propagam na direção vertical, para logo aparecer fissuras horizontais devidos à flexão da parede. As malhas com comprimento 2,8 mm e 2,0 mm, apresentaram os resultados mais satisfatórios com um esforço computacional viável. Para a sequência do estudo, foi optado em escolher a malha com comprimento de 2,0 mm, pelo detalhamento da configuração de falha ser mais próximo do experimental.

4 ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

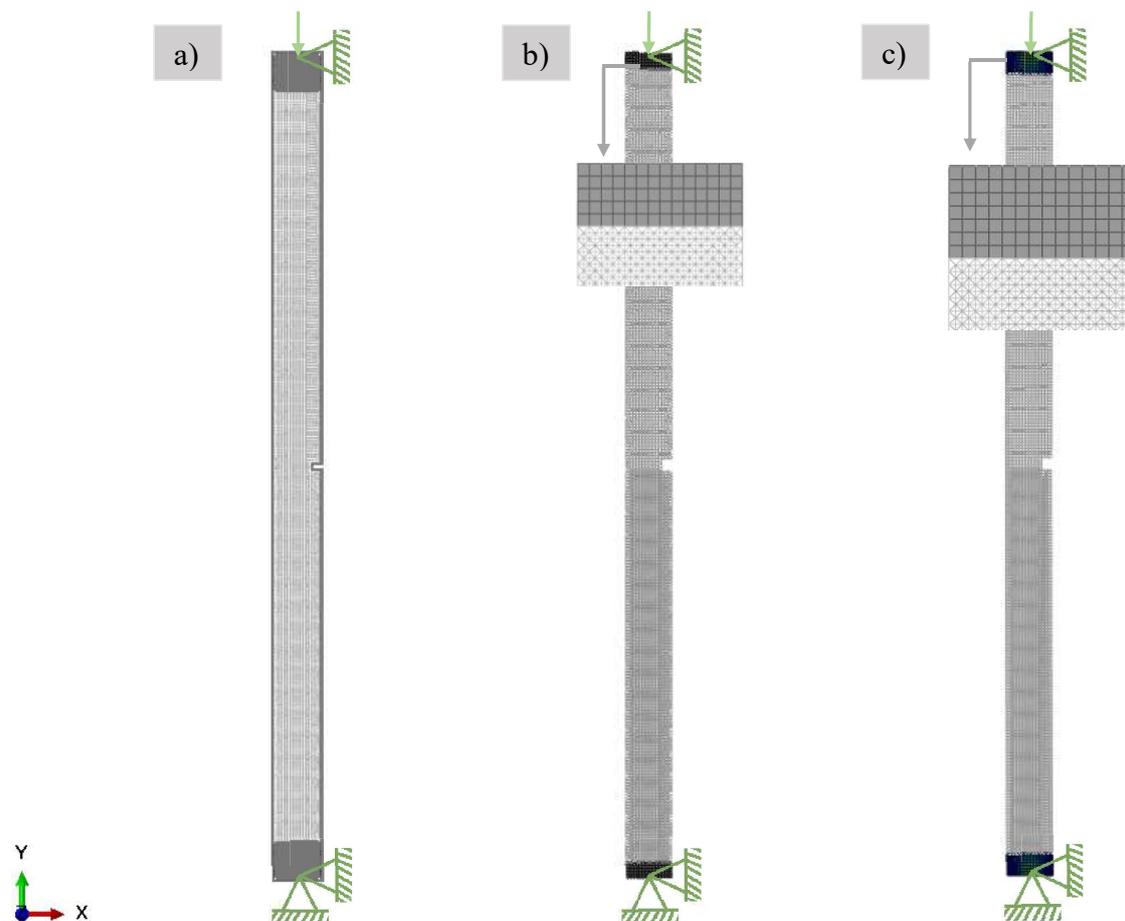
Em trabalhos anteriores, como o de Medeiros (2021); Medeiros, Milani, Lubeck et al. (2022); Zydeck, Azzolin, Milani et al. (2021), foi observado que a condições de contorno mais parecida com o experimental, para realizar as simulações numéricas, seria a condição rotulada – rotulada, porém ela não representa corretamente o comportamento das paredes experimentais. Por este motivo neste item são estudadas diferentes formas de representar as condições de contorno experimentais com o modelo 2D do LDEM.

4.1 Condição rotulado-rotulado (RO-RO)

Após a escolha do comprimento da malha, foi iniciado um estudo sobre as condições de contorno, para reproduzir os resultados experimentais encontrados por Milani (2019). Como primeira condição de contorno foi simulada a condição rotulado – rotulado (RO-RO), ou seja, foi rotulado na parte inferior e rotulado na parte superior da parede nos eixos x e y, a mesma condição de contorno utilizada na análise da malha apresentado na Figura 29. Foi aplicado um deslocamento compressivo na parte superior da parede (eixo y) como pode ser observado um detalhe na Figura 29. Para essa condição de contorno, foram estudados três modelos, o primeiro modelo, modelado completamente pelo LDEM (o mesmo da análise da malha) com reforço nas regiões dos apoios, pois quando não se reforçava essa área, ocorria concentrações de tensões pelos próprios apoios, causando rupturas nesses pontos. Também são estudados dois modelos mistos (ou híbridos) que misturam elementos discretos com elementos finitos na região dos apoios para não ter que alterar as propriedades do material nesta região, pois estes elementos finitos tem comportamento linear elástico e não rompem e também porque com a utilização do FEM é possível obter mais recursos do *software Abaqus* nestas regiões.

Na Figura 34, estão apresentados os modelos testados, bem como as condições de contorno. Para os modelos mistos, a malha da parede foi produzida com elementos do LDEM e do FEM. Para chegar nessas diferentes alturas do FEM, foram simulados vários modelos com diferentes alturas, sendo que os modelos com 5 e 7 módulos de altura foram os que mais se aproximaram dos resultados experimentais. Um detalhamento dos módulos do FEM para os modelos mistos é apresentado na Figura 34 b) e Figura 34 c). A sigla do modelo misto LDEM + 5FEM representa o modelo do LDEM com 5 módulos do FEM e a sigla para o modelo misto com 7 módulos do FEM é caracterizada por LDEM + 7FEM.

Figura 34 – Condições de contorno RO-RO: a) modelo simples LDEM; b) e c) modelos mistos LDEM + FEM, com 5 e 7 módulos de altura do FEM, respectivamente

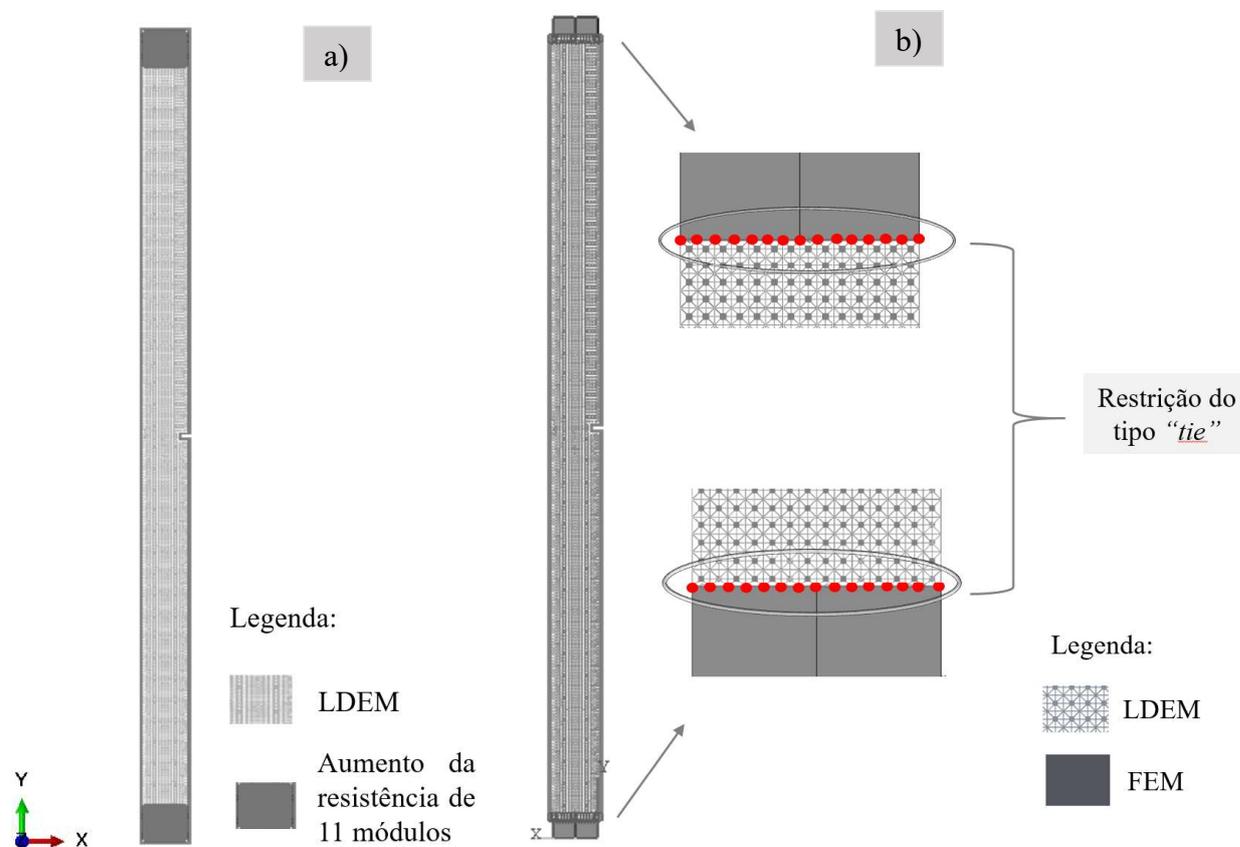


Fonte: elaboração própria

Para a união dos modelos mistos LDEM + FEM, foi utilizado o contato do tipo “*constraint*” com a lei “*tie*”. A configuração final do modelo pode ser observada na Figura 35 b), onde os pontos vermelhos representam o contato entre os métodos do LDEM + FEM. Também pode ser observado que o método do FEM, foi implementado apenas nas extremidades da parede (parte superior e inferior). As propriedades utilizadas para as simulações, são as mesmas apresentadas na Tabela 8.

Na Figura 35 a) está apresentado o modelo simples apenas com o método do LDEM. Para este modelo foi necessário aumentar a resistência de 11 módulos cúbicos básicos do LDEM nas extremidades da parede, pois a falha iniciava nos apoios. Aumentando a resistência em 10 vezes a resistência da parede, foi possível direcionar o início da fissuração para o corte da parede, como ocorria nos ensaios experimentais.

Figura 35 – Modelos numéricos da parede em alvenaria estrutural em 2D: a) modelo simples; b) modelo misto LDEM + FEM



Fonte: elaboração própria

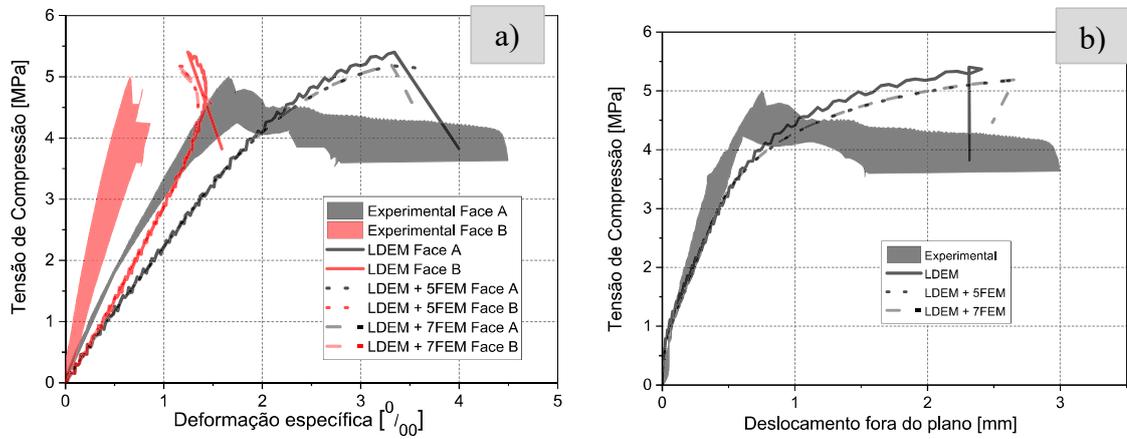
Nas Figura 36 são apresentadas as curvas de tensão de compressão *versus* deformação específica e tensão de compressão *versus* deslocamento fora do plano, para o modelo simples e para os modelos mistos com 5 e 7 módulos de altura do FEM. Destacasse novamente que estas tensões são obtidas em relação a área líquida da parede. Nesta Figura também são colocadas as curvas envolventes dos resultados experimentais para uma melhor comparação dos resultados. Na Tabela 10 são apresentadas as tensões máximas de ruptura.

Tabela 10 – Tensões de ruptura para cada modelo analisado com a condição RO-RO

Modelo	σ_{rup} (MPa)	Tempo (minutos)
Simple (LDEM)	5,40	53
Misto (LDEM + 5FEM)	5,18	55
Misto (LDEM + 7FEM)	5,19	56

Fonte: elaboração própria

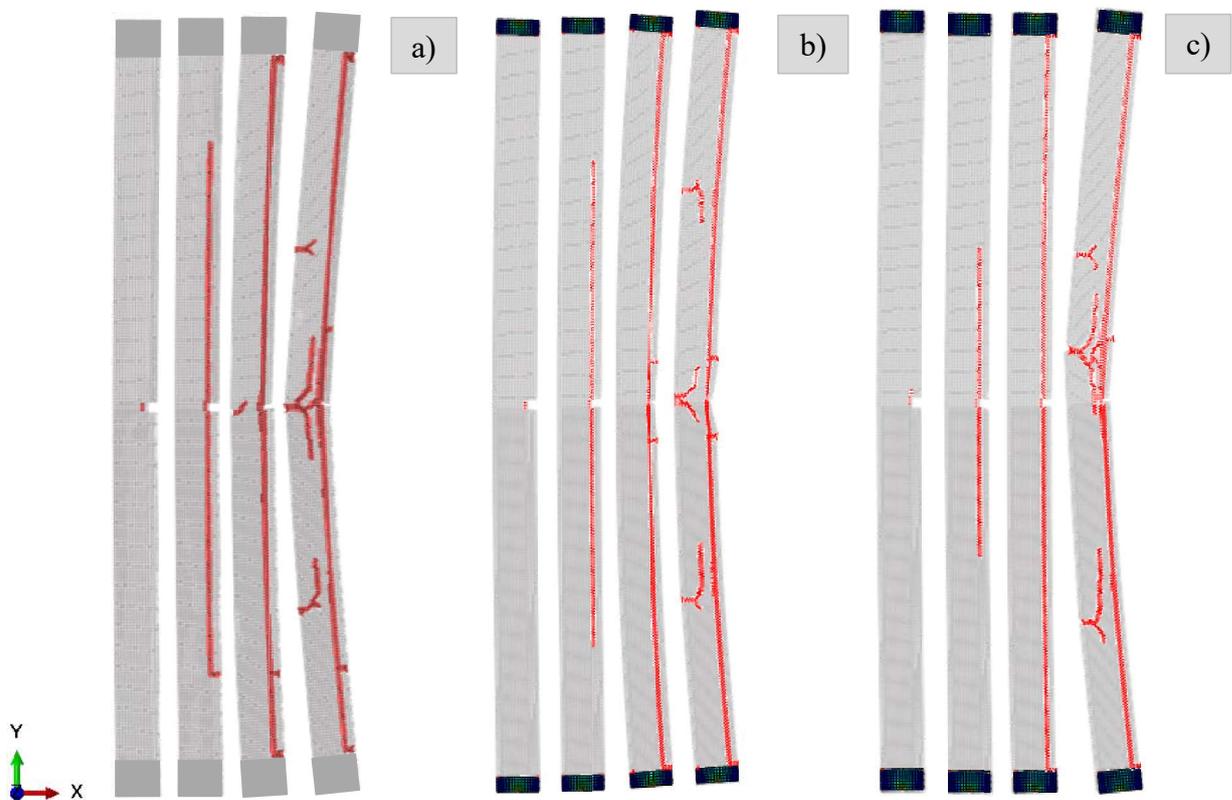
Figura 36 – Parede homogeneizada com 20% de corte: a) Tensão de compressão *versus* deformação específica; b) Tensão de compressão *versus* deslocamento fora do plano, para a condição RO-RO



Fonte: elaboração própria

Na Figura 37, é mostrada a configuração de falha deformada para cada modelo simulado com a condição RO-RO, com corte de 20% de profundidade.

