



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



LUCAS FERREIRA GALVÃO

CONTRIBUIÇÕES À ANÁLISE NUMÉRICA DE EDIFÍCIOS COM ALVENARIAS PARTICIPANTES

Uberlândia, 2022

LUCAS FERREIRA GALVÃO

**CONTRIBUIÇÕES À ANÁLISE NUMÉRICA DE EDIFÍCIOS
COM ALVENARIAS PARTICIPANTES**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas e Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Gerson Moacyr Sisniegas Alva.

Uberlândia, 2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

G182 2022	Galvão, Lucas Ferreira, 1995- Contribuições à análise numérica de edifícios com alvenarias participantes [recurso eletrônico] / Lucas Ferreira Galvão. - 2022. Orientador: Gerson Moacyr Sisniegas Alva. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Civil. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.150 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações. 1. Engenharia civil. I. Alva, Gerson Moacyr Sisniegas, 1975-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Civil. III. Título. CDU: 624
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y - Bairro Santa Monica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: 34 3239-4137 - www.feciv.ufu.br/ppgec - posgradcivil@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 276, PPGECC				
Data:	25 de fevereiro de 2022	Hora de início:	09:15 h	Hora de encerramento:	11:45 h
Matrícula do Discente:	12012ECV007				
Nome do Discente:	Lucas Ferreira Galvão				
Título do Trabalho:	Contribuições à análise numérica de edifícios com alvenarias participantes				
Área de concentração:	Estruturas e Construção Civil				
Linha de pesquisa:	Estruturas				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Interação alvenaria-estrutura e deformabilidade de ligações na análise estrutural de edifícios				

Reuniu-se, em sessão pública pela plataforma *ConferênciaWeb* provida pela Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: João Kaminski Junior – UFSM, Maria Cristina Vidigal de Lima – UFU e Gerson Moacyr Sisniegas Alva– UFU orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Gerson Moacyr Sisniegas Alva, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Gerson Moacyr Sisniegas Alva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 25/02/2022, às 15:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Cristina Vidigal de Lima, Professor(a) do Magistério Superior**, em 25/02/2022, às 16:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Documento assinado eletronicamente por **João Kaminski Junior, Usuário Externo**, em 02/03/2022,



às 08:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3314582** e o código CRC **2B37B7F3**.

Referência: Processo nº 23117.003040/2022-15

SEI nº 3314582

RESUMO

A contribuição das paredes de alvenaria para o aumento da rigidez de pórticos preenchidos submetidos a ações horizontais tem sido verificada ao longo das últimas décadas por diversos autores ao redor do mundo. Entretanto, apesar de conhecidos os benefícios da associação de pórticos com alvenarias, esse sistema estrutural ainda é pouco utilizado de forma prática, devido à complexidade do comportamento de pórticos preenchidos e a falta de modelos analíticos que forneçam resultados precisos e sejam de fácil aplicação. Nesse contexto, o presente trabalho possui como objetivo contribuir para o desenvolvimento de análises numéricas de edifícios com alvenarias participantes, apresentando a influência da consideração da alvenaria como material de comportamento ortotrópico e propondo um procedimento para a elaboração de modelos com múltiplas diagonais equivalentes para a consideração das alvenarias participantes. Foram simulados diversos pórticos de concreto armado preenchidos com alvenarias participantes, submetidos a ações horizontais, modelados com o emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF) e com Modelos de Diagonal Equivalente (MDE). Com relação à ortotropia, verificou-se que a consideração da alvenaria como material de comportamento ortotrópico pode impactar de maneira significativa nos resultados dos modelos numéricos. Já a respeito dos modelos de múltiplas diagonais desenvolvidos neste trabalho, esses consistem em modelos com duas e três diagonais equivalentes, em que as excentricidades das diagonais são calculadas em função da largura da diagonal equivalente do MDE clássico. Foram investigadas a influência da consideração das expressões de Mainstone (1974), Durrani e Luo (1994) e do procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) para o cálculo da largura equivalente, e também a influência da rigidez das alvenarias na qualidade dos resultados fornecidos pelos modelos desenvolvidos, comparando com resultados de referência obtidos com o MEF. Concluiu-se que, para os pórticos preenchidos analisados, os modelos com múltiplas diagonais forneceram resultados mais satisfatórios que o modelo clássico na obtenção de deslocamentos horizontais e esforços dos elementos do pórtico. Notou-se também que a rigidez da alvenaria participante influenciou nos resultados, visto que os modelos desenvolvidos forneceram valores mais próximos aos de referência para alvenarias com menor rigidez.

Palavras-chave: Alvenaria participante – Pórticos preenchidos – Modelo de Diagonais Equivalentes – Método dos Elementos Finitos – Análise estrutural

ABSTRACT

The contribution of masonry walls to increase the stiffness of infilled frames under lateral loading has been verified over the last decades by several authors around the world. However, despite the known benefits of the interaction between the infill masonry and the surrounding frame, this structural system is still barely applied in a practical way, due to the complexity of the behavior of infilled frames and the lack of analytical models that possess the necessary simplicity and the required accuracy to be used in everyday engineering practice. In this context, the present work aims to contribute to the development of numerical analysis of buildings with participating masonry, presenting the influence of considering masonry as a material with orthotropic behavior and proposing a procedure for the elaboration of equivalent multi-strut models for the consideration of participating masonry. Several reinforced concrete frames infilled with participating masonry were simulated, under lateral loads, modeled using the Finite Element Method (FEM) and Equivalent Strut Models (ESM). In relation to masonry orthotropy, it was found that the consideration of masonry as a material with orthotropic behavior can significantly impact the results of numerical models. Regarding the multi-strut models developed in this work, these consist in models with two and three equivalent struts, in which the eccentricities of the struts are calculated from the equivalent strut width of the classic single-strut model. The influence of the consideration of Mainstone (1974) and Durrani and Luo (1994) expressions and the procedure of the Brazilian code ABNT NBR 16868-1 (2020) for the calculation of the equivalent width were investigated, as well as the influence of the stiffness of the masonry on the quality of the results provided by the developed models, comparing with reference results obtained with the FEM. It was concluded that, for the infilled frames analyzed, the multi-strut models provided more satisfactory results than the classic single-strut model for the obtainment of lateral displacements and internal forces in the frame elements. Also notable that the stiffness of the participating masonry influenced the results, since the developed models provided closer values to the reference for masonry with lower stiffness.