Figura 37 – Configuração de falha deformada, com a condição RO-RO: a) modelo simples; b) modelo misto LDEM + 5FEM; c) modelo misto LDEM + 7FEM



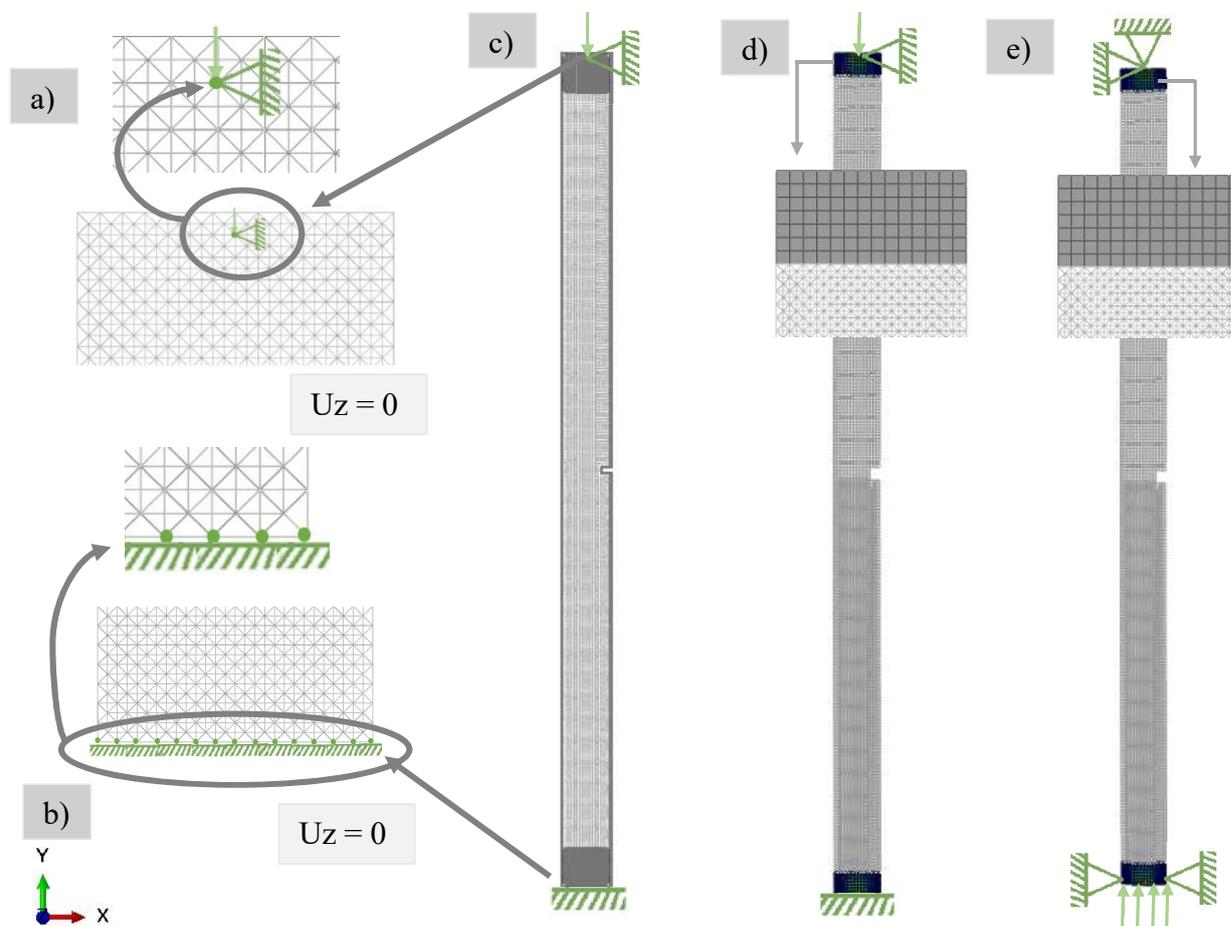
Fonte: elaboração própria

Através dessas simulações com a condição de contorno RO-RO, verificou-se que a inclinação das curvas tensão de compressão *versus* deformação específica e deslocamento fora do plano, não apresentaram similaridade com os resultados experimentais de Milani (2019), entretanto a forma da propagação das fissuras foi bem semelhante. Quando os modelos numéricos são comparados entre eles, verificou-se que todos são bem parecidos, sendo que o modelo simples, resiste apenas 4,28% a mais dos modelos mistos. Já quando os resultados são comparados com os resultados experimentais encontrados por Milani (2019), verificou-se que a tensão de compressão máxima para os modelos numéricos simulados foi maior, cerca de 12,50% e 7,92% para os modelos simples e mistos, respectivamente.

4.2 Condição engastado-rotulado (EN-RO)

Como segunda condição de contorno foi simulado engastado – rotulado (EN-RO), ou seja, engastado em todos os nós da parte inferior da parede e rotulado na parte superior da parede (eixo x), com aplicação de um deslocamento compressivo no eixo y, como pode ser observado um detalhe nas Figura 38 a) e b). Também na Figura 38, estão apresentados os modelos realizados para essas condições de contorno. O primeiro modelo é composto exclusivamente por elementos discretos, mas como explicado anteriormente, foram reforçados os extremos das paredes para evitar a ruptura devido a concentração de tensões dos apoios. Devido as análises anteriores, com a condição RO-RO, verificou-se que os modelos mistos (LDEM + 5FEM e LDEM + 7FEM) são muito semelhantes, tanto na tensão máxima de compressão como no modo de fratura, por isso para essa análise foi optado por utilizar apenas o modelo com 7 módulos do FEM como a segunda opção de análise. O terceiro modelo estudado tem uma pequena alteração na forma de aplicação do carregamento. Neste modelo foi rotulada a parte superior da parede e na parte inferior da parede foram restritos os deslocamentos horizontais e também nesta região foram aplicados os deslocamentos lineares compressivos no eixo y, ou seja, em toda base da parte inferior da parede, como pode ser observado na Figura 38 e). Esse modelo da Figura 38 e) é o mais parecido com o experimental, pois nos ensaios de Milani (2019), a base da prensa que subia e a rotula na parte superior da parede causava a deformação. Foi estudada esta condição para verificar se o local de aplicação do deslocamento causava alguma variação nos resultados de compressão e na configuração de falha.

Figura 38 – Condição de contorno EN-RO: a) modelo simples LDEM; b) modelo misto LDEM + 7FEM; c) modelo misto LDEM + 7FEM aplicação do deslocamento invertido



Fonte: elaboração própria

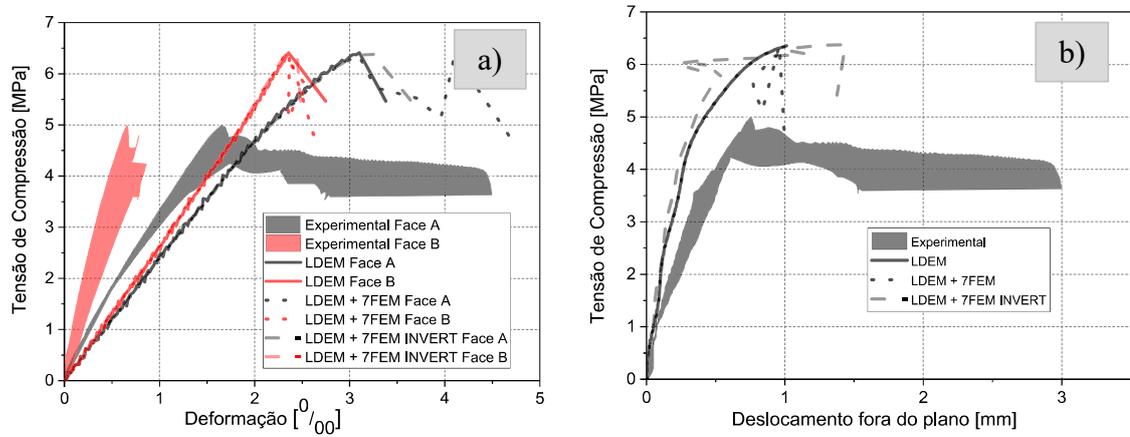
Nas Figura 39 são apresentadas as curvas de tensão de compressão *versus* deformação específica e tensão de compressão *versus* deslocamento fora do plano, para os modelos simulados com a condição EN-RO, comparadas com os resultados experimentais e na Tabela 11 são apresentadas as tensões máximas de ruptura, para cada modelo simulado.

Tabela 11 – Tensões de ruptura para cada modelo analisado com a condição EN-RO

Modelo	σ_{rup} (MPa)	Tempo (minutos)
Simplex (LDEM)	6,41	47
Misto (LDEM + 7FEM)	6,37	46
Misto (LDEM + 7FEM) deslocamento invertido	6,38	46

Fonte: elaboração própria

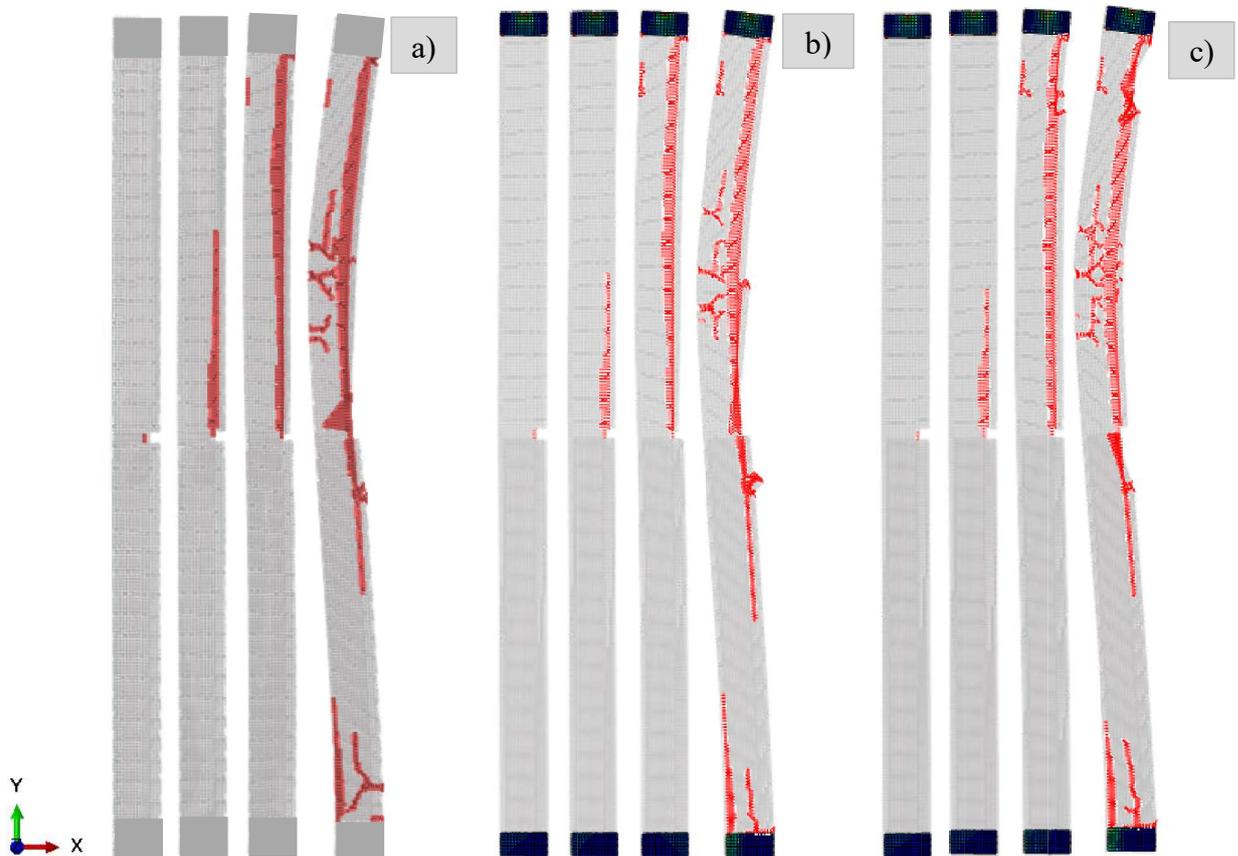
Figura 39 – Parede homogeneizada com 20% de corte: a) tensão de compressão *versus* deformação específica; b) tensão de compressão *versus* deslocamento fora do plano, para a condição EN-RO



Fonte: elaboração própria

Na Figura 40, é mostrada a configuração de falha deformada para cada modelo simulado com a condição EN-RO, para a parede homogeneizada com corte de 20% de profundidade.

Figura 40 – Configuração de falha deformada, com a condição EN-RO: a) modelo simples; b) modelo misto; c) modelo misto com deslocamento invertido



Fonte: elaboração própria

Através da análise das simulações com a condição EN-RO, verificou-se que o modo de falha e a tensão de compressão máxima foi semelhante entre os modelos numéricos simulados. Quando os modelos numéricos são comparados com os resultados experimentais, percebeu-se que o modo de falha é bem semelhante, porém a inclinação da curva da tensão *versus* deformação específica e deslocamento fora do plano é diferente, sendo que a tensão máxima de compressão foi maior, cerca de 33,54% para o modelo numérico simples e 32,71% maior para os modelos mistos, quando comparado com os resultados experimentais de Milani (2019). Este fato pode ser justificado pelo modelo ser em 2D e não um modelo em 3D, como foi realizado experimentalmente. Também foi possível verificar que alterando o local e o modo de aplicação do deslocamento, não alteram-se os resultados.

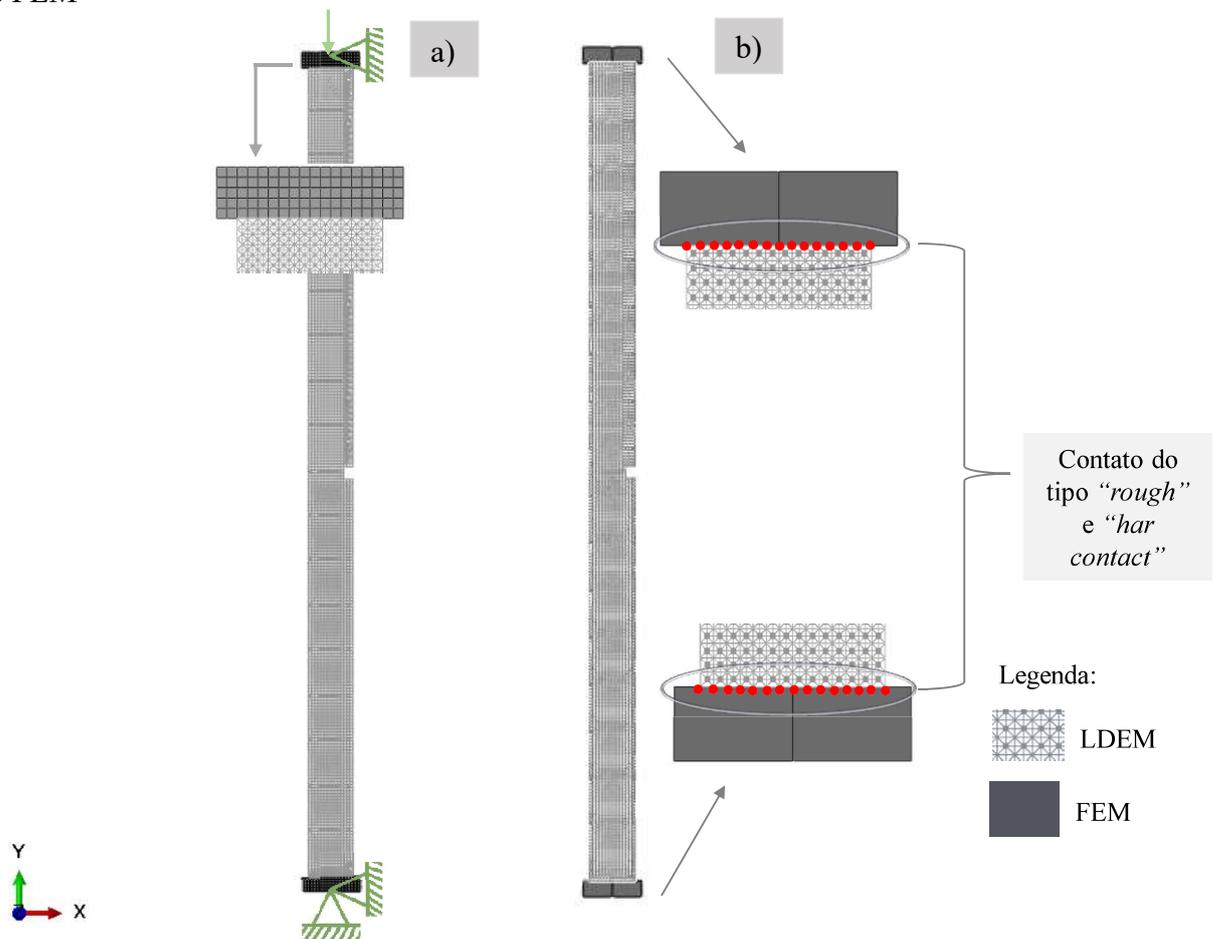
4.3 Análise dos resultados obtidos com as condições RO-RO e EN-RO

Através das simulações, para as condições RO-RO e EN-RO, verificou-se que a duração do ensaio para as diferentes configurações de condição de contorno foi bem próxima, sendo que para os modelos com a condição RO-RO demoraram um pouco mais. Comparando a tensão máxima de compressão entre os modelos com as diferentes configurações de condição de contorno, verificou-se que para os modelos com a condição RO-RO a tensão máxima de ruptura foi mais próxima do experimental. Já analisando a configuração de falha para as diferentes configurações de condição de contorno, constatou-se que a forma de ruptura é bem diferente, sendo que para as duas condições (RO-RO e EN-RO), a ruptura inicia no corte, porém para a condição RO-RO, a fissura se amplia de forma igual para cima e para baixo da parede, até os apoios, enquanto que para a condição EN-RO, a fissura se estende apenas do corte para a parte superior da parede até o apoio, assim que chega no apoio superior, a fissura inicia do corte para a parte inferior da parede. Comparando as configurações de falha das simulações numéricas com as experimentais encontradas por Milani (2019), verificou-se que para a condição EN-RO, o modo de falha foi mais semelhante. Milani (2019), percebeu que a fissura também iniciava no corte e se propagava para cima (Figura 23), ou seja, não se propagava de forma igual, como foi encontrado através das simulações com a condição RO-RO. Ainda é possível comprovar que se alterar o local do carregamento ou realizando modelos mistos LDEM + FEM ou apenas modelo do LDEM reforçado, para a condição EN-RO os resultados da tensão máxima de compressão e o modo de falha, não alteram consideravelmente.

Foi estudada uma outra condição de contorno que tentasse representar de forma mais detalhada o ensaio experimental. Neste caso foi simulado placas de aço nas extremidades das

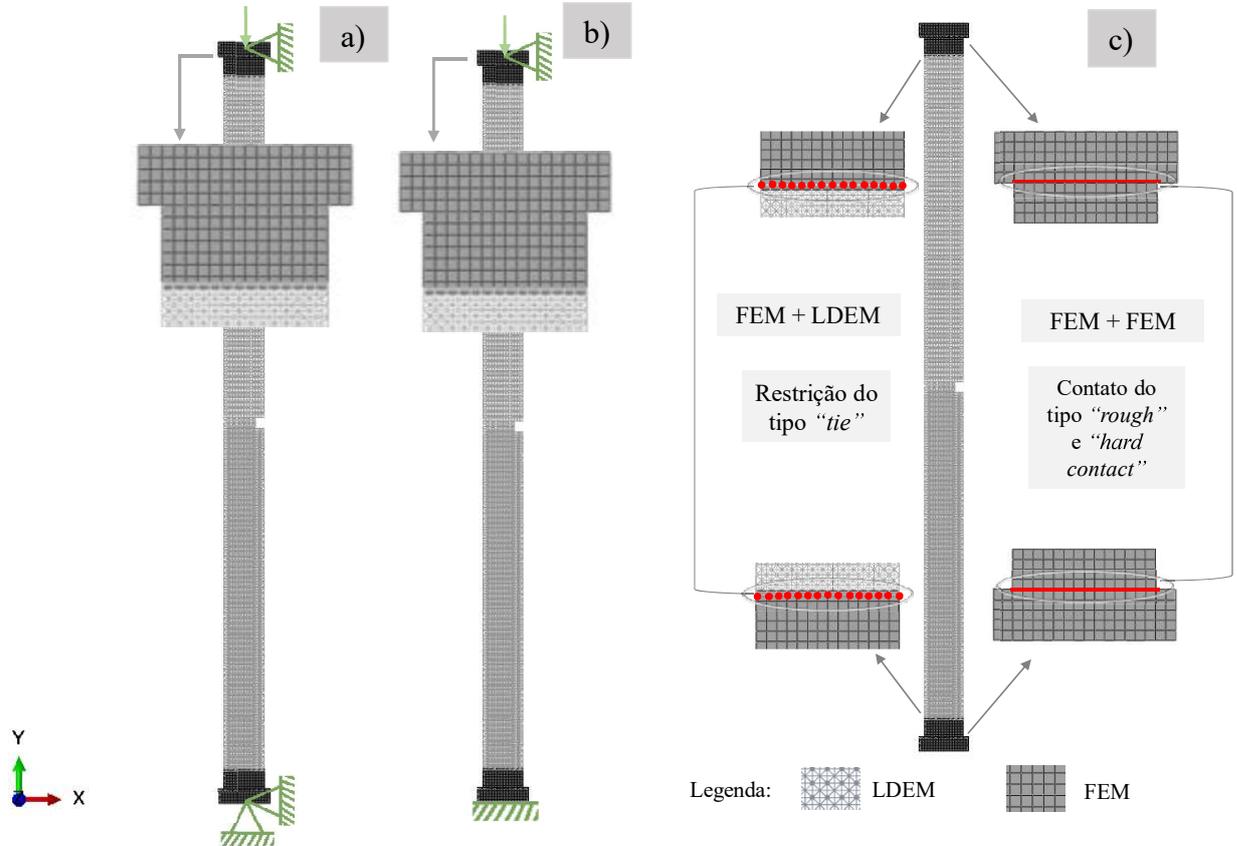
paredes, representando as bases da prensa e do dispositivo do carregamento, pois os mesmos são mais rígidos. Também se permitiu o descolamento entre essa placa e a parede quando aparecessem deslocamentos ou regiões de tração. Duas alternativas foram consideradas, na primeira a parede é modelada exclusivamente com elementos discretos e o aço com elementos finitos. Na Figura 41 b) é apresentando o tipo de contato que foi usado para realizar as modelagens desses dois materiais LDEM + FEM. Mais detalhes e resultados sobre este modelo serão apresentados no próximo item deste trabalho (4.4). Na segunda opção, a parede é reforçada com 7 módulos de elementos finitos nas extremidades e ainda é modelado o aço. Na Figura 42 a) e b) estão apresentados os modelos, as condições de contorno simuladas e o tipo de interação que foi usado entre os métodos LDEM + FEM e FEM + FEM. Onde a interação entre os modelos LDEM + FEM utilizada foi o contato do tipo “*constraint*” com a lei “*tie*” e para os modelos FEM + FEM que são a parede 7 módulos e o aço, foi utilizada a condição de contato “*surface-to-surface contact*” com as leis de atrito “*rough*” e “*hard contact*”.

Figura 41 – Condição de contorno RO-RO: a) modelo simple LDEM; b) Interação entre o LDEM e FEM



Fonte: elaboração própria

Figura 42 – Modelo Misto LDEM + FEM (parede e aço): a) Condição de contorno RO-RO; b) Condição de contorno EN-RO; c) Interação entre o LDEM + FEM e FEM + FEM



Fonte: elaboração própria

Inicialmente foi testada a condição RO-RO (Figura 42 a)), porém através de várias tentativas verificou-se que a o modelo exige um esforço computacional muito superior que o modelo da Figura 41 a), sendo que o resultado da tensão máxima de compressão, curvas e a configuração de falha, foram bem semelhantes entre os modelos da Figura 41 e Figura 42 para essa condição de contorno. Já quando foi simulado o modelo misto (Figura 42 b)), com a condição de contorno EN-RO, verificou-se que ocorria distorção excessiva entre os elementos da região de contato. Foram realizadas várias tentativas para melhorar o modelo, porém sempre ocorria algum erro e além disso era necessário um esforço computacional muito grande, devido a esses fatos e também pelo modelo com a condição RO-RO, apresentar resultados bem semelhantes aos modelos anteriores, esse modelo foi abandonado.

Por este motivo no próximo item do trabalho (4.4), será apresentado de forma detalhada o modelo da Figura 41, bem como a explicação do tipo de interação que foi usado e os resultados encontrados. Apesar disso, foi observado que durante as análises prévias, as propriedades dos modelos numéricos precisavam de alguns ajustes, pois os resultados das curvas não

acompanhavam os resultados experimentais. Como os modelos numéricos são em 2D e os resultados experimentais em 3D e sabendo que a relação entre a área líquida e a área bruta é de 0,5, verificou-se que o módulo de elasticidade numérico precisava ser ajustado, pois o módulo de elasticidade experimental foi obtido da curva tensão deformação, sendo que essa tensão era calculada sobre a área bruta da parede. Como nesse modelo em 2D simplificado não é possível levar em conta a área bruta e temos um módulo de espessura, os cálculos devem ser feitos pela área líquida.

Desta maneira concluiu-se que o valor do módulo de elasticidade da parede deve ser multiplicado por 2, pois os resultados dos ensaios experimentais foram obtidos pela área bruta, enquanto que os numéricos pela área líquida, sendo assim necessária a realização dessa conversão no módulo de elasticidade da parede. Na Tabela 12, estão apresentadas as propriedades da parede adaptada que foram utilizadas nas próximas simulações.

Tabela 12 – Propriedades adaptadas para usar nas simulações numéricas

Propriedades	Parede homogeneizada (dados utilizados nas simulações anteriores)	Parede homogeneizada Módulo de Elasticidade equivalente)
E (MPa)	4839	9678
ρ (Kg/m ³)	1900	1900
ν	0,25	0,25
ϵ_p	$7,998 \times 10^{-4}$	$3,999 \times 10^{-4}$
G_f (N/m)	65,14	65,14

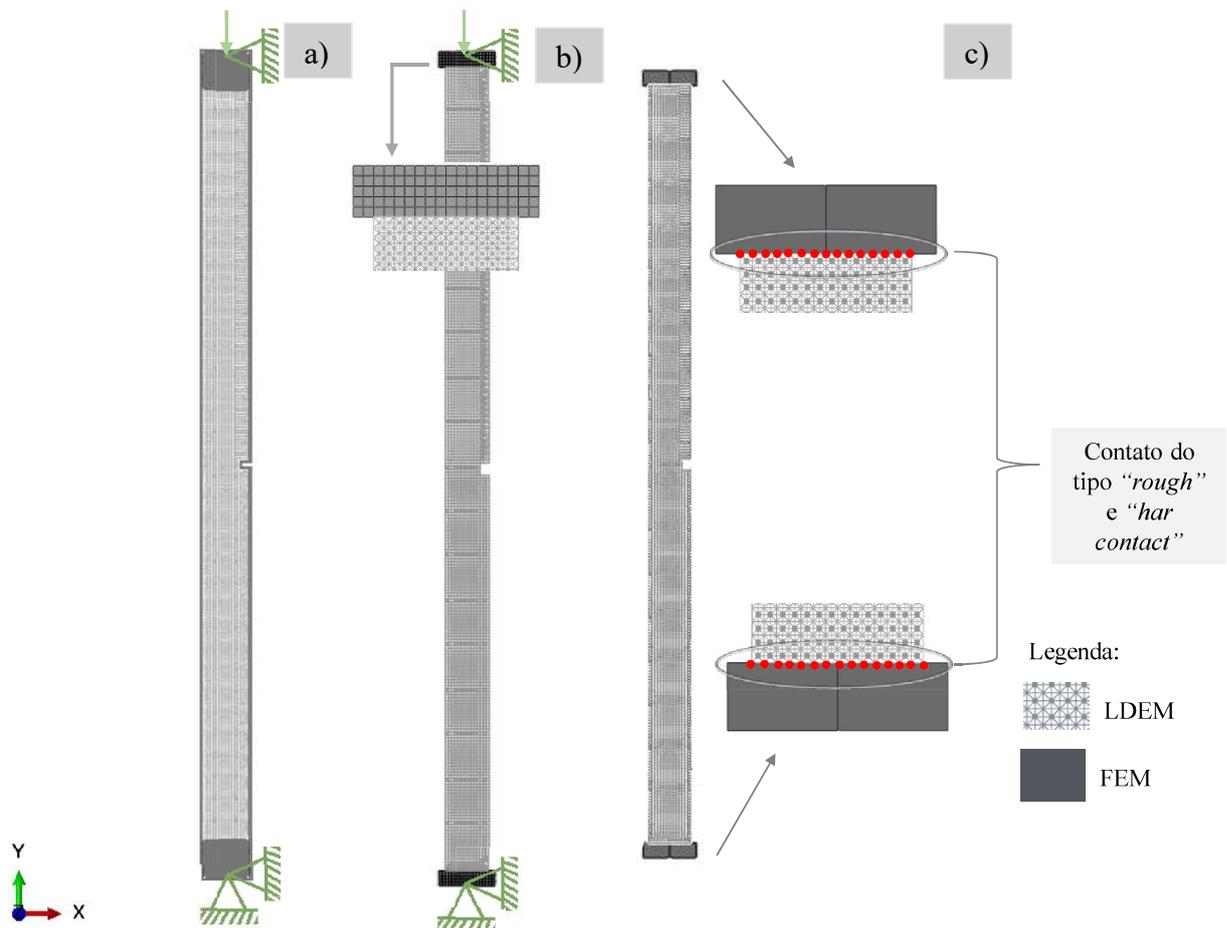
Fonte: elaboração própria

4.4 Condição RO-RO com o módulo de elasticidade equivalente

Para este estudo foram realizados dois modelos, o primeiro inteiramente com o LDEM, com as extremidades do material reforçado para evitar a ruptura por concentrações de tensões, este modelo é similar aos utilizados nos itens anteriores, mas com as propriedades ajustadas, apresentadas na Tabela 12. Além do módulo de elasticidade que foi alterado, a deformação crítica da falha também foi alterada, visto que a deformação crítica é em função do módulo de elasticidade do material a qual é determinada pela Equação 09.

O segundo modelo consiste em um modelo misto LDEM + FEM, onde a parede foi modelada com o LDEM (sem nenhum tipo de reforço), e foi acrescentada a simulação das bases da prensa por intermédio de placas de aço nas extremidades da parede. As placas de aço foram modeladas utilizando FEM, com propriedades elásticas lineares. O contato entre o LDEM + FEM (aço), foi realizado pela condição “*surface-to-surface contact*” com a lei de atrito “*rough*” e “*hard contact*”. Inicialmente foram realizados ensaios com a condição de contorno RO-RO, em seguida foram alteradas as condições de contorno para EN-RO. O detalhamento dos modelos e do contato entre o LDEM + FEM, para a condição RO-RO é apresentado na Figura 43.

Figura 43 – Condição de contorno RO-RO: a) modelo simples LDEM; b) modelo misto LDEM + FEM (aço); c) Interação entre o LDEM e FEM



Fonte: elaboração própria

Na Tabela 13, estão apresentadas as propriedades do aço utilizadas para as simulações dos modelos mistos.