Keywords: Participating masonry – Infilled frames – Equivalent Struts Model – Finite Element Method – Structural analysis

LISTA DE SÍMBOLOS

b_p	- largura da seção transversal do pilar (direção perpendicular ao plano do pórtico)
b_v	- largura da seção transversal da viga (direção perpendicular ao plano do pórtico)
D	- comprimento da diagonal da parede
E_a	- módulo de elasticidade da parede de alvenaria
E_c	- módulo de elasticidade do concreto
E_d	- módulo de elasticidade da alvenaria na direção diagonal
E_p	- módulo de elasticidade do pilar
E_v	- módulo de elasticidade da viga
E_x	- módulo de elasticidade da alvenaria na direção paralela às juntas horizontais
E_y	- módulo de elasticidade da alvenaria na direção paralela às juntas verticais
e_H	- excentricidade da diagonal na direção do pilar
e_L	- excentricidade da diagonal na direção da viga
F	- força horizontal aplicada nos modelos de pórticos isolados
F_d	- valor de cálculo das ações para combinação última
F_{gk}	- ações permanentes diretas
F_{q1k}	- ação variável direta principal
F_{qjk}	- ações variáveis diretas
f_a	- resistência média a compressão da argamassa
f_{bk}	- resistência característica de compressão simples do bloco
f_{pk}	- resistência característica de compressão simples do prisma
f_{vk}	- resistência característica ao cisalhamento
$f_{v,max}$	- máxima tensão resistente de cisalhamento
G	- módulo de elasticidade transversal
H	- distância entre os eixos das vigas (distância entre andares)
h	- altura da parede
h_p	- altura da seção transversal do pilar (direção paralela ao plano do pórtico)
h_v	- altura da seção transversal da viga (direção paralela do plano do pórtico)
I_p	- momento de inércia do pilar no plano do pórtico em torno do eixo de flexão
I_v	- momento de inércia da viga no plano do pórtico em torno do eixo de flexão
K_{eff}	- rigidez efetiva da diagonal equivalente
L	- comprimento da viga entre os eixos dos pilares (vão teórico da viga)
l	- comprimento da parede

l_s	- comprimento de projeto da diagonal equivalente
M	- momento fletor
M_A	- máximo valor absoluto de momento fletor solicitante no pilar
M_{sd}	- momento fletor solicitante de cálculo
t	- espessura da parede
t_e	- espessura efetiva da parede
t_{ap}	- espessura efetiva da alvenaria participante
V	- força cortante
$V_{sd,max}$	- máxima força cortante solicitante de cálculo
w	- largura da diagonal equivalente
w_{eff}	- largura efetiva da diagonal equivalente
$\alpha_{ef,H}$	- comprimento de contato efetivo entre o pilar e a parede
$\alpha_{ef,L}$	- comprimento de contato efetivo entre a viga e a parede
α_H	- comprimento de contato entre o pilar e a parede
α_L	- comprimento de contato entre a viga e a parede
β	- coeficiente proposto para consideração da rigidez efetiva da diagonal equivalente
γ_g	- coeficiente de ponderação para as ações permanentes
γ_q	- coeficiente de ponderação para as ações variáveis diretas
γ_z	- coeficiente de avaliação da estabilidade global e efeitos de segunda ordem
θ	- ângulo de inclinação diagonal em relação à horizontal
λ_H	- parâmetro adimensional que expressa a rigidez relativa do pilar com a parede
λ_p	- parâmetro de rigidez relativa do pilar com a parede
λ_v	- parâmetro de rigidez relativa da viga com a parede
μ	- coeficiente de atrito entre a parede e o pórtico
ν	- coeficiente de Poisson
σ	- pressão de contato entre a parede e o pórtico
σ_x	- tensão normal na direção x
σ_y	- tensão normal na direção y
τ	- tensão de cisalhamento mobilizada
τ_{xy}	- tensão cisalhante no plano xy
τ_0	- coesão
ϕ_{st}	- fator de redução de rigidez da diagonal equivalente
ψ_{0j}	- fator de redução de combinação para ações variáveis diretas
ψ_1	- fator de redução de combinação frequente para ELS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1D	- Modelo de Diagonal Equivalente clássico com uma diagonal
2D	- Modelo de Diagonal Equivalente com duas diagonais
3D	- Modelo de Diagonal Equivalente com três diagonais
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AP	- Alvenaria Participante
CSA	- <i>Canadian Standards Associatin</i>
DE	- Diagonal Equivalente
DL	- Expressão de Durrani e Luo (1994)
ELS	- Estado Limite de Serviço
ELU	- Estado Limite Último
FEMA	- <i>Federal Emergency Management Agency</i>
FKN	- Fator de rigidez normal de contato
FTOLN	- Fator de tolerância à penetração
MA	- Expressão de Mainstone (1974)
MDE	- Modelo de Diagonal Equivalente
MEF	- Método dos Elementos Finitos
NBR	- Norma Brasileira
NZS	- <i>New Zealand Standards</i>
TMS	- <i>The Masonry Society</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS.....	14
1.1.1	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>14</i>
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	<i>15</i>
1.2	JUSTIFICATIVA.....	15
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	PÓRTICOS PREENCHIDOS SUBMETIDOS A AÇÕES HORIZONTAIS.....	17
2.1.1	<i>Investigações experimentais iniciais.....</i>	<i>18</i>
2.1.2	<i>Comportamento estrutural e modos de ruptura.....</i>	<i>20</i>
2.1.3	<i>Pesquisas internacionais sobre pórticos preenchidos</i>	<i>23</i>
2.1.4	<i>Pesquisas nacionais sobre pórticos preenchidos.....</i>	<i>26</i>
2.2	MODELOS DE DIAGONAIS EQUIVALENTES.....	29
2.2.1	<i>Modificações do MDE clássico.....</i>	<i>35</i>
2.3	RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS INTERNACIONAIS	37
2.3.1	<i>Norma americana FEMA 306 (1998)</i>	<i>37</i>
2.3.2	<i>Norma canadense CSA S304 (2014)</i>	<i>38</i>
2.3.3	<i>Norma americana TMS 402/602 (2016)</i>	<i>40</i>
2.3.4	<i>Norma neozelandesa NZS 4230 (2004).....</i>	<i>41</i>
2.4	RECOMENDAÇÕES ABNT NBR 16868-1 (2020)	41
3	MODELAGEM NUMÉRICA GERAL.....	44
3.1	PARÂMETROS GERAIS	44
3.2	MODELOS MEF DE PÓRTICOS PREENCHIDOS	48
3.2.1	<i>Modelagem do contato na interface pórtico-alvenaria.....</i>	<i>50</i>
3.2.2	<i>Resultados analisados nos modelos MEF.....</i>	<i>53</i>
3.3	MODELOS MDE DE PÓRTICOS PREENCHIDOS	56
3.3.1	<i>Consideração da rigidez efetiva da diagonal equivalente.....</i>	<i>58</i>
4	MODELAGEM DE PÓRTICOS PREENCHIDOS: EFEITO DA ORTROTOPIA DA PAREDE	60
4.1	MODELOS ANALISADOS	62
4.1.1	<i>Modelos MEF.....</i>	<i>63</i>

4.1.2	<i>Modelos MDE</i>	64
4.2	RESULTADOS	66
5	MODELAGEM DE PÓRTICOS PREENCHIDOS: MÚLTIPLAS DIAGONAIS EQUIVALENTES	71
5.1	MODELOS PRELIMINARES	76
5.1.1	<i>Resultados</i>	79
5.2	MODELOS DEFINITIVOS	91
5.2.1	<i>Deslocamento horizontal</i>	94
5.2.2	<i>Força cortante no pilar</i>	96
5.2.3	<i>Momentos fletores no pilar</i>	99
5.2.4	<i>Momento fletor negativo na viga</i>	102
5.2.5	<i>Tensões de compressão na alvenaria</i>	104
5.3	CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DOS MODELOS ANALISADOS	108
6	ANÁLISE DE EDIFÍCIO DE MÚLTIPLOS ANDARES	111
6.1	MODELOS NUMÉRICOS	113
6.2	RESULTADOS	116
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	126
	REFERÊNCIAS	130
	APÊNDICE A – DIAGRAMAS DE FORÇA CORTANTE E MOMENTO FLETOR NOS ELEMENTOS DO PÓRTICO DOS MODELOS PRELIMINARES	135
	APÊNDICE B – RESULTADOS DOS MODELOS DEFINITIVOS	148

1 INTRODUÇÃO

Em estruturas convencionais formadas por pórticos, de concreto armado ou de aço, as paredes de alvenaria são amplamente utilizadas como elementos de vedação, ou seja, com a função de preencher e vedar os espaços entre vigas e pilares da estrutura, protegendo o interior da edificação contra intempéries e dividindo os espaços internos do edifício (ARAÚJO, 2014). Na grande maioria dos casos, essas alvenarias são consideradas nas análises estruturais somente como cargas verticais nos elementos sobre os quais estão apoiadas, sendo desconsiderada qualquer influência de sua rigidez no comportamento global da estrutura.