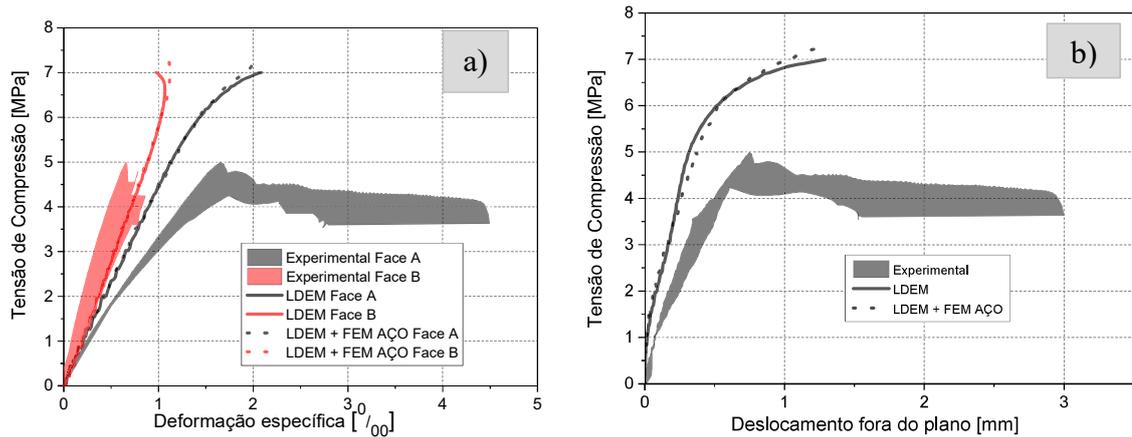
Tabela 13 – Propriedades do aço

Propriedades	Aço
E (GPa)	225
ρ (Kg/m ³)	7850
ν	0,3

Fonte: elaboração própria

Nas Figura 44 e 45 e na Tabela 14, estão apresentados os resultados encontrados para as simulações numéricas dos modelos da Figura 43, com a condição de contorno RO-RO, com corte de 20% de profundidade.

Figura 44 – a) tensão de compressão *versus* deformação específica; b) tensão de compressão *versus* deslocamento fora do plano, para a condição RO-RO



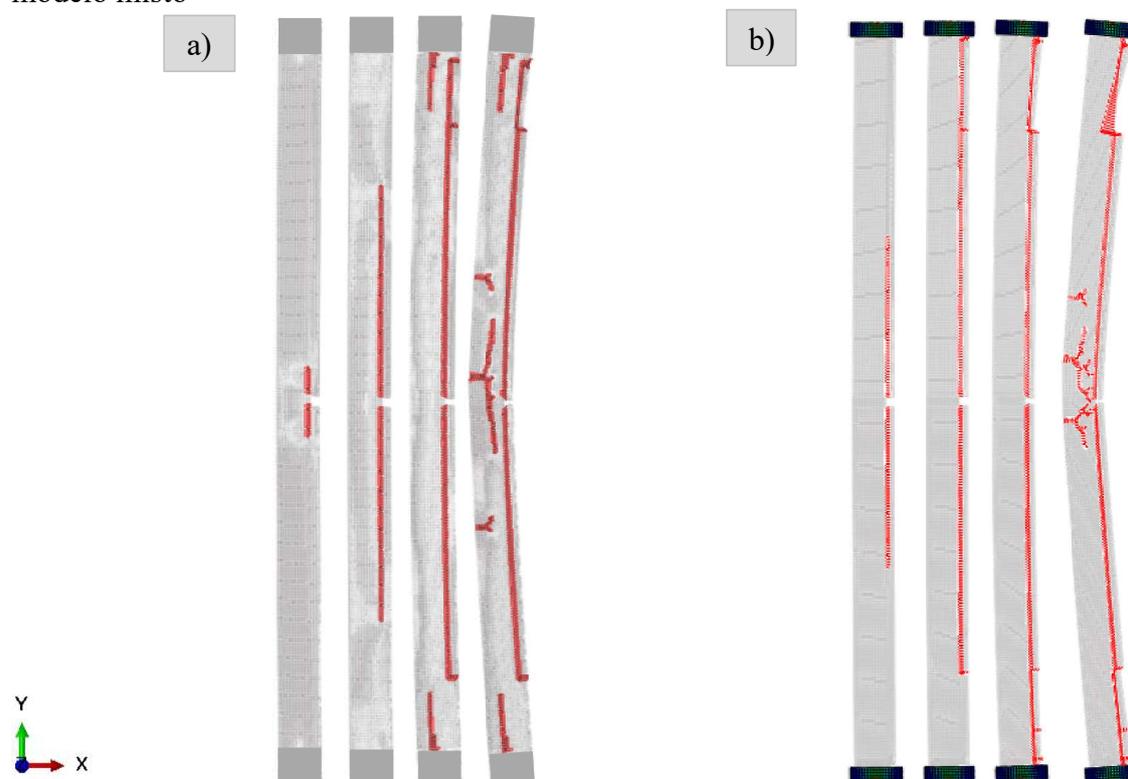
Fonte: elaboração própria

Tabela 14 – Tensões de ruptura com o módulo de elasticidade equivalente, condição RO-RO

Modelo	σ_{rup} (MPa)	Tempo (minutos)
Simple LDEM	7,00	55
Misto LDEM + FEM (aço)	7,23	54

Fonte: elaboração própria

Figura 45 – Configuração de falha deformada, para a condição RO-RO: a) modelo simples; b) modelo misto



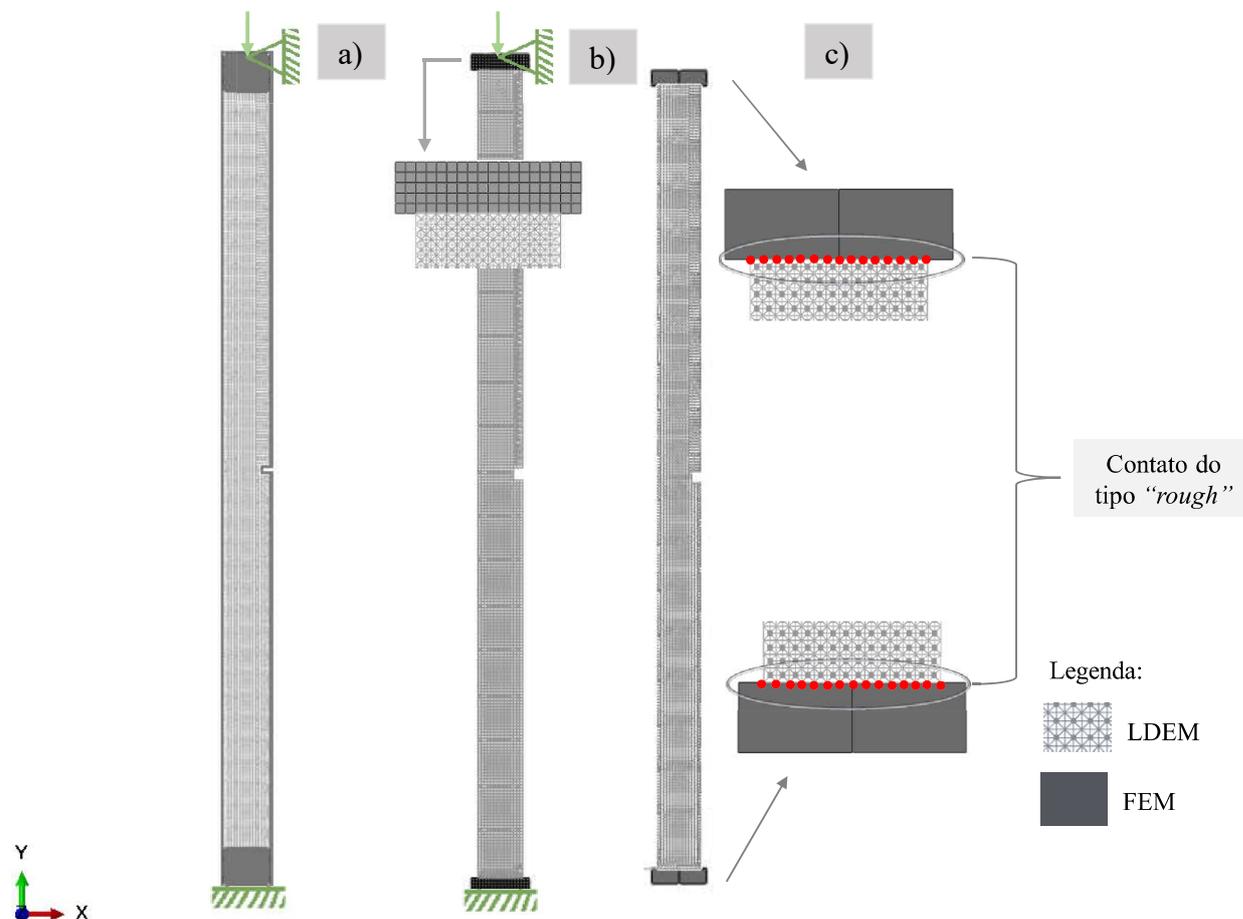
Fonte: elaboração própria

Através dessas simulações, verificou-se que a tensão de ruptura ou tensão máxima de compressão, aumentou 45,83% para o modelo simples apenas com o LDEM e para o modelo misto cerca de 50,62%, quando comparada com os resultados experimentais. A inclinação das curvas para os gráficos tensão de compressão *versus* deformação específica, melhorou, enquanto que a inclinação da curva tensão de compressão *versus* deslocamento fora do plano, ficou mais íngreme, ficando mais inclinada do que no ensaio experimental. A configuração de falha, não alterou, sendo que ficou bem semelhante com os resultados experimentais de Milani (2019).

4.5 Condição EN-RO com o módulo de elasticidade equivalente

Nas Figura 46 a) e b), estão apresentados os modelos simples e misto, para a condição de contorno EN-RO. A interação entre o LDEM e o FEM para o modelo misto é a mesma que foi utilizada para o modelo misto com a condição RO-RO (item 4.4), um detalhe da interação do modelo misto também é apresentado na Figura 46 c).

Figura 46 – Condição de contorno EN-RO: a) modelo simples LDEM; b) modelo misto LDEM + FEM (aço); c) Interação entre o LDEM e FEM



Fonte: elaboração própria

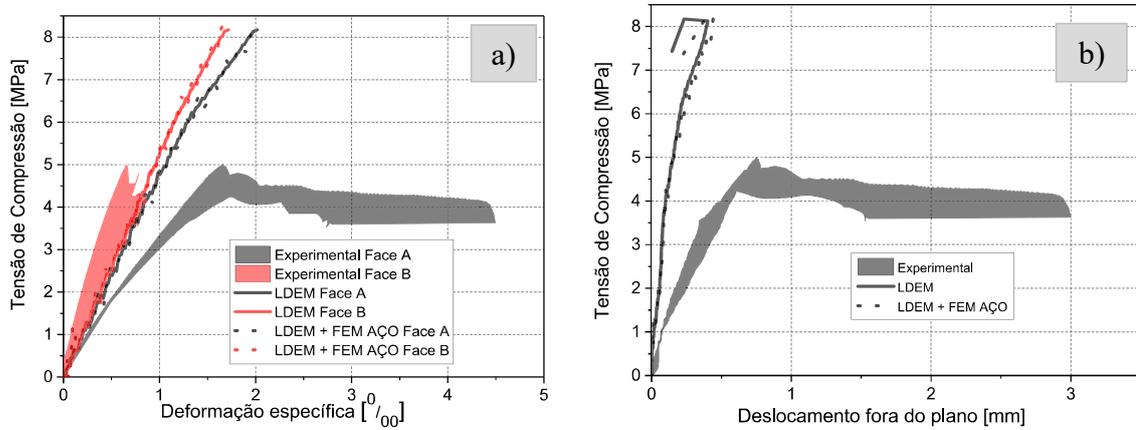
Após a realização das simulações, foi realizada a obtenção dos dados e dos modos de falha, para cada modelo simulado, os quais estão apresentadas na Figura 47 e 48, respectivamente. Na Tabela 15 estão apresentados os resultados da tensão de compressão.

Tabela 15 – Tensões de ruptura com o módulo de elasticidade equivalente, condição EN-RO

Modelo	σ_{rup} (MPa)	Tempo (minutos)
Simple LDEM	8,17	58
Misto LDEM + FEM (aço)	8,30	62

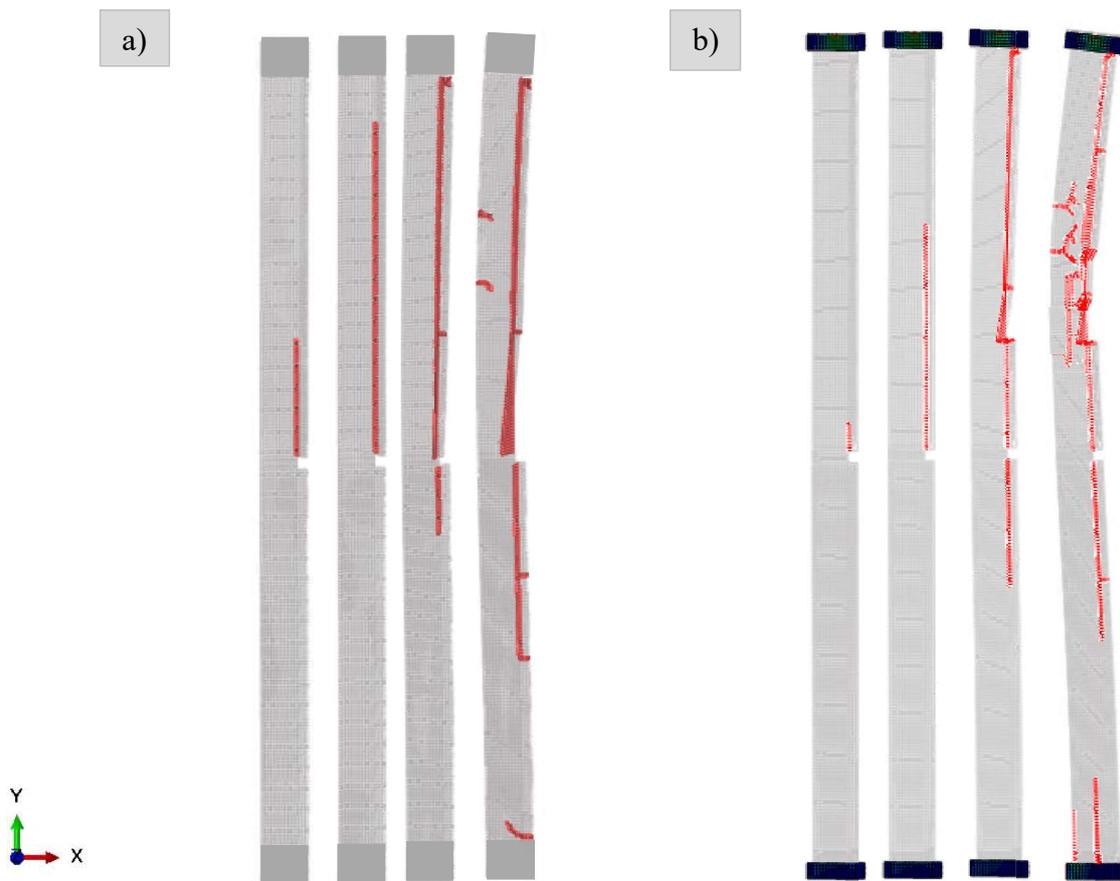
Fonte: elaboração própria

Figura 47 – a) tensão de compressão *versus* deformação específica; b) tensão de compressão *versus* deslocamento fora do plano



Fonte: elaboração própria

Figura 48 – Configuração de falha deformada, para a condição EN-RO: a) modelo simples; b) modelo misto



Fonte: elaboração própria

Assim como para o modelo numérico simples com a condição de contorno RO-RO, com o módulo de elasticidade equivalente, para o modelo numérico simples com a condição EN-RO, a tensão de ruptura foi maior, cerca de 70,21%, quando comparada com o experimental. E novamente a inclinação das curvas para os gráficos tensão de compressão *versus* deformação específica, melhorou, enquanto que a inclinação da curva tensão de compressão *versus* deslocamento fora do plano, ficou mais íngreme, quando comparada com o modelo numérico RO-RO e com a curva experimental.

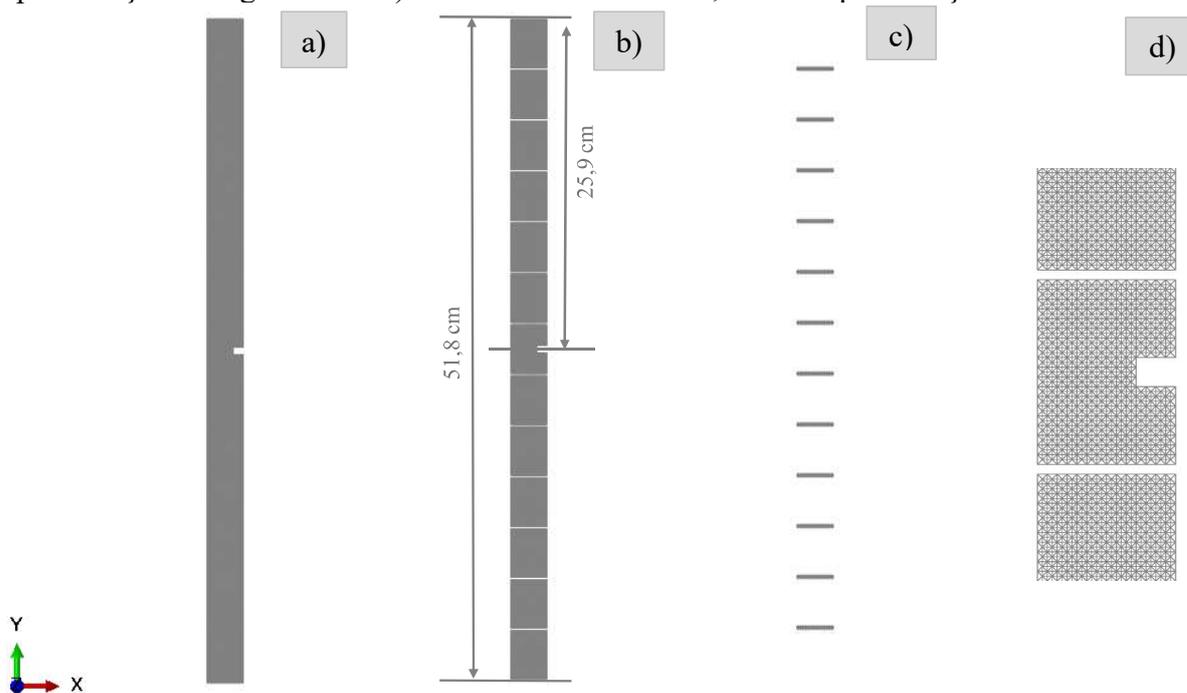
Analisando a configuração de falha, percebeu-se que o modo de ruptura foi bem parecido para os dois modelos analisados, inicia no corte, sobe para a parte superior da parede e depois desce para a parte inferior da parede. Comparando os dois modelos com as condições RO-RO e EN-RO, verificou-se que com a utilização do método dos elementos finitos os resultados não alteraram significativamente. Sendo assim é viável realizar as simulações apenas com o método dos elementos discretos, pois os resultados entre os dois modelos não variaram e também pelo modelo com o LDEM ser um pouco mais rápido.

5 MODELOS SIMULADOS COM O LDEM E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Corte central com 20, 30 e 50% de profundidade, com carregamento centrado

Com os modelos realizados até agora, se observou que a inclinação da curva melhorou um pouco, porém a resistência de compressão máxima ficou mais alta do que o esperado e também a forma de ruptura, por mais que seja similar aos resultados experimentais tem algumas diferenças. Sendo uma delas que as falhas por flexão aparecem em qualquer lugar no modelo, enquanto que nos ensaios experimentais as fissuras por flexão sempre coincidem com a separação entre tijolos e argamassa, ou seja, isso ocorre devido as linhas criadas pela argamassa. Por este motivo, foi estudado um outro modelo, onde foram simuladas as faces dos blocos e as faces das argamassas, como pode ser observado Figura 49. Para este modelo foi utilizado apenas o método do LDEM, pois através das simulações anteriores verificou-se que com a utilização apenas do LDEM os resultados foram os mais próximos dos experimentais. Como o modelo é apenas com o LDEM, não existe interface entre os materiais, pois são discretizados dois materiais diferentes e eles são colados, ou seja, vai começar a romper no bloco ou na argamassa. Na Figura 49 a) está apresentada a configuração do modelo bloco + argamassa, na Figura 49 b) está apresentada apenas as faces dos blocos na Figura 49 c) a face da argamassa e na Figura 49 d) um detalhamento da malha, com o corte central de 30% de profundidade.

Figura 49 – a) configuração do modelo bloco + argamassa; b) representação dos blocos; c) representação da argamassa e d) detalhamento da malha, com a representação do corte



Fonte: elaboração própria

Para essas simulações, foram ensaiadas paredes com cortes e carregamento central. A profundidade dos cortes foi de 20%, 30% e 50% de redução da espessura da parede, excluindo assim 3, 4 e 7 módulos do LDEM, respectivamente. As propriedades utilizadas para essas simulações estão apresentadas na Tabela 16, sendo que as propriedades dos blocos e da argamassa são as que Milani (2019) encontrou em seus ensaios experimentais.

Milani (2019), encontrou 5217 MPa de módulo de elasticidade do bloco para a área bruta, como as simulações numéricas são em modelos 2D simplificado, os cálculos devem ser feitos pela área líquida, ou seja, da mesma maneira que foi explicado no item anterior desse trabalho, o valor do módulo de elasticidade do bloco foi multiplicado por 2. Já o módulo de elasticidade da argamassa não foi multiplicado por 2, visto que para encontra-lo Milani (2019), realizou os ensaios em corpos de prova cilíndricos, ou seja, não havia alteração de área bruta e área líquida, encontrado um valor de 7272 MPa. A densidade e o coeficiente de Poisson, para o bloco e argamassa utilizados foram de 1900 kg/m³ e 0,25, respectivamente, sendo que o valor do coeficiente de Poisson é valor limite para este método numérico. A deformação crítica de falha, foi determinada através da Equação 15, sendo que a resistência à tração na compressão do bloco é de 3,87 MPa e a resistência à tração na flexão para a argamassa é de 1,74 MPa, valores encontrados por Milani (2019).

A tenacidade à fratura do material, foi calculada através da Equação 16, citada na metodologia desse trabalho. Com 19,61 MPa de resistência à compressão do bloco na área bruta e 5,84 MPa de resistência à compressão da argamassa, valores encontrados por Milani (2019) e todos os outros parâmetros da Tabela 7 foi possível determinar a energia de fratura. As propriedades do bloco e da argamassa utilizadas para esses modelos estão apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Propriedades utilizadas das simulações

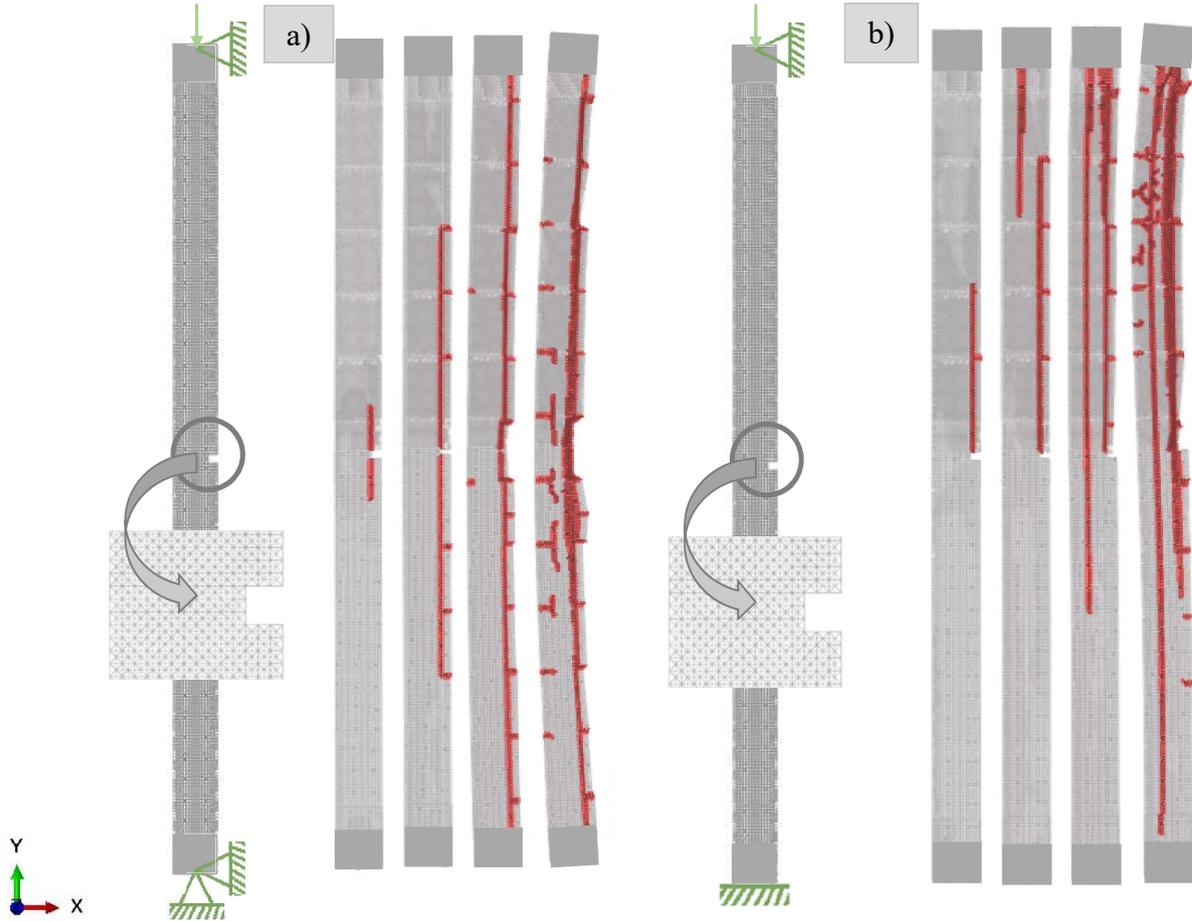
Propriedades	Bloco	Argamassa
E (MPa)	10434	7272
ρ (Kg/m ³)	1900	1900
ν	0,25	0,25
ϵ_p	$3,709 \times 10^{-4}$	$2,392 \times 10^{-4}$
G_f (N/m)	40	17

Fonte: elaboração própria

Na Figura 50, estão apresentados os modelos simulados com corte central de 20% de profundidade, bem como a configuração de falha para cada modelo ensaiado, com a condição RO-

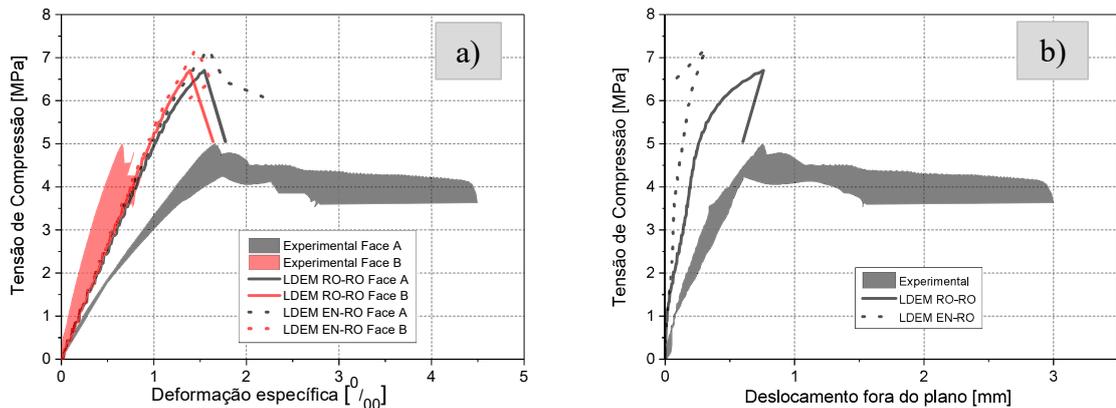
RO e para a condição de contorno EN-RO. Na Figura 51, estão apresentadas as curvas de tensão de compressão *versus* deformação específica e deslocamento fora do plano para os modelos simulados com 20% de corte.

Figura 50 – Modelos simulados com corte central com 20% de profundidade e suas respectivas configurações de falha: a) condição RO-RO ; b) condição EN-RO



Fonte: elaboração própria

Figura 51 – Corte central com 20% de profundidade: a) tensão de compressão *versus* deformação específica; b) tensão de compressão *versus* deslocamento fora do plano



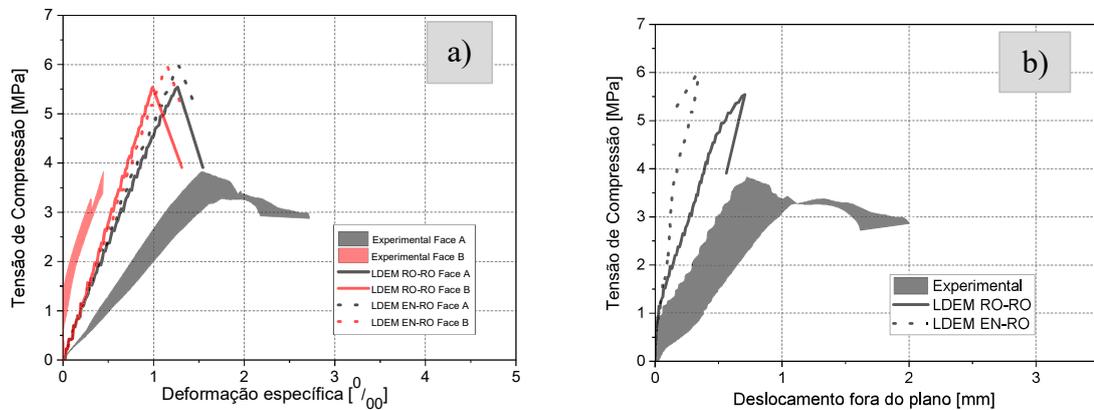
Fonte: elaboração própria

Através da Figura 51 a), verificou-se que a tensão de compressão máxima para o modelo com a condição RO-RO foi de 6,70 MPa, enquanto que para o modelo com a condição EN-RO a tensão de compressão máxima foi 7,20 MPa, para o corte com 20% de profundidade. Analisando a configuração de falha, constatou-se que para o modelo com a condição RO-RO, a fissura inicia no corte e se propaga igualmente para a parte superior e inferior da parede, enquanto que para a condição EN-RO, a fissura também inicia no corte, porém se propaga apenas para a parte superior da parede, chegando até o apoio superior. Assim que a fissura chega no apoio inicia uma nova propagação de fissura do corte para a parte inferior da parede, até chegar no apoio inferior.

Comparando os resultados entre os modelos com as propriedades equivalentes da parede (itens 4.4 e 4.5 desse trabalho), com o modelo bloco + argamassa, verificou-se que a tensão de compressão máxima foi menor para o modelo bloco + argamassa, sendo de 4,28 % a menos para a condição RO-RO e 13,47 % para a condição EN-RO. Já comparando a configuração de falha deformada entre os modelos com as condições RO-RO e EN-RO, pode-se perceber que a forma de falha foi bem parecida, entretanto pode-se verificar que para os modelos bloco + argamassa, além de ocorrer a fissura vertical, ocorreram fissuras horizontais em cada união entre o bloco e a argamassa, sendo que essa configuração de falha ficou semelhante ao experimental, pois também ocorriam fissuras entre as juntas.