Além de se obter um modelo mais simples para a análise estrutural, pode-se imaginar que desconsiderar a interação entre os pórticos e as paredes de alvenaria seja um procedimento que leve a resultados mais conservadores, a favor da segurança. Entretanto, de acordo com Parsekian, Hamid e Drysdale (2013), existem pelo menos duas justificativas para mostrar que essa prática não é adequada. A primeira é que, em edifícios mais altos, as paredes podem contribuir de maneira significativa para a rigidez global da estrutura frente às ações horizontais (por exemplo, ações de vento e de sismos). Dessa forma, desprezar essa contribuição pode resultar em estruturas não eficientes. A segunda justificativa é que a existência de paredes em determinadas posições da edificação pode aumentar consideravelmente a rigidez dessa parte da estrutura, alterando a distribuição de esforços. Assim, determinados elementos estruturais ligados a alvenaria podem estar submetidos a esforços maiores do que os obtidos no modelo estrutural em que se despreza a alvenaria como elemento resistente. Além disso, uma disposição não simétrica das paredes, em planta, pode causar momentos de torção e também alterar a distribuição de esforços na estrutura.

Quando as paredes de alvenaria são construídas com a finalidade de interagir com os elementos do pórtico de forma a contribuir na rigidez global da estrutura, tem-se o sistema estrutural denominado de pórtico preenchido. Diversas pesquisas, especialmente no âmbito internacional, vêm sendo desenvolvidas ao longo das últimas décadas a respeito desse sistema, sendo evidenciado que a interação pórtico-alvenaria contribui de maneira significativa para o aumento da rigidez da estrutura frente a ações horizontais. No cenário nacional, o número de pesquisas sobre o tema ainda é reduzido em relação às pesquisas internacionais, mas vem ganhando destaque em estudos recentes, em especial nas últimas duas décadas.

Acompanhando o crescente desenvolvimento do tema no Brasil, em agosto de 2020 foi publicada a norma ABNT NBR 16868-1 (2020), que atualizou e unificou as normas de alvenaria estrutural do país, além de apresentar, em seu Anexo D, uma proposta para a consideração das paredes de alvenaria como parte do sistema de contraventamento de estruturas, denominadas alvenarias participantes.

Assim como outros códigos normativos internacionais, a recém-publicada norma brasileira recomenda o Modelo de Diagonal Equivalente (MDE) clássico para a consideração das alvenarias participantes como elementos resistentes no sistema estrutural. Esse modelo, que consiste em simular a alvenaria mediante a uma barra birrotulada definida nos pontos de encontro viga-pilar, denominada diagonal equivalente, é o mais empregado no meio técnico, devido, principalmente, à praticidade de sua aplicação.

Entretanto, apesar de conhecidos os benefícios da consideração de pórticos preenchidos com alvenaria e da existência de códigos normativos que abordam o tema, a aplicação prática desse sistema estrutural ainda é bastante limitada. Além de ser um sistema complexo, que envolve a interação entre elementos com propriedades e comportamentos diferentes, os métodos analíticos e procedimentos de cálculo disponíveis atualmente ainda não conseguem representar de maneira prática e eficiente o comportamento dos pórticos preenchidos, fatos que contribuem para que incertezas ainda perdurem sobre o assunto.

Nesse contexto, conforme será abordado durante este trabalho, pesquisas disponíveis na literatura especializada já destacaram que o MDE clássico (com apenas uma diagonal) não fornece resultados satisfatórios com relação aos efeitos locais nos elementos do pórtico que estão em contato com a alvenaria, especialmente se tratando de esforços internos atuantes nos pilares e nas vigas. Assim, modelos com múltiplas diagonais equivalentes já foram propostos por diferentes autores, com o intuito de fornecer resultados mais precisos para esses elementos.

Dessa forma, percebe-se que ainda são necessárias pesquisas para auxiliar no desenvolvimento do tema e difundir a utilização de pórticos preenchidos em projetos estruturais. Nesse cenário, estudos numéricos com o emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF), por exemplo, são de grande importância, uma vez que é possível simular modelos com um nível de resposta mais próximo a realidade, principalmente se comparado ao MDE, o que auxilia no entendimento do comportamento do sistema de pórticos preenchidos.

Um ponto importante a ser destacado sobre os modelos numéricos de pórticos preenchidos é com relação à modelagem da alvenaria. A alvenaria é um material que apresenta propriedades anisotrópicas e heterogêneas, o que torna seu comportamento complexo e dificulta a definição das propriedades mecânicas a serem adotadas para os modelos numéricos. Assim, é possível encontrar estudos que analisam os efeitos de considerar a alvenaria como material de comportamento isotrópico (de forma mais simplificada) ou ortotrópico (aproximação para a consideração da anisotropia da alvenaria).

Diante do que foi exposto, o propósito deste trabalho é contribuir para o desenvolvimento de estudos relacionados a pórticos preenchidos com alvenarias participantes, analisando, primeiramente, a influência da consideração da ortotropia da alvenaria em modelos numéricos e, em seguida, apresentando modelos com múltiplas diagonais equivalentes. Nesses modelos foi proposto um procedimento para a definição das excentricidades das diagonais, em função da largura da diagonal equivalente do MDE clássico. Outra contribuição deste trabalho é a proposição de um coeficiente, para consideração da rigidez efetiva da diagonal, a ser incluído nas propriedades das diagonais modeladas em programas computacionais de análise estrutural de pórticos, afim de atender às recomendações da ABNT NBR 16868-1 (2020). Nesse sentido, diversos modelos numéricos foram simulados, analisando as influências do método de cálculo empregado para determinação da largura da diagonal equivalente e da rigidez das alvenarias na qualidade dos resultados fornecidos pelos modelos com múltiplas diagonais, tendo como referência os valores obtidos com o MEF.

1.1 OBJETIVOS

A seguir estão expostos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral consiste em apresentar a influência da consideração da alvenaria como material ortotrópico em modelos numéricos de pórticos preenchidos, além de propor ajustes em modelos com múltiplas diagonais equivalentes para a consideração das alvenarias participantes em edifícios.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos consistem em:

- Apresentar procedimentos para a elaboração de modelos numéricos de pórticos preenchidos com o emprego do MEF (incluindo a modelagem do problema de contato) e com o MDE clássico, incluindo a proposta de um coeficiente para consideração da rigidez efetiva da diagonal equivalente indicada pela ABNT NBR 16868-1 (2020);
- Apresentar estudos relacionados à consideração da ortotropia da alvenaria em pórticos preenchidos e avaliar a diferença de resultados entre modelos numéricos com a consideração da alvenaria como material isotrópico e como material ortotrópico;
- Propor um procedimento para a definição das excentricidades das diagonais, em modelos compostos por duas e três diagonais equivalentes, em função da largura da diagonal equivalente do MDE clássico;
- Avaliar o comportamento dos modelos desenvolvidos com duas e três diagonais, empregando-se as expressões de Mainstone (1974), Durrani e Luo (1994) e o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) para o cálculo das propriedades das diagonais equivalentes, comparando com resultados obtidos em modelos MEF (modelos de referência) e MDE clássico;
- Avaliar o comportamento do MDE clássico e de modelos com duas e três diagonais em um pórtico preenchido de 12 andares.

1.2 JUSTIFICATIVA

Apesar de ser comumente reconhecido que as paredes de alvenaria contribuem de maneira significativa para o aumento da rigidez de pórticos frente a ações horizontais, característica que torna os pórticos preenchidos um eficiente sistema de contraventamento para uma estrutura, sua aplicação em projetos ainda é pouco difundida.

Por mais que já possam ser encontrados diferentes códigos normativos relacionados ao assunto, ainda existem incertezas que perduram sobre o tema, dificultando sua aplicabilidade. Além de fatores como propriedades dos materiais, tipos de carregamentos, presença de aberturas nas paredes e detalhes construtivos do conjunto, que contribuem para um comportamento complexo

do sistema (GRANDI, 2018), a falta de um modelo analítico que consiga entregar resultados precisos, tanto em termos globais (com relação ao comportamento global da estrutura) quanto locais (relacionados aos elementos que compõe o pórtico e a alvenaria), e que seja de aplicação simples e prática, são razões que tornam a consideração de pórticos preenchidos bastante limitada nos dias de hoje.

Dessa forma, ainda são necessários estudos para uma melhor compreensão do comportamento desse sistema e para o desenvolvimento de modelos analíticos que possam ser aplicados de forma cotidiana em projetos estruturais.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é constituído de sete capítulos, organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1: apresentação do tema, dos objetivos e da justificativa do trabalho;
- Capítulo 2: revisão bibliográfica, apresentando pesquisas já realizadas e códigos normativos relacionadas ao tema;
- Capítulo 3: descrição dos procedimentos adotados para a elaboração dos modelos numéricos com o emprego do MEF e do MDE clássico;
- Capítulo 4: estudos relacionados ao efeito da consideração da ortotropia da alvenaria;
- Capítulo 5: apresentação dos modelos analíticos com duas e três diagonais equivalentes desenvolvidos neste trabalho, e avaliação dos resultados obtidos comparando com modelos MEF e MDE clássico;
- Capítulo 6: análise do comportamento do MDE clássico e dos modelos com duas e três diagonais em um pórtico preenchido de 12 andares;
- Capítulo 7: principais considerações do trabalho e sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta o estudo da literatura relevante para o trabalho, expondo o estado da arte relacionado ao tema. Estão incluídos os estudos iniciais que foram desenvolvidos a respeito de pórticos preenchidos, a definição dos Modelos de Diagonais Equivalentes (MDE), considerações obtidas por trabalhos nacionais e internacionais, além de recomendações de diferentes códigos normativos a respeito do assunto.

2.1 PÓRTICOS PREENCHIDOS SUBMETIDOS A AÇÕES HORIZONTAIS

De acordo com Alvarenga (2002), um fato que contribuiu para o desenvolvimento do estudo de paredes de alvenaria como elementos resistentes em pórticos submetidos a ações horizontais, ocorreu no edifício Empire State, em Nova York, após sua conclusão na década de 1930. Durante uma tempestade com rajadas de vento excedendo a 145 km/h, observou-se o surgimento de fissuras em várias paredes nos pisos 29 e 42, além de fissuras na interface pórtico-parede. Apesar da presença de forte vento, os extensômetros fixos nos pilares não registraram deformações no pórtico antes do início das fissuras nas paredes.

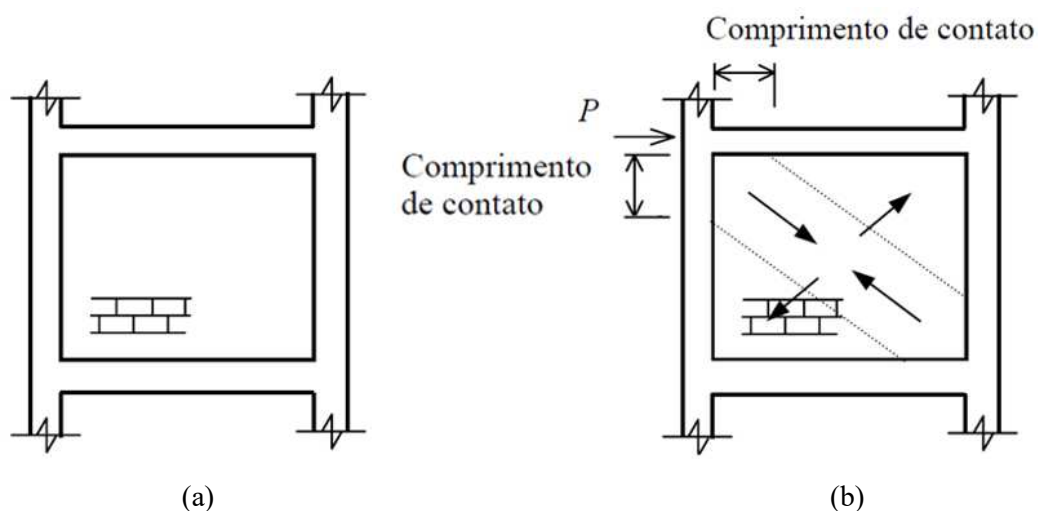
Tal ocorrido foi explicado pela alta rigidez das paredes de alvenaria, que impediu deformações no pórtico de aço. Após as paredes sofrerem solicitações superiores à sua capacidade de fissuração, iniciou-se um processo de perda de rigidez. Dessa forma, os extensômetros começaram a registrar deformações, indicando que o pórtico de aço havia iniciado sua participação na resistência à ação horizontal do vento. Devido à interação entre o pórtico e a parede, o conjunto continuou a resistir vigorosamente as ações horizontais, mesmo na presença de fissuras na parede (RATHBUN, 1938 *apud* ALVARENGA, 2002).

Desde então, diversos pesquisadores ao redor do mundo têm mencionado e pesquisado a respeito dos impactos da associação de pórticos com paredes de alvenaria. A interação entre esses dois elementos propicia uma maior rigidez ao pórtico, que em razão da sua flexibilidade, melhora a ductilidade da parede, reciprocamente. Mesmo depois de fissurada, a parede é capaz de absorver ações horizontais e de se manter solicitada para ações muito superiores que aquelas que seria possível atingir sem a presença do pórtico (DAWE e SEAH, 1989, *apud* GRANDI, 2018).

2.1.1 Investigações experimentais iniciais

Polyakov (1956, *apud* SANTOS, 2019) realizou diversos ensaios entre os anos de 1948 e 1953 com corpos de prova reduzidos de pórticos preenchidos, avaliando as tensões de tração e cisalhantes desenvolvidas. Além disso, o autor conduziu diversos outros experimentos sobre o tema, com ensaios em maior escala, investigando diferentes parâmetros, tais como: efeito do tipo de bloco, traços de argamassa, métodos de aplicação de carregamento (cíclico ou monotônico) e presença ou não de aberturas na parede. Ainda seguindo essa linha de pesquisa, Polyakov (1960, *apud* SANTOS, 2019) trabalhou com modelos de pórticos de aço preenchidos, que continham três vãos e três pavimentos, com cada parede possuindo dimensões de 1200 mm x 1200 mm. A partir desses modelos, o autor propôs uma técnica analítica em que o sistema de pórtico preenchido com parede de alvenaria fosse equivalente a um pórtico em que a alvenaria é substituída por uma barra diagonal equivalente comprimida. Esse modelo estrutural foi denominado Modelo de Diagonal Equivalente (MDE). Posteriormente, o MDE foi refinado por sucessivos trabalhos de Stafford-Smith (1962, 1966, 1967a, 1967b) e Stafford-Smith e Carter (1969), que estabeleceram que as propriedades da barra diagonal equivalente são dependentes do comprimento de contato entre a alvenaria e o pórtico, representado na Figura 1. De acordo com Alvarenga (2002), das técnicas analíticas já propostas nessa área, essa é a mais simples e mais estudada pelos pesquisadores.