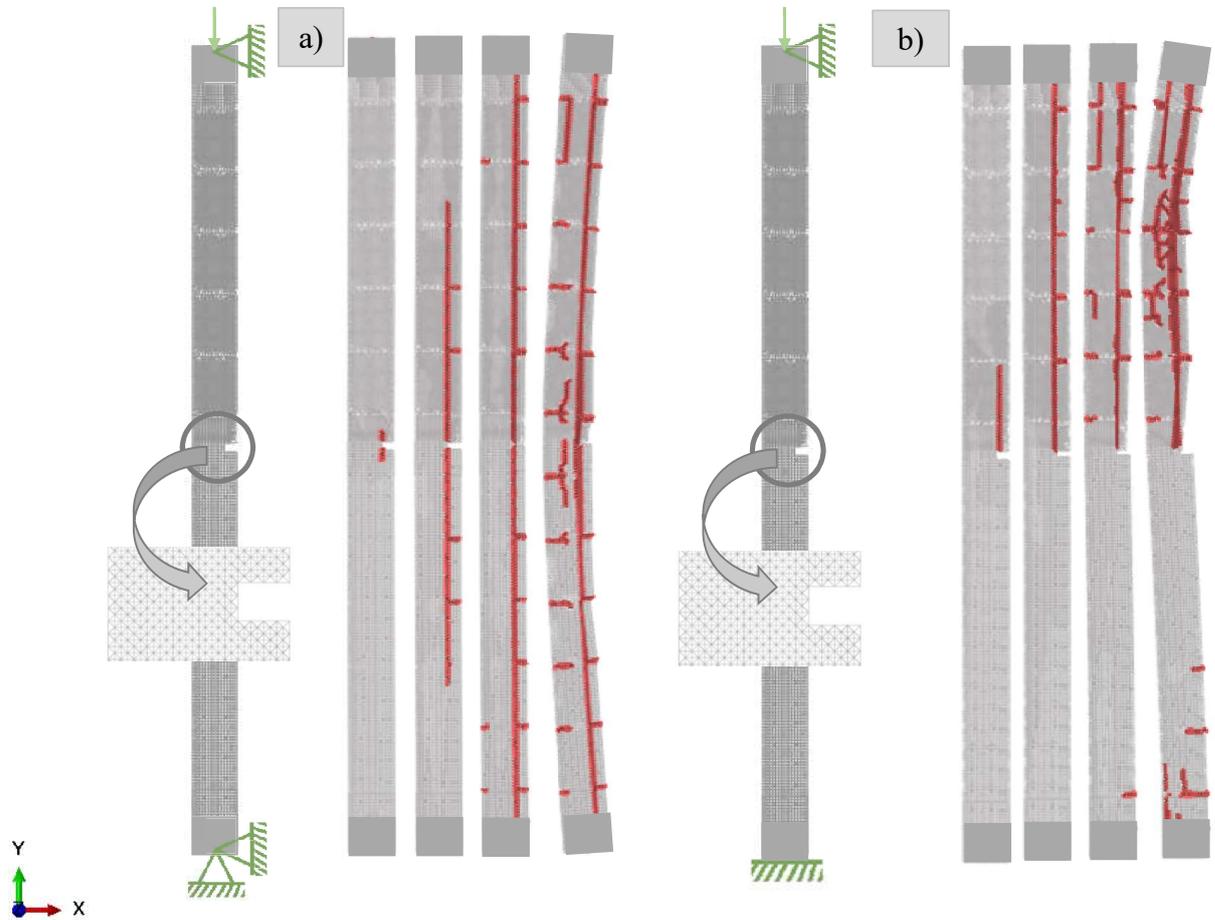
Na Figura 52, estão apresentadas as curvas de tensão de compressão *versus* deformação específica e deslocamento fora do plano para os modelos simulados para o corte de 30% e na Figura 53, estão apresentadas as configurações de falha para cada modelo ensaiado, com a condição RO-RO e EN-RO.

Figura 52 – Corte central com 30% de profundidade: a) tensão de compressão *versus* deformação específica; b) tensão de compressão *versus* deslocamento fora do plano



Fonte: elaboração própria

Figura 53 – Modelos simulados com corte central com 30% de profundidade e suas respectivas configurações de falha: a) condição RO-RO; b) condição EN-RO

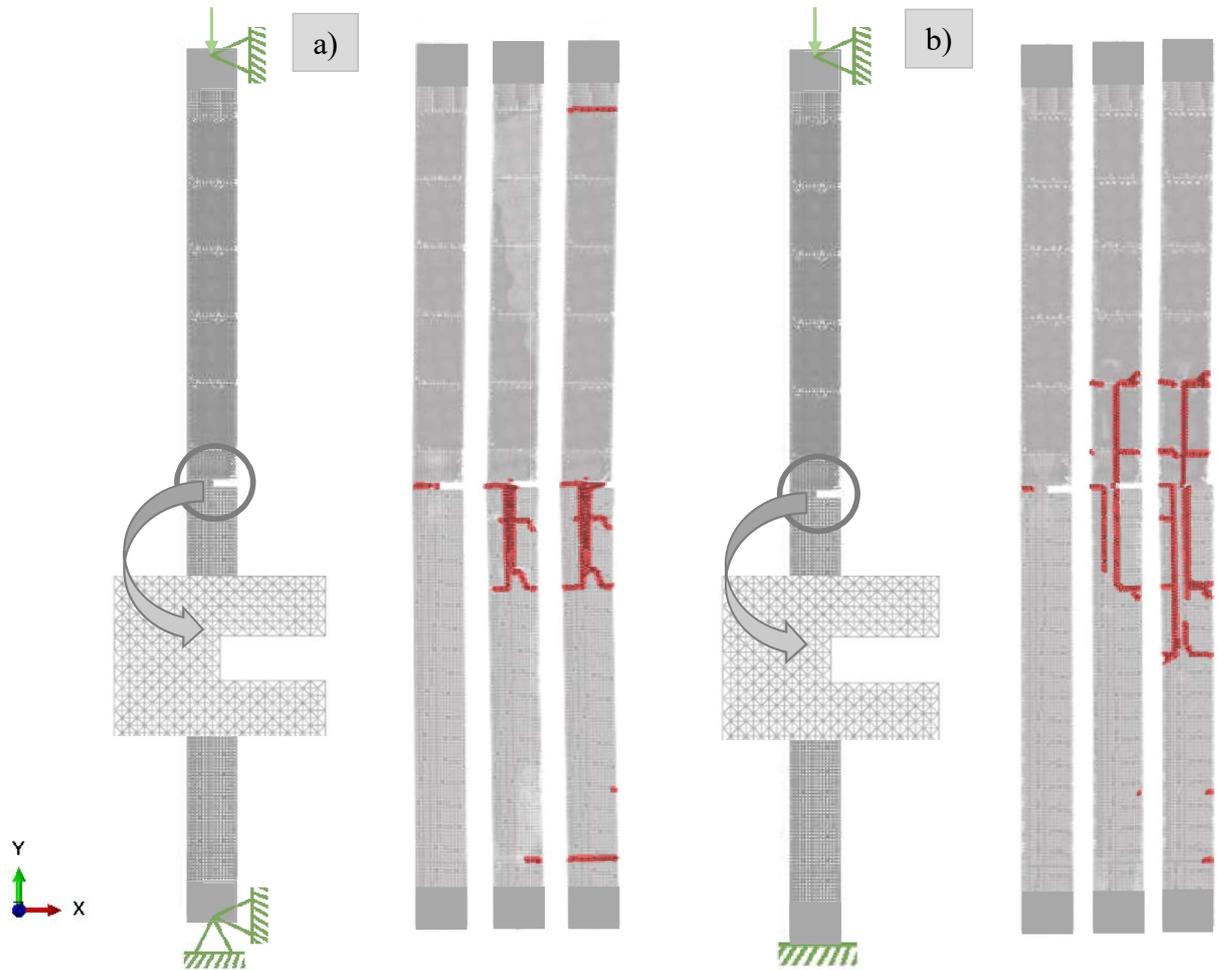


Fonte: elaboração própria

Por meio da Figura 52 a), verificou-se que a tensão de compressão máxima para o modelo com a condição RO-RO foi de 5,54 MPa, enquanto que para o modelo com a condição EN-RO a tensão de compressão máxima foi 5,97 MPa, para o corte com 30% de profundidade, valores mais altos que o experimental, cerca de 58,74% há mais para a condição RO-RO e 71,06% há mais para a condição EN-RO. Observando a configuração de falha, verificou-se que ela foi bem parecida para os modelos com 20% de profundidade de corte, pois para a condição RO-RO, a fissura inicia no corte e se propaga de forma simétrica pela parede, enquanto que para a condição EN-RO, a fissura também inicia no corte, porém se propaga apenas para a parte superior da parede.

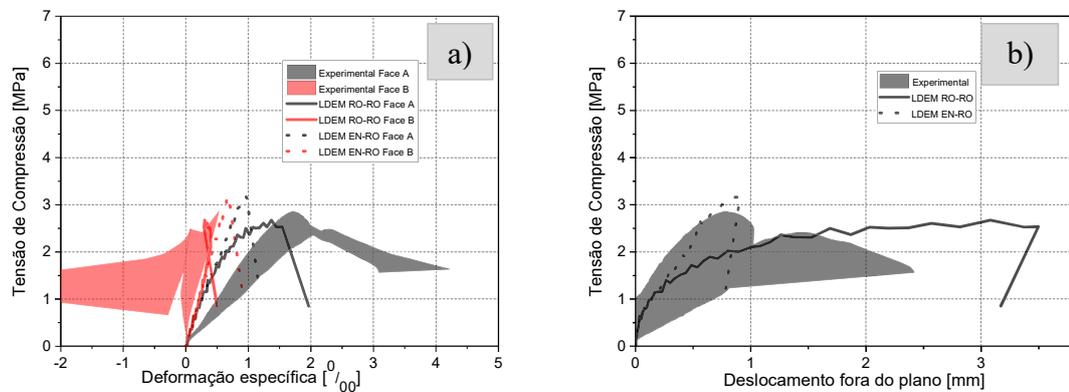
Na Figura 54, estão apresentados os modelos simulados com corte central de 50% de profundidade, bem como a configuração de falha para cada modelo ensaiado, com a condição RO-RO e para a condição EN-RO. E na Figura 55, estão apresentadas as curvas de tensão de compressão *versus* deformação específica e deslocamento fora do plano para os modelos simulados com 50% de corte.

Figura 54 – Modelos simulados com corte central com 50% de profundidade e suas respectivas configurações de falha: a) condição RO-RO; b) condição EN-RO



Fonte: elaboração própria

Figura 55 – Corte central com 50% de profundidade: a) tensão de compressão *versus* deformação específica; b) tensão de compressão *versus* deslocamento fora do plano



Fonte: elaboração própria

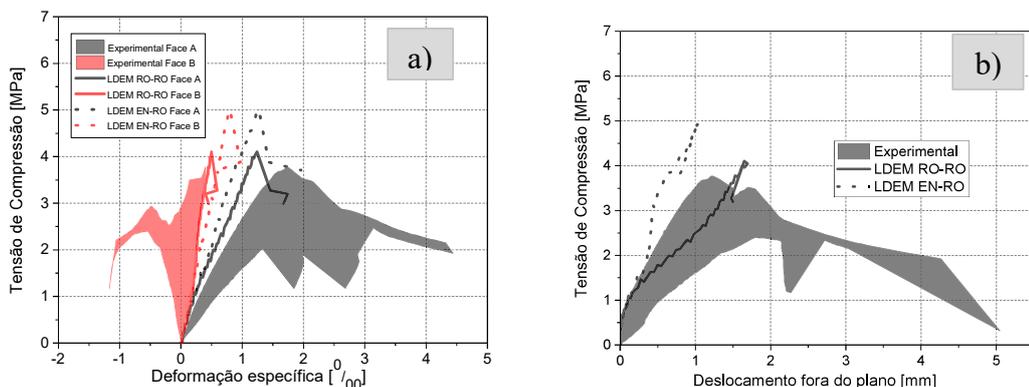
Para os ensaios com corte de 50% de profundidade, encontrou-se uma tensão de compressão máxima de 2,67 MPa para o modelo com a condição RO-RO e 3,17 MPa para o modelo com a condição EN-RO, sendo 3,48% e 22,87% maior que a tensão de compressão máxima encontrada por Milani (2019). Analisando a Figura 55 b), percebe-se que as curvas ficaram mais próximas do experimental. A configuração de falha foi bem parecida para os dois modelos ensaiados com 50% de corte de profundidade, pois ela inicia no corte e se propaga para a parte frontal da parede, deixando assim a parede sem continuidade.

5.2 Cortes central e superior com 30% de profundidade, com carregamento centrado e excêntrico

Também foram realizados ensaios com carregamento excêntrico com corte central e corte superior na parede. Para esses ensaios foram usados os modelos do LDEM com os blocos e argamassa discretizados. A excentricidade foi a mesma que Milani (2019), realizou em seus ensaios, a qual era baseado no método da norma BS 5628 – 1 (2005), que representaria uma laje apoiada em apenas um lado da parede, ou seja, a reação da laje é considerada atuando a 1/3 da espessura da parede (t), a partir de sua face, o que resultaria em uma excentricidade $t/6$, isto é, a uma distância de 1,8 cm. O corte superior foi realizado a uma distância de 9,7 cm da parte superior da parede. Na Figura 57, estão apresentados a distância da excentricidade e um detalhamento da distância do corte superior.

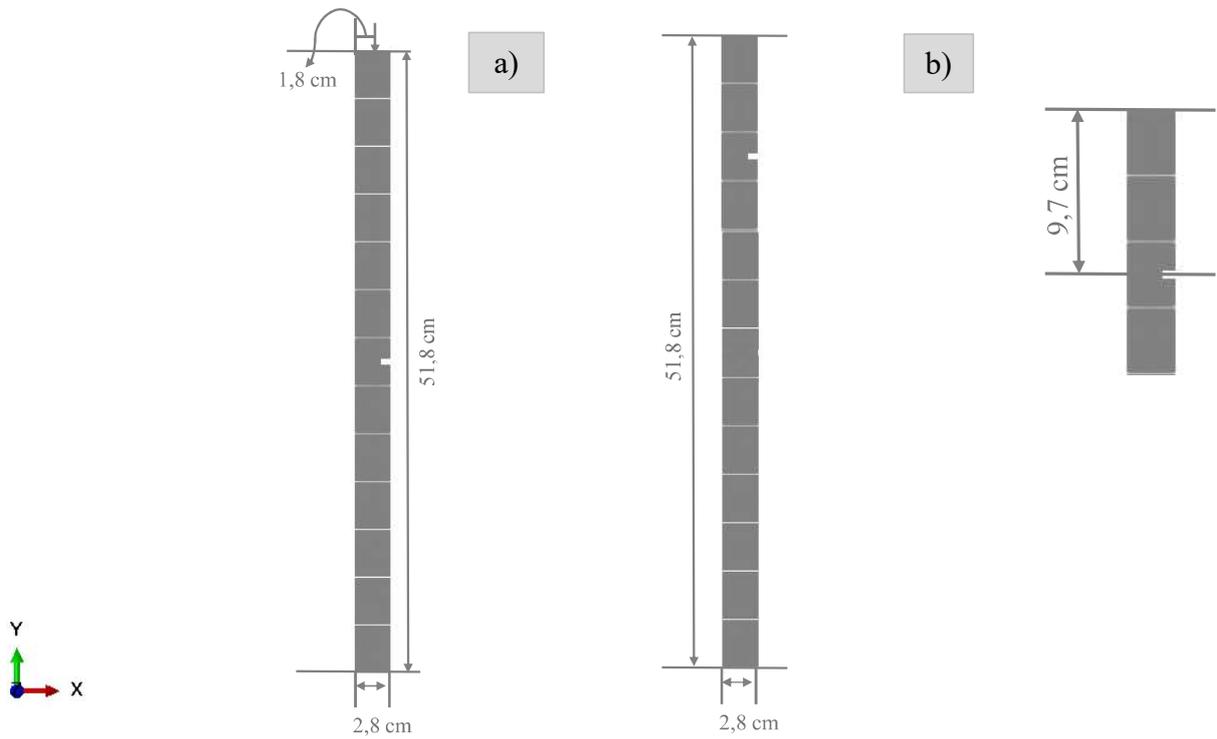
Na Figura 58 estão apresentados os modelos simulados com o corte central com 30% de profundidade de corte e com o carregamento excêntrico, com as suas respectivas configurações de falhas deformadas e na Figura 56, estão apresentadas as curvas de tensão de compressão *versus* deformação específica e deslocamento fora do plano, para cada condição de ensaio.