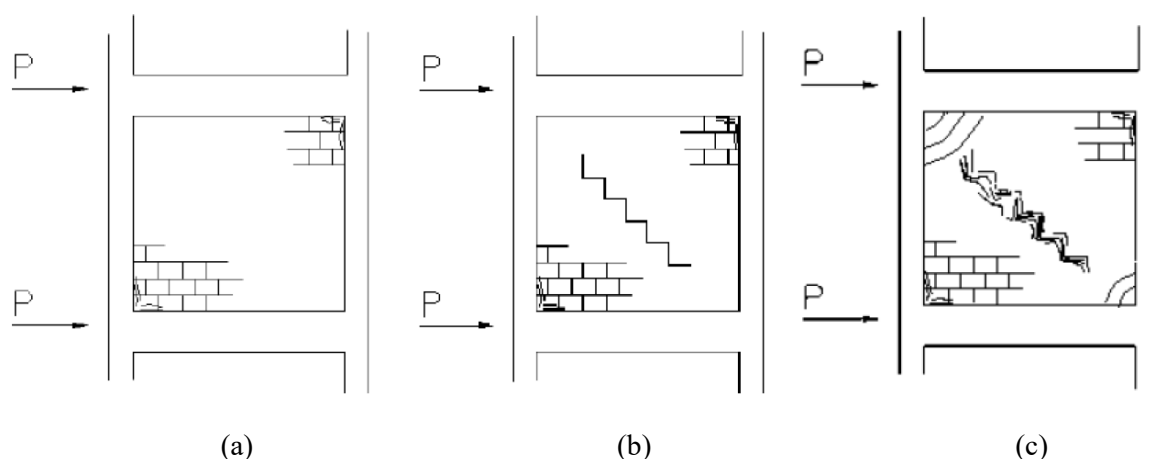
Figura 1 – Modelo de diagonal equivalente: (a) Sistema pórtico-parede; (b) Comprimento de contato das interfaces em um pórtico solicitado por ações horizontais



Fonte: Adaptado de Alvarenga (2002).

Polyakov (1960, *apud* SANTOS, 2007) também descreveu três estágios de comportamento do conjunto pórtico-parede. O primeiro estágio corresponde à fase em que o pórtico e a parede se comportam como uma estrutura monolítica, quando ainda não são observadas fissuras na parede. Tal estágio se encerra no momento em que aparecem as primeiras fissuras na interface pórtico-parede, nos cantos da diagonal tracionada, conforme Figura 2 (a). O segundo estágio se caracteriza pelo encurtamento da diagonal comprimida e o alongamento da diagonal tracionada, ocasionando fissuras escalonadas nas juntas verticais e horizontais, conforme Figura 2 (b). Por fim, o terceiro estágio se verifica quando as fissuras na diagonal comprimida continuam aumentando e o incremento de carregamento chega ao limite, a partir do qual o sistema não possui condições de suportar um acréscimo de forças, quase sempre apresentando fissuras nos cantos comprimidos, que são esmagados, conforme Figura 2 (c).

Figura 2 – Término dos estágios de comportamento dos pórticos preenchidos: (a) 1º estágio; (b) 2º estágio; (c) 3º estágio



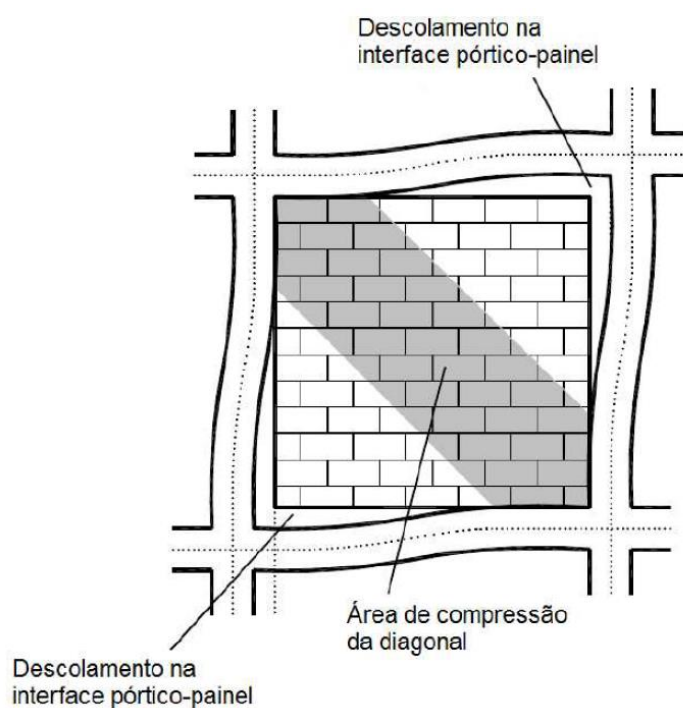
Fonte: Adaptado de Santos (2007).

Grandi (2018) cita outros autores que desenvolveram pesquisas sobre o tema na mesma época dos estudos apresentados: Thomas (1953), Wood (1958) e Benjamin e Williams (1958). Tais autores também realizaram diversos experimentos que comprovaram a contribuição das paredes de alvenaria no enrijecimento e aumento da resistência de pórticos preenchidos sujeitos a carregamentos horizontais.

2.1.2 Comportamento estrutural e modos de ruptura

Os pórticos preenchidos, quando submetidos a carregamentos horizontais moderados, apresentam um desprendimento da parede de alvenaria em relação ao pórtico, devido à diferença de deformação entre ambos, permanecendo em contato somente em um trecho sob compressão em dois cantos diagonalmente opostos da estrutura. Assim, a parede de alvenaria passa a atuar como uma diagonal de treliça comprimida, sendo seu estado de tensão caracterizado por uma tensão de compressão ao longo dessa diagonal e por uma tensão de tração na outra diagonal (ASTERIS *et al.*, 2011a). Tal comportamento está ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Comportamento de pórticos preenchidos submetidos a ações horizontais



Fonte: Adaptado de Asteris *et al.* (2011a).

Com o aumento da solicitação provocada pelas ações horizontais, a ruína pode ocorrer tanto no pórtico, quanto na parede de alvenaria, conforme a capacidade resistente de cada elemento. Quando a parede é suficientemente rígida, a falha se dá por tensão normal ou cisalhante no pilar do pórtico onde atua o carregamento, ou por cisalhamento da viga. Em contrapartida, caso o pórtico tenha resistência suficiente, a ruptura ocorrerá na parede (ASTERIS *et al.*, 2011a).

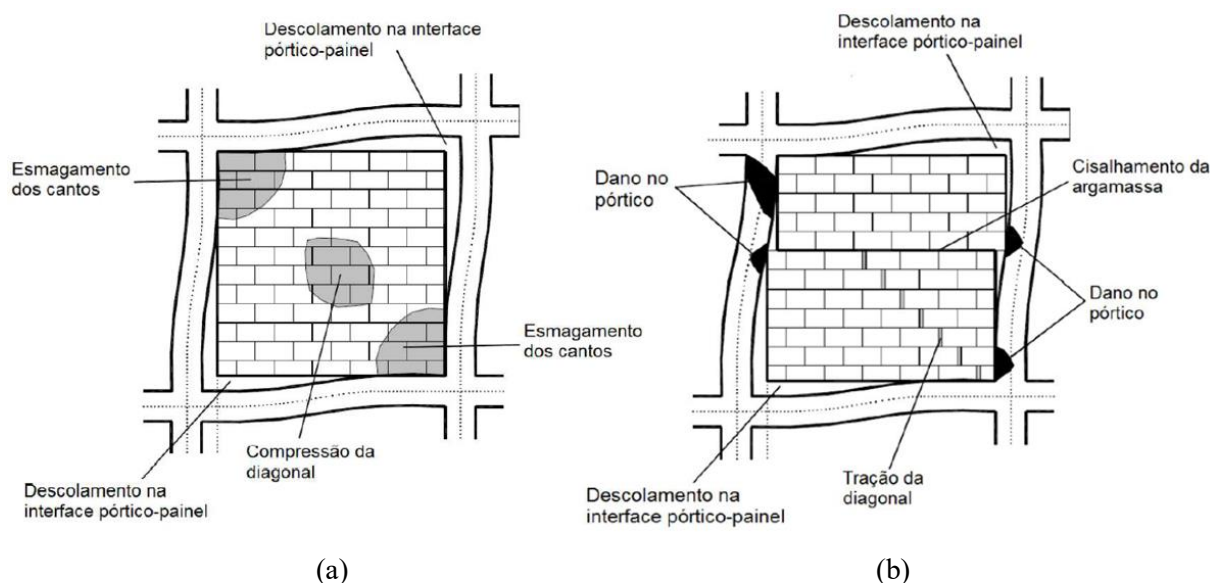
Fundamentados por diversos estudos analíticos e experimentais desenvolvidos ao longo das últimas décadas, Asteris *et al.* (2011a) apresentaram cinco diferentes modos de ruptura de pórticos preenchidos, representados na Figura 4. Ressalta-se que, tais modos de ruptura são válidos apenas para pórticos preenchidos sem aberturas nas paredes. Eles são descritos como:

- Esmagamento dos cantos comprimidos: representa a ruína da parede em pelo menos um dos cantos da diagonal comprimida. Em geral, este modo está relacionado a um sistema composto por uma alvenaria de baixa resistência em conjunto com um pórtico formado por elementos com maior capacidade de carregamento (resistência).
- Compressão da diagonal: caracterizado pelo esmagamento da alvenaria na região central da diagonal comprimida. Está associado a uma parede relativamente esbelta, com sua ruptura ocorrendo fora do plano.
- Cisalhamento por escorregamento das juntas de argamassa: este modo está relacionado a uma parede de alvenaria assentada com argamassa de baixa resistência. Ocorre um escorregamento horizontal entre regiões da parede, devido à falha das juntas de argamassa por cisalhamento.
- Tração da diagonal: é um modo de ruptura visto na forma de fissuras ao longo da diagonal comprimida da alvenaria, geradas por esforços de tração. Ocorrem em situações onde o pórtico é pouco resistente, ou possui ligações fracas entre seus elementos, enquanto a parede de alvenaria é rígida.
- Colapso do pórtico: acontece a formação de rótulas plásticas nos elementos do pórtico, sejam nos pilares ou nas ligações entre pilares e vigas. Este modo de ruptura ocorre em situações semelhantes ao modo de tração da diagonal.

Asteris *et al.* (2011a) destacam que os modos de ruptura por esmagamento dos cantos comprimidos e por cisalhamento das juntas de argamassa apresentam uma maior relevância prática. De acordo com os autores, a ruptura por compressão da diagonal ocorre raramente, pois requer uma elevada esbelteza para que a parede tenha sua ruptura fora do plano; a ruptura por tração da diagonal pode não ser considerada um modo de ruptura, pois mesmo após sua

fissuração a parede ainda pode suportar acréscimos de carregamentos; com relação ao colapso do pórtico, apesar de poder ser aplicável a estruturas de concreto armado, raramente ocorre em pórticos de aço preenchidos.

Figura 4 – Modos de ruptura de pórticos preenchidos: (a) Esmagamento dos cantos comprimidos e compressão da diagonal; (b) Tração da diagonal, cisalhamento da argamassa e danos no pórtico



Fonte: Adaptado de Asteris *et al.* (2011a).

Apesar da existência de diversas pesquisas relacionadas ao tema, Santos (2019) destaca que a modelagem do comportamento de pórticos preenchidos submetidos a ações horizontais é uma tarefa com alto grau de complexidade, pois a resposta observada apresenta um comportamento não linear, devido à interação entre a alvenaria e o pórtico. Nessa interação, diversos parâmetros estão envolvidos, tais como: tipos de blocos (cerâmicos, de concreto, sílico-calcáreos), geometria dos blocos (vazados ou maciços), características mecânicas da argamassa, qualidade da mão de obra e rigidez relativa entre a parede e o pórtico. Dessa forma, mesmo após várias décadas de pesquisa a respeito do tema, o sistema de pórticos preenchidos ainda não possui seu uso disseminado, sendo que ainda existem poucas normas e prescrições que abordam esse sistema. Algumas dessas normas, inclusive a recém-publicada ABNT NBR 16868-1 (2020), serão abordadas mais adiante neste trabalho.

2.1.3 Pesquisas internacionais sobre pórticos preenchidos

A seguir, são mencionadas algumas das inúmeras pesquisas encontradas na bibliografia especializada sobre o comportamento de pórticos preenchidos com alvenarias. Destaca-se que, grande parte dessas pesquisas são dedicadas ao comportamento do sistema estrutural frente às ações de sismos.

El-Dakhakhni, Elgaaly e Hamid (2003) apresentaram um método analítico para estimar a rigidez e a capacidade de carregamento lateral de pórticos de aço preenchidos com blocos de concreto, cujo modo de ruptura se dá por esmagamento dos cantos comprimidos, e também as forças internas dos elementos do pórtico de aço. Nesse método, que foi baseado no Modelo de Diagonal Equivalente (MDE), a parede é considerada no modelo numérico como três barras diagonais, com características mecânicas baseadas no comportamento ortotrópico da alvenaria. Os autores concluíram que o método forneceu resultados com um grau de precisão aceitável, além de ser facilmente aplicável em programas computacionais de análise e dimensionamento de estruturas.

Doudoumis (2007) investigou o comportamento de pórticos preenchidos isolados, com um vão e um andar, submetidos a carregamentos horizontais monotônicos, considerando o comportamento linear dos materiais. Para isso, foram simulados modelos com o emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF), com a consideração das condições de contato entre o pórtico e a alvenaria. O autor analisou a influência de diferentes parâmetros no comportamento do pórtico preenchido, dentre eles: densidade da malha de elementos finitos, razão entre o comprimento e a altura da parede de alvenaria, razão entre os momentos de inércia dos pilares e das vigas, valor do coeficiente de atrito e a ortotropia da alvenaria. Doudoumis (2007) concluiu que todos os parâmetros analisados afetaram consideravelmente o comportamento dos pórticos preenchidos estudados, com exceção da ortotropia da alvenaria.