Figura 56 – Corte central com carregamento excêntrico 30% de profundidade: a) tensão de compressão *versus* deformação específica; b) tensão de compressão *versus* deslocamento fora do plano



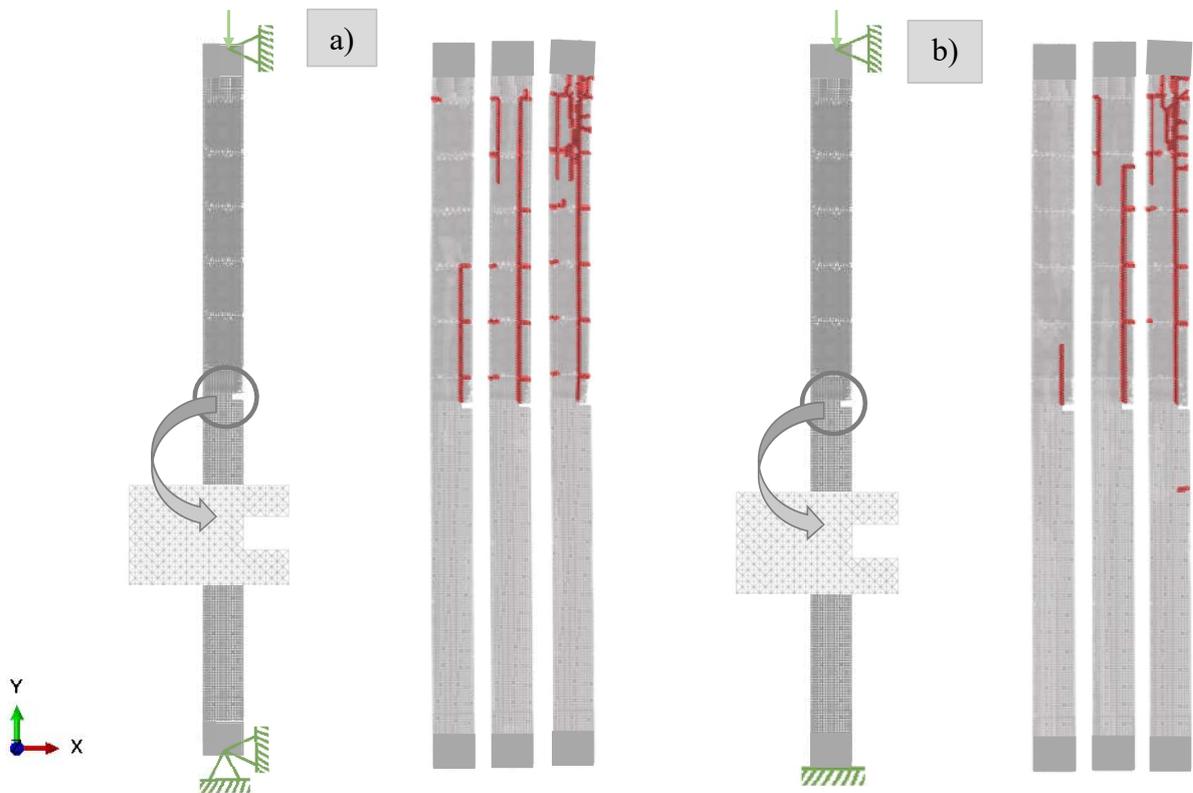
Fonte: elaboração própria

Figura 57 – a) Distância da excentricidade e b) distância do corte superior



Fonte: elaboração própria

Figura 58 – Corte central com carregamento excêntrico, com sua respectiva configuração de falha: a) condição RO-RO; b) condição EN-RO

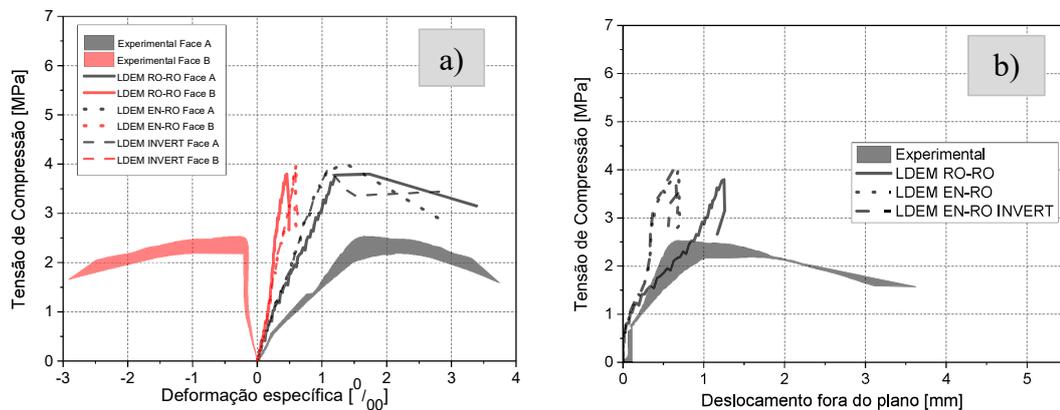


Fonte: elaboração própria

Através da Figura 58, pode-se observar que a configuração de falha mudou quando há uma excentricidade de carregamento, sendo que para as duas condições RO-RO e EN-RO, a fissura inicia no corte e se propaga para a parte superior da parede, enquanto que para os modelos de bloco + argamassa sem excentricidade o modo de falha é diferente entre as condições RO-RO e EN-RO, sendo simétrica para a condição RO-RO e para a condição EN-RO a fissura também inicia no corte e se propaga até o apoio superior da parede, em seguida há concentrações de fissuras na parte inferior da parede. A configuração de falha com a condição EN-RO para o modelo bloco + argamassa sem excentricidade foi mais parecido para o modelo em análise (bloco + argamassa com excentricidade). As tensões de compressão máximas foram de 4,10 MPa e 5,00 MPa, para as condições RO-RO e EN-RO, respectivamente, sendo 30,16% e 58,73% a mais que as tensões experimentais encontradas por Milani (2019), para as condições RO-RO e EN-RO, respectivamente.

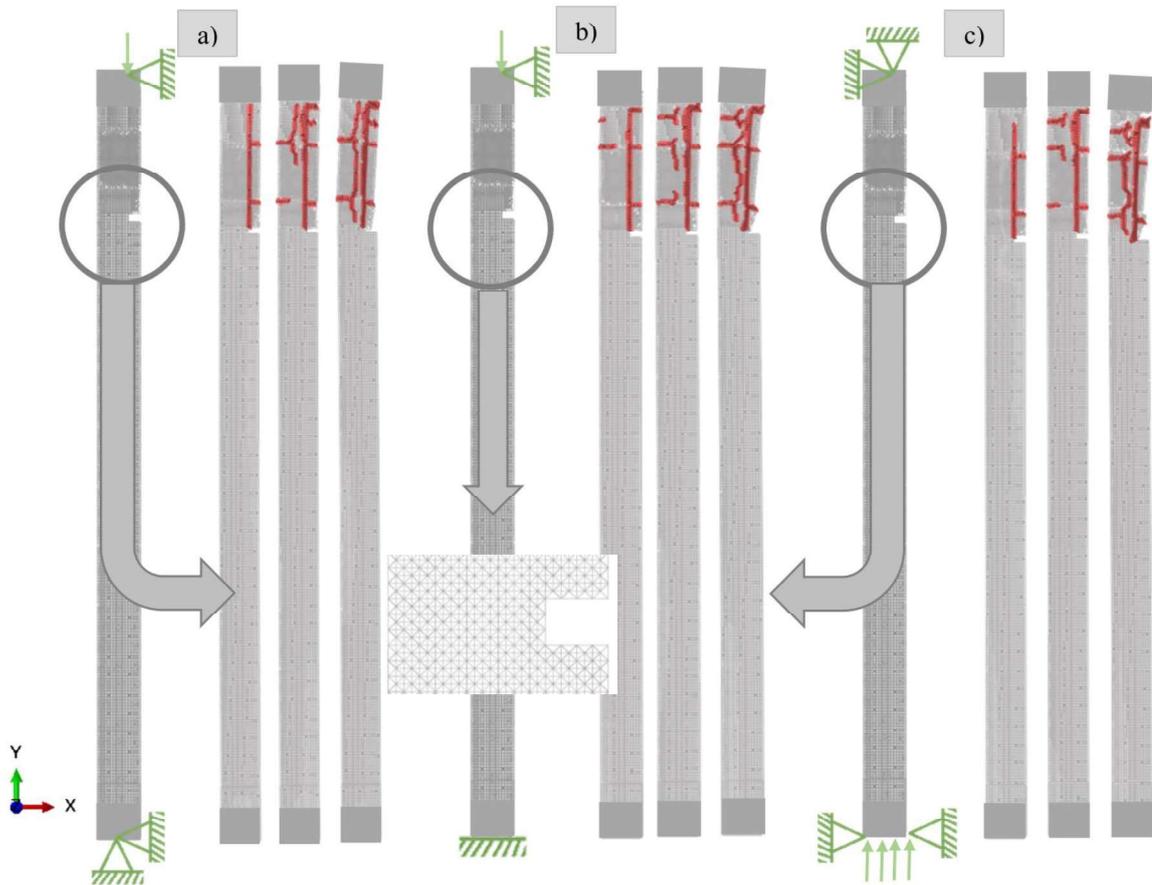
Na Figura 59 estão apresentadas as curvas de tensão de compressão *versus* deformação específica e *versus* deslocamento fora do plano, para as condições, RO-RO, EN-RO e a condição com carregamento invertido para verificar se o local de aplicação de carregamento alterava a configuração de falha e a tensão de compressão máxima. Na Figura 60 estão apresentados os modelos com corte superior e carregamento excêntrico, com suas respectivas configuração de falha.

Figura 59 – Corte superior com carregamento excêntrico 30% de profundidade: a) tensão de compressão *versus* deformação específica; b) tensão de compressão *versus* deslocamento fora do plano



Fonte: elaboração própria

Figura 60 – Modelos com corte superior com carregamento excêntrico e suas respectivas configurações de falha: a) condição RO-RO; b) condição EN-RO; c) deslocamento invertido

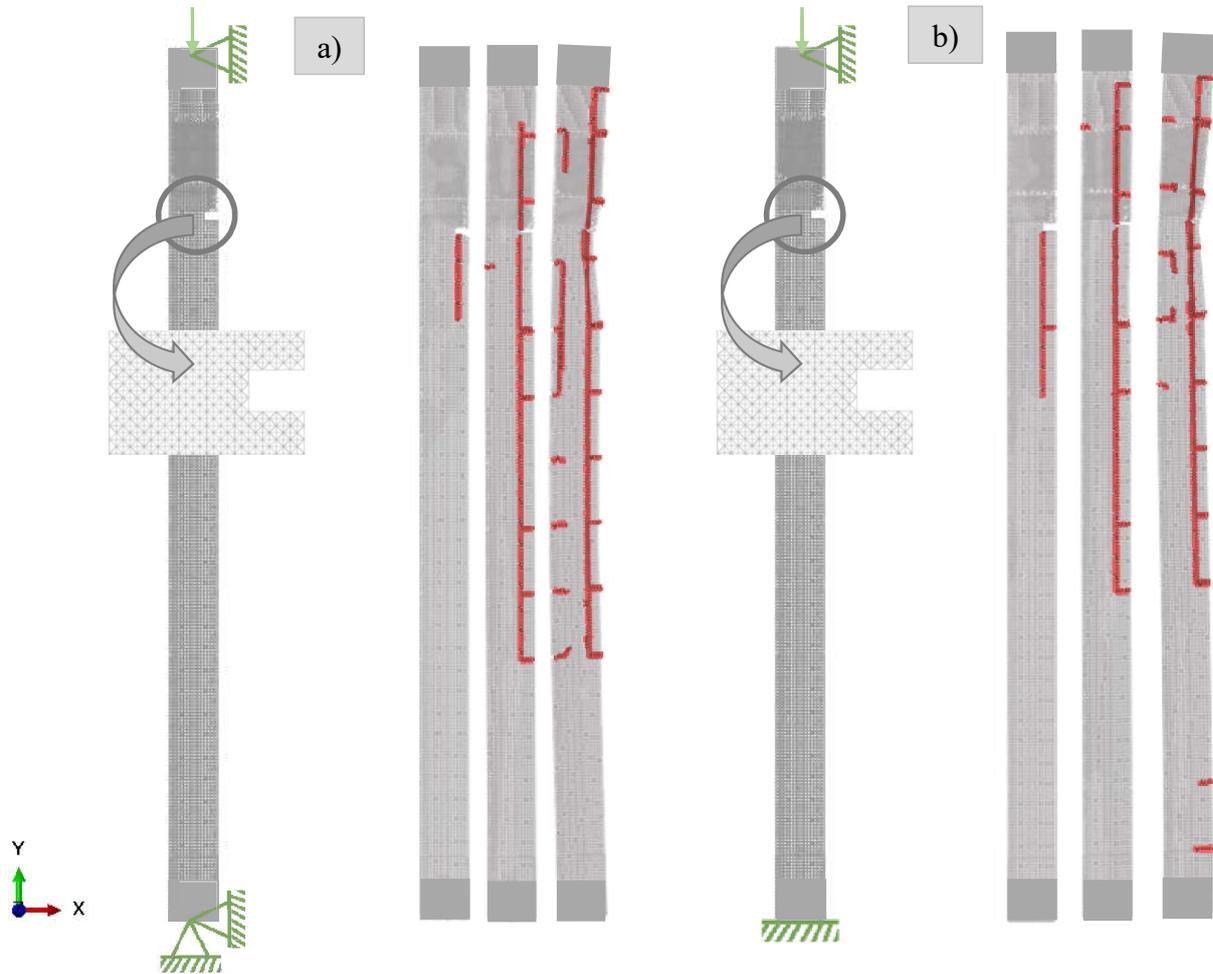


Fonte: elaboração própria

Por meio dos modelos simulados da Figura 60, pode-se observar que a propagação de fissura foi praticamente igual para as 3 condições ensaiadas, a fissura inicia no corte da parede e se propaga para a parte superior da parede. A tensão de compressão máxima também foi bem próxima entre os modelos simulados, sendo de 3,79 MPa para a condição de contorno RO-RO, 4,02 MPa para a condição EN-RO e 3,91 MPa para a condição invertida. Já quando a tensão de compressão máxima é comparada com os resultados experimentais verificou-se que ela foi bem maior, cerca de 60,60% a mais para a condição RO-RO, 70,34% a mais para a condição EN-RO e 65,68% para a condição invertida.

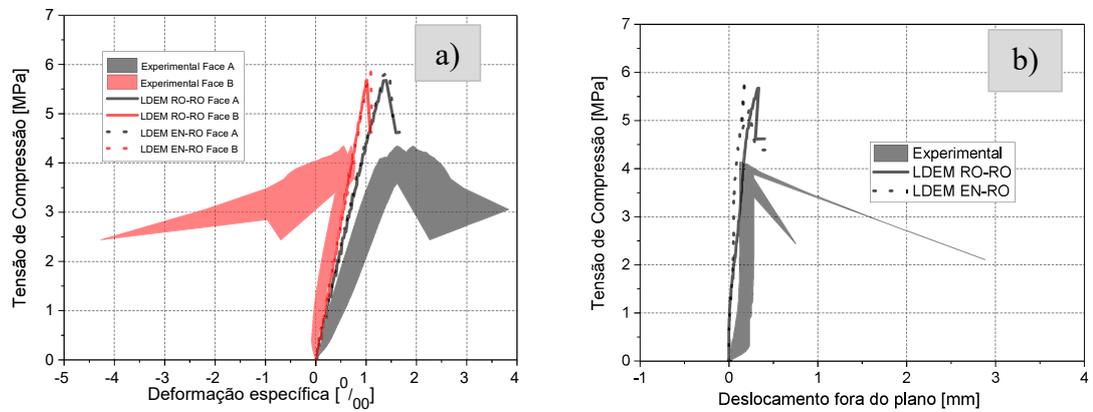
Na Figura 61 estão apresentados os modelos com corte superior e carregamento centrado, com suas respectivas configurações de falha e na Figura 62, os resultados das curvas de tensão de compressão *versus* deformação específica e tensão de compressão *versus* deslocamento fora do plano, para as condições de contorno RO-RO e EN-RO.