Crisafulli e Carr (2007) apresentaram um novo modelo para a avaliação do comportamento de pórticos preenchidos, baseado em uma concepção com múltiplas diagonais representando a alvenaria. O modelo proposto considera de maneira separada o comportamento da alvenaria frente à compressão e ao cisalhamento, utilizando duas barras diagonais e uma mola, para esforços de cisalhamento, em cada direção. A comparação dos resultados analíticos com dados

experimentais mostrou que o modelo proposto, com uma calibração adequada, é capaz de representar satisfatoriamente o comportamento dos pórticos preenchidos no plano da parede.

Asteris *et al.* (2011a) determinaram um esquema de classificação dos modos de ruptura de pórticos preenchidos com e sem a presença de aberturas. Para os casos sem aberturas, a classificação foi definida com base em uma revisão da literatura, sendo apresentados cinco modos de ruptura, que foram descritos na seção 2.1.2. Já para o caso com aberturas, foram realizados ensaios experimentais com pórticos isolados de concreto armado preenchidos com blocos cerâmicos, submetidos a carregamentos horizontais cíclicos, sendo identificados e classificados diferentes modos de ruptura. Os autores destacaram que essas classificações melhoram substancialmente a compreensão do comportamento de pórticos preenchidos frente a ações sísmicas, conduzindo a melhores abordagens metodológicas relacionadas à modelagem, análise e projeto desse tipo de sistema estrutural.

Asteris *et al.* (2011b) apresentaram uma revisão geral de diferentes modelos analíticos utilizados para análises de pórticos preenchidos disponíveis na literatura especializada, destacando as vantagens e desvantagens de cada modelo. Os autores evidenciaram que, apesar de já existirem vários estudos relativos a pórticos preenchidos, os modelos disponíveis ainda não possuem a simplicidade necessária e a precisão requerida para serem aplicados de forma cotidiana na prática da engenharia, necessitando ainda novas pesquisas e conclusões a respeito do comportamento desse sistema estrutural.

Chrysostomou e Asteris (2012) também realizaram uma pesquisa com o objetivo de reunir o conhecimento já obtido na época em relação ao comportamento de pórticos preenchidos e os parâmetros que os influenciam. Foram comparados diversos modelos analíticos propostos na literatura, utilizados para determinar as propriedades do sistema e seus modos de ruptura, sendo fundamentados por resultados experimentais, quando disponíveis. Baseados nos estudos realizados, os autores elaboraram recomendações a respeito das propriedades dos materiais, modos de ruptura, rigidez, resistência e capacidade de deformação dos pórticos preenchidos. Além disso, foi proposta uma expressão analítica para o cálculo da largura da diagonal equivalente, originada a partir de modificações da expressão de Mainstone (1974).

Cavaleri *et al.* (2014) efetuaram estudos experimentais para caracterização das propriedades mecânicas de diferentes tipos de alvenaria de preenchimento, com o objetivo de estimar a

resistência, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson desses elementos. Os experimentos confirmaram a possibilidade de se utilizar um modelo ortotrópico para a previsão do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson ao longo da direção diagonal da alvenaria (parâmetros que são necessários na aplicação de modelos analíticos já conhecidos pela literatura que simulam pórticos preenchidos, como o MDE). Os autores destacaram que também foi possível reconhecer a correlação entre o coeficiente de Poisson e a resistência da alvenaria, investigados nos eixos ortotrópicos, e obter o coeficiente de Poisson na direção diagonal sem a necessidade de experimentos específicos.

Yekrangnia e Mohammadi (2017) propuseram um modelo composto por múltiplas diagonais para representar as alvenarias de preenchimento em pórticos de aço. O modelo proposto foi baseado em resultados de análises com o MEF, devidamente calibradas, que fornecem representações realísticas do comportamento de pórticos preenchidos. Foram realizadas comparações do modelo proposto com diferentes outros modelos analíticos dispostos na literatura e os resultados indicaram uma melhora considerável com relação à obtenção dos esforços internos nos elementos do pórtico e também com relação ao diagrama de força-deslocamento do sistema. A eficiência do modelo proposto também foi confirmada por meio de diversos resultados obtidos experimentalmente em pórticos de aço preenchidos com alvenaria.

Foroushani (2019) investigou o comportamento, no plano, de pórticos compostos por alvenaria armada preenchidos com blocos de concreto, por meio de estudos experimentais. Os resultados foram utilizados para avaliar a validade das disposições relacionadas a rigidez e resistência de pórticos preenchidos contidas em dois códigos normativos: a norma canadense CSA S304 (2014) e a norma americana TMS402/602 (2016). O desempenho dos modelos analisados também foi comparado com resultados obtidos de trabalhos anteriores, em que foram estudados pórticos preenchidos com mesma geometria, mas com elementos de concreto armado compondo o pórtico. O autor concluiu que, em geral, a norma canadense superestimou a rigidez do sistema, enquanto a norma americana teve comportamento contrário. Com relação ao cálculo da resistência, a norma canadense apresentou melhores resultados que a norma americana, com valores mais próximos aos obtidos nos experimentos. Além disso, foi possível perceber que, com relação a resistência e ductilidade, o pórtico composto por alvenaria armada se comportou de maneira semelhante ao pórtico de concreto armado (de estudos anteriores), apresentando resultados ligeiramente melhores em alguns casos.

2.1.4 Pesquisas nacionais sobre pórticos preenchidos

No Brasil, apesar do número de estudos relacionados a pórticos preenchidos ainda ser modesto, o tema vem sendo estudado de forma crescente ao longo dos últimos anos. A seguir estão mencionadas algumas das pesquisas desenvolvidas no país.

Alvarenga (2002) apresentou um estudo sobre o comportamento de pórticos preenchidos que envolveu várias abordagens: ensaios experimentais com pórticos de aço, em escala real, preenchidos com blocos de concreto celular autoclavados; modelagem numérica com o emprego do MEF; aplicação do conceito da diagonal equivalente e a realização de um estudo paramétrico. Foram analisados diferentes parâmetros, como a relação altura/comprimento do pórtico, o tipo de elemento de ligação na interface pórtico-parede, o tipo de argamassa de assentamento e a presença de aberturas nas paredes. Em suas conclusões, a autora apresentou uma proposta, que se mostrou prática e eficiente, para a determinação da força de ruptura nas paredes de pórticos preenchidos com alvenaria, utilizando o modelo de bielas e tirantes.

Santos (2007) analisou numericamente um edifício de concreto armado com 32 pavimentos, comparando os resultados obtidos sem e com a consideração do efeito das paredes de alvenaria de vedação no comportamento estrutural do edifício. Os resultados indicaram que a consideração do efeito das paredes, simuladas por meio do MDE, ocasionou um aumento na rigidez lateral da estrutura, com uma redução no deslocamento horizontal no topo do edifício. Além disso, notou-se uma redistribuição dos esforços, com acréscimo nas cargas dos pilares de extremidade e uma leve redução nos pilares centrais.

Silva (2014) realizou análises numéricas de pórticos de concreto armado preenchidos com blocos cerâmicos de vedação submetidos a ações horizontais de Estado de Limite de Serviço (ELS), com o emprego do MEF e do MDE. Foram analisados modelos com variações em diferentes parâmetros, como o vão e a altura das vigas, propriedades da alvenaria, presença ou não de aberturas na parede e, quando presentes, tamanho e posição dessas aberturas. A autora constatou que, apesar do MDE ser um modelo analítico de prática aplicação, as diferentes expressões existentes na literatura forneceram resultados com grandes divergências entre si. Com relação aos modelos em que se utilizou o MEF, foi constatado que, embora apresente resultados que mais se aproximam da realidade, sua aplicação é bem mais complexa.

Medeiros (2018) estudou o comportamento de estruturas formadas por pórticos de concreto pré-moldado preenchidos com paredes de alvenaria, para fim de contraventamento de edificações. Inicialmente, foi realizada uma análise com modelos simulados via MEF, calibrados por meio de resultados experimentais disponíveis na literatura. O modelo numérico apresentou resultados bem próximos aos experimentais e, com isso, foi utilizado para investigar o comportamento de quadros de concreto pré-fabricados com e sem o preenchimento de alvenaria participante. Os modelos considerados foram um quadro com um, cinco e dez andares, duas resistências de alvenaria e o uso ou não de uma camada de argamassa para fixar a alvenaria sob a viga de concreto. Além disso, com a calibração de uma largura para a diagonal equivalente, foi modelado um prédio de concreto pré-moldado de 10 andares, em que se analisou a influência da consideração da alvenaria participante por meio do MDE. O autor concluiu que a falta de encunhamento diminui de forma considerável a formação da diagonal comprimida e que a presença da alvenaria participante consiste em uma boa solução para o contraventamento de estruturas formadas por pórticos.

Montandon (2018) avaliou o comportamento de pórticos de edifícios de concreto armado preenchidos com blocos cerâmicos de vedação, por meio de modelos estruturais com o emprego do MEF e MDE. O autor destacou que, apesar do MDE ser um método muito atrativo para aplicação em projetos, as expressões analíticas disponíveis na literatura para o cálculo da largura da diagonal equivalente fornecem resultados muito diferentes entre si, além de grande parte dessas expressões desconsiderarem parâmetros que podem ser importantes, como pilares com seções transversais diferentes e a rigidez a flexão da viga. Dessa forma, o autor realizou diversas simulações numéricas de pórticos isolados preenchidos com alvenaria, utilizando os resultados obtidos via MEF como referência para avaliação dos resultados fornecidos pelo MDE. Foi possível comprovar a divergência entre os valores de largura da diagonal equivalente fornecidos por diferentes expressões analíticas encontradas na literatura, sendo que a formulação de Durrani e Luo (1994) foi a que apresentou os resultados mais coerentes com a análise numérica. Além disso, foi proposta uma nova expressão para o cálculo da largura da diagonal, a partir de uma calibração na expressão de Mainstone (1974).

Grandi (2018) analisou, experimentalmente, o comportamento de pórticos de aço preenchidos com paredes de alvenaria de blocos vazados de concreto, submetidos a ações horizontais cíclicas, com o objetivo de avaliar a contribuição das alvenarias no enrijecimento da estrutura e a degradação da rigidez do conjunto, devida aos carregamentos cíclicos aplicados. Foram

realizados nove ensaios, em escala real, sendo três deles com a presença da parede de preenchimento e seis sem a alvenaria. Por meio dos resultados obtidos, o enrijecimento lateral da estrutura foi mais uma vez constatado, uma vez que a presença da alvenaria promoveu um aumento de cerca de 11 vezes na rigidez do sistema, em média. Também foi verificada a degradação da rigidez do sistema, principalmente para os estágios de maior nível de fissuração das paredes. Por fim, foi realizada uma análise teórica aproximada do comportamento do pórtico preenchido, baseada em códigos normativos internacionais que recomendam o MDE. Foi verificado que as normas técnicas fornecem menores valores de rigidez lateral do conjunto em comparação aos resultados obtidos experimentalmente (justificável como medidas de segurança quanto ao dimensionamento de pórticos preenchidos), e que o MDE se mostrou uma ferramenta simples e útil para a consideração da alvenaria como parte do sistema de contraventamento, podendo ser aplicado para ações horizontais que antecedem o estágio inicial de fissuração do painel.

Santos (2019) realizou a elaboração de modelos numéricos, com o emprego do MEF, que simulam pórticos de aço vazios e preenchidos por alvenaria estrutural não armada, submetidos a carregamento cíclicos. O objetivo foi calibrar tais modelos, tendo-se por base os experimentos conduzidos por Grandi (2018), buscando obter equivalência entre as envoltórias de força-deslocamento, modos de ruptura, padrão de separação e degradação dos blocos. A alvenaria foi modelada adotando-se a estratégia de micromodelagem simplificada, com as argamassas sendo consideradas como elementos de espessura nula, com propriedades que simulam seu comportamento. Foi constatado que parâmetros como a energia de fratura das juntas de assentamento e o coeficiente de atrito entre os blocos e a superfície metálica possuem grande impacto no comportamento da estrutura, com relação a deslocamentos e mecanismos de ruptura da parede. Além disso, o autor destacou que os pórticos preenchidos são de difícil estudo, devido a uma grande heterogeneidade dos materiais e complexidade do problema, que envolve diversas não linearidades. Apesar disso, os modelos foram considerados adequados, reproduzindo de forma satisfatória o deslocamento do pórtico e as fissuras da alvenaria participante.

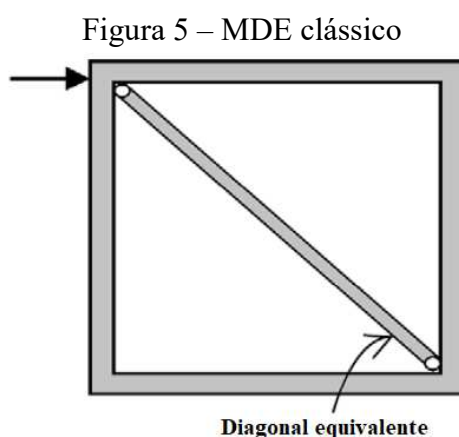
Queiroz (2020) avaliou os efeitos da presença de alvenarias participantes em sistemas formados por pórticos de concreto armado. O autor dividiu seus estudos em duas vertentes: inicialmente foram aplicadas as prescrições da ABNT NBR 16868-1 (2020) a um edifício de dimensões usuais, com análise dos efeitos da consideração da alvenaria participante em termos de

deslocamentos e esforços na estrutura; posteriormente, foram simulados modelos MDE, com a aplicação do procedimento da norma brasileira e de diferentes expressões analíticas da literatura para o cálculo das propriedades da diagonal equivalente, com o objetivo de comparar os resultados obtidos para pórticos preenchidos com blocos estruturais de concreto. O autor confirmou que a presença da alvenaria participante contribui significativamente para o enrijecimento da estrutura e influencia na absorção e redistribuição de esforços. Além disso, verificou grandes diferenças entre as formulações que determinam a largura da diagonal equivalente, com variações de até 212%, confirmando conclusões obtidas em estudos de outros autores.

2.2 MODELOS DE DIAGONAIS EQUIVALENTES

Conforme já mencionado, ao ser aplicado um carregamento horizontal em um pórtico preenchido, a alvenaria apresenta um comportamento de biela comprimida diagonalmente. Dessa forma, Polyakov (1960) introduziu o conceito de barra diagonal equivalente, que deu origem ao Modelo de Diagonal Equivalente (MDE).

Ressalta-se que, o MDE proposto inicialmente consiste em simular a parede de alvenaria por meio de uma barra diagonal birrotulada, definida nos pontos de encontro viga-pilar do pórtico, na região de formação da biela