Figura 61 – Modelos com corte superior e carregamento centrado com a configuração de falha: a) condição RO-RO; b) condição EN-RO



Fonte: elaboração própria

Figura 62 – Corte superior com carregamento centrado 30% de profundidade: a) tensão de compressão *versus* deformação; b) tensão de compressão *versus* deslocamento fora do plano



Fonte: elaboração própria

Através da Figura 61, pode-se notar que a configuração de falha foi bem parecida para as duas condições de ensaio. Inicia no corte e se propaga para a parte inferior da parede. A tensão de compressão máxima também foi bem parecida, entre os modelos numéricos, foi de 5,68 MPa e 5,87 MPa, para as condições RO-RO e EN-RO, respectivamente, cerca de 37,86% e 42,47% maior quando comparada com os resultados experimentais de Milani (2019).

Na Tabela 17 estão apresentados os resultados da tensão de compressão máxima para os modelos simulados com as diferentes condições de contorno, bem como os resultados encontrados por Milani (2019).

Tabela 17 – Resistência dos modelos simulados

Configuração da parede	Modelos Simulados		Condições		Milani (2019) MPa
			RO-RO MPa	EN-RO MPa	
20% corte e carregamento central	Parede homogeneizada	LDEM	5,40	6,41	4,80
		LDEM + 7FEM	5,19	6,37	
	Parede homogeneizada com Módulo equivalente	LDEM	7,00	8,17	
		LDEM + FEM	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	Bloco + argamassa	LDEM	2,67	3,17	2,58
30% corte central com excentricidade			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

Fonte: elaboração própria

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi possível realizar um modelo simplificado com o método do LDEM, onde o mesmo é capaz de simular o comportamento de paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos, com cortes horizontais. Desta forma, por meio das modelagens numéricas, o objetivo geral deste trabalho foi alcançado. Através desse modelo simples e relativamente com um baixo custo computacional, foi possível representar corretamente o mecanismo de falha das paredes com cortes horizontais. No caso do comportamento de tensão *versus* deformação específica e tensão de compressão *versus* deslocamento fora do plano, o modelo foi capaz de obter as resistências últimas, na mesma ordem de grandeza dos ensaios experimentais. As principais conclusões deste trabalho são descritas a seguir:

- Para eliminar o efeito de concentrações de tensões gerados nos apoios as duas estratégias utilizadas obtiveram resultados muito próximos, ou seja, simulando toda a parede com elementos discretos, reforçando as extremidades, ou, simulando parte da parede com elementos finitos lineares elásticos. Dessa maneira apesar da utilização dos elementos finitos diminuir alguns graus de liberdade no problema, a interface entre os dois métodos diferentes resulta em um maior tempo de análise o que leva a concluir que o modelo integral de LDEM torna-se a melhor opção para realizar as simulações;
- Outra importante conclusão, porém, não positiva, é que quando se tenta simular alguma lei de contato diferente entre as placas de aço (FEM) e a parede (seja ela LDEM ou com reforço com o FEM) o modelo se torna mais demorado e na grande maioria dos casos ocorre erro abortando a simulação por deformações excessivas na região de contato. Desta forma não foi possível simular condições de contorno mais próximas das realizadas no ensaio experimental;
- As condições de contorno experimentais se encontram entre dois limites utilizados nas simulações, o primeiro rotulado-rotulado e o segundo engastado-rotulado. Analisando a configuração de falha para os modelos da parede homogeneizada, verifica-se que a configuração de falha é semelhante para as condições RO-RO e EN-RO, entre os modelos simples e mistos. Visto que para as duas condições de contorno a fissura inicia no corte, porém para a condição RO-RO, ele se propaga de forma igual para cima e para baixo da parede, enquanto que para a condição EN-RO, a fissura se propaga apenas para cima, até

chegar no apoio superior, quando chega no apoio superior ela se propaga para parte inferior da parede, havendo concentrações de fissuras no apoio inferior. Já para os modelos com blocos e argamassa, a propagação de fissura foi bem semelhante entre as condições citadas anteriormente, porém além de ocorrer as fissuras verticais, haviam fissuras horizontais onde estava discretizada a argamassa.

- Através das simulações com a aplicação do deslocamento de cima para baixo ou de baixo para cima, verificou-se que independentemente da forma de aplicação do deslocamento não alterava a configuração de falha e a tensão de compressão máxima.
- Pode-se analisar que quando são simuladas as condições RO-RO e EN-RO com o corte central ou corte superior com o carregamento excêntrico, a fissura inicia no corte e se propaga para a parte superior da parede, independentemente da condição de contorno, ou seja quando há uma excentricidade na parede com corte, ocorrem efeitos de flexão.

Como conclusão geral, tem-se que: os resultados encontrados foram satisfatórios, apesar da diferença considerável entre a tensão máxima de compressão simulada com a tensão máxima de compressão experimental encontrada por Milani (2019), os mecanismos de falha encontrados pelo mesmo, foram corretamente descritos nas simulações, assim como as formas das rupturas e propagações. O objetivo geral do trabalho foi parcialmente atingido, pois o modelo 2D era para ser um modelo simplificado e rápido para se obter bons resultados. Porém as dificuldades encontradas para gerar um modelo 2D que represente corretamente o ensaio experimental não compensaram, sendo recomendável utilizar modelos em 3D, mesmo com um custo computacional maior, eles acabem sendo mais simples de modelar e de analisar os resultados.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Trabalhar com modelos em 3D, cuidando as propriedades dos materiais, que representem corretamente as utilizadas nos ensaios experimentais, ou até mesmo, realizar alguma simulação simples para ajustar os parâmetros destes materiais. Por exemplo realizar simulações de ruptura de compressão axial e diametral dos blocos para representar as propriedades dos blocos.

REFERÊNCIAS

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

_____: **NBR 15961 - 1**: Alvenaria estrutural - Blocos de concreto - Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro, 2011.

_____: **NBR 16868 - 1**: Alvenaria estrutural – Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2020.

_____: **NBR 16868 - 2**: Alvenaria estrutural – Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2020.

_____: **NBR 16868 - 3**: Alvenaria estrutural – Parte 3: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

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

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.

CAPUZZO NETO, V. **Interação de paredes em alvenaria estrutural cerâmica sob ações verticais**. p. 322. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

CEB – European Committe for Concrete. **CEB-FIP MODEL CODE 1990**: Design Code. London, 1993.

CHEEMA, T.S.; KLINGNER, R. E. Compressive strength of a concrete masonry prism. **American Concrete Institute Journal**. January-February, p. 88-97, 1986.

CORRÊA, M. R. S.; SILVA, W. J.; CAMACHO, J. S. Analysis of the vertical load distribution between the structural masonry walls in a small scale model. **In: 10th Australasian Masonry Conference**, Sidney. Proceedings of the 10 AMC, 2018. v. 1. p. 1-12, 2018.

DALGUER, L.A.; IRIKURA, K.; RIERA, J.D.; CHIU, H.C. The importance of the dynamic source effects on strong ground motion during the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake: **Brief interpretation of the damage distribution on buildings**. Bull. Seismol. Soc. Am., v. 91, p. 1112-1127, 2001.

DGFM - DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR MAUERWERKSBAU E.V. **Merkblatt: Schlitz- und Aussparungen**. Zentralverband des Deutschen Baugewerbes, Berlim, 2015.

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. Berlin, 2015.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 1996-1-1:2013-02**: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten - Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes. Berlin, 2013.

DUARTE, R. B. Recomendações para o Projeto e Execução de Edifícios de Alvenaria Estrutural, **ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica**, Porto Alegre, p. 79, 1999.

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

GENIKOMSOU, A. S.; POLAK, M. A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. **Engineering Structures**. 98 p. 38-48, 2015.

GOMES, I. R. **Simulação numérica do ensaio de compressão de prismas de alvenaria pelo método dos elementos finitos com comportamento de interface**. 182 f. Tese - (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

HAACH, V. G.; RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. Numerical study of shear behavior of unreinforced flanged walls. **In: 11th North American Masonry Conference**, 2011, Minneapolis, MN, USA. Proceedings of the 11 NAMC. Boulder, Colorado, USA: The Masonry Society, v. 1, p. 1-10, 2011.

HILLERBORG, A. **A Model for Fracture Analysis**. Cod LUTVDG/TV BM-3005/1-8, 1978.

HOLANDA JR., O. G. **Influência de recalques em edifícios de alvenaria estrutural**. p. 242. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

IZQUIERO, O.S. **Estudo da interface bloco/argamassa em elementos de alvenaria estrutural**. 290 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

JOAQUIM, M. M. **Flexão e Flexo-Compressão em Elementos de Alvenaria Estrutural**. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

KIRTSCHIG, K.; METJE, W.R. **Einfluss von Aussparungen auf die Tragfähigkeit von Mauerwerk**. Relatório de pesquisa: Instituto de teste de clientes e materiais de construção da Universidade de Hanôver, Hanôver, p. 81, 1973.

KOSTESKI, L.E. **Aplicação do Método dos Elementos Discretos formado por barras no estudo do colapso de estruturas**. 177 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pósgraduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

KOSTESKI, L. E.; PINTO, O.; ITURRIOZ, I. Combinação entre o Método dos Elementos Discretos Compostos por Barras e o Método dos Elementos Finitos no Ambiente Abaqus. **Anais...** Em: Asociación Argentina de Mecánica Computacional – Mecánica Computacional Vol XXIX, Buenos Aires, Argentina. p. 5259-5283. 2010.

KOSTESKI, L.; RIERA, J. D.; ITURRIOZ, I.; SINGH, R. K.; KANT, T. Analysis of reinforced concrete plates subjected to impact employing the truss-like discrete element method. **Fatigue Fract Engng Mater Struct** 00, p. 1-13, 2014.

KUPFER, H. B.; GERSTLE, K. H. Behavior of concrete under biaxial stresses. **Journal of Engineering Mechanics**, v.99, p.853-866. 1973.

LIMA, S. M. Z. **Efeito de defeitos construtivos no comportamento e resistência à compressão de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos**. p. 144. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

LOPES, A. C. S.; NASCIMENTO NETO, J. A.; MEDEIROS, K. A. S.; MACIEL, D. N. Three-dimensional modelling of wall-beam interaction in structural masonry buildings. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 13, p. 01-24, 2020.

LOURENÇO, P. B. Dimensionamento de Alvenarias Estruturais. **Relatório 99-DEC/E-7**, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, p. 76, 1999.

LOURENÇO, P. B. **Computational strategies for masonry structures**. PhD thesis. TU Delft, University of Technology, Delft, The Netherlands, 1996.

MAURÍCIO, R. M. **Estudo teórico e experimental das ligações diretas contrafiadas entre paredes de blocos de concreto em escala real e reduzida 1:4**. p. 210. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

MEDEIROS, G.F. **Estudo numérico do comportamento mecânico de paredes de alvenaria estrutural com cortes**. p. 147. Tese – (Doutorado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.

MEDEIROS, G.F.; MILANI, A.S; LÜBECK, A.; MOHAMAD, G.; QUISPE, R.R.; KOSTESKI, L. Numerical analysis of masonry walls with horizontal chases using the Lattice Discrete element method (LDEM). **Engineering Structures**, v. 253, p. 113647, 2022.

MEDEIROS, J. S.; SABBATINI, F. H. Alvenaria Estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto. São Paulo, **EPUSP**, p. 20, 1993.

MEDEIROS, K. A. S. **Modelagem Computacional para avaliação da interação entre painéis de alvenaria e estrutura de suporte em concreto armado**. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

MILANI, A. S. **Influência de cortes no comportamento mecânico de paredes em alvenaria estrutural submetidas à compressão**. p. 285. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.

MILANI, A.S.; LÜBECK, A.; MOHAMAD, G.; BARROS DA SILVA SANTOS NETO, A.; BUDNY, J. Experimental investigation of small-scale clay blocks masonry walls with chases under compression. **Construction and Building Materials**, p. 121539, 2021.

MOHAMAD, G. Construções em alvenaria estrutural: materiais, projeto e desempenho, 2ª edição ampliada e revisada conforme a NBR 16868/2020. São Paulo, **Ed. Blucher**, p. 424, 2020.

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

MOJSILOVIC, N.; NOTZ, S.; WÄFLER, B; YU, J. Load tests on masonry elements with chases. **In: 11th Canadian Masonry Symposium**. Proceedings of 11th Canadian Masonry Symposium, Toronto, 2009.

MSJC - MASONRY STANDARDS JOINT COMMITTEE. **TMS 402-08/ACI 530 -08/ASCE 5-08**: Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures. EUA, 2008.

NAYFEH, A.H.; HEFZY, M.S. Continuum modeling of three-dimensional truss-like space structures. **AIAA Journal**, v. 16(8), p. 779-787, 1978.

NASCIMENTO NETO, J. A. **Estudo de painéis com abertura constituídos por alvenaria estrutural de blocos**. p. 320. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

NASCIMENTO NETO, J. A.; MEDEIROS, K. A. S.; QUIM, F. Projeto de edifícios altos em alvenaria estrutural. **Techne: Revista de Tecnologia da Construção**, São Paulo, v. 1, p. 46-52, 2014.

PARSEKIAN, G. A.; CORREA, M. R. S.; LOPES, G. M.; CAVICHIOILLI, I. Estudo teórico e experimental de paredes esbeltas de alvenaria estrutural. **Revista, Ambiente construído**, São Paulo, v. 16, p. 197-213, 2016.

PELETEIRO, S. C. **Contribuições à modelagem numérica de alvenaria estrutural**. p. 159. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

PRUDÊNCIO, JR. L. R.; OLIVEIRA, A. L.; BEDIN, C. A. Alvenaria estrutural de blocos de concreto. Florianópolis, **Ed. Gráfica Pallotti**, p. 207, 2002.

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.

RIERA, J. D.; MIGUEL, L. F. F.; ITURRIOZ, I. Evaluation of the discrete element method (DEM) and of the experimental evidence on concrete behaviour under static 3D compression. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 39, n. 11, p. 1366-1378, 2016.

RIERA, J. D.; ROCHA, M. M. A note on velocity of crack propagation in tensile fracture. **Revista Brasileira de Ciências Mecânicas**, v. XII/3, p. 217-240, 1991.

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

ROMAN, H. R.; ARAÚJO, H. N.; MUTTI, C. N. Construindo em alvenaria estrutural. 1ª edição. Florianópolis, **Ed. Da UFSC**, p. 83, 1999.

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, C. F. R. **Avaliação numérica da interação de paredes de alvenaria estrutural submetidas a ações verticais**. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2016.

SOARES, F. S.; ITURRIOZ, I. Simulação da propagação subcrítica de fissuras em materiais quase frágeis aplicando uma versão do método de elementos discretos formados por barras. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, p. 153-162, 2015.

SAYED-AHMED, E. Y.; SHRIVE, N. G. Nonlinear finite-element model of hollow masonry. **Journal of Structural Engineering**, v. 122, n. 6, p. 683-690, 1996.

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

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

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

WORSPRESS, 2015. **Civilização Engenheira, Alvenaria estrutural**, Blog. Disponível em: <<https://civilizacaoengenheira.wordpress.com/2015/10/07/alvenaria-estrutural-uma-solucao-economica>> Acessado em: 17 de junho de 2021, 16:04.

ZYDECK, R.C.; AZZOLIN, K.C.; MILANI, A.S.; LÜBECK, A.; MOHAMAD, G.; KOSTESKI, L.E. Masonry walls with horizontal chases: a numerical analysis using the lattice discrete element method. In: **CP2021-The 7th International Conference on Crack Paths, Parma**. Preceding of CP2021, 2021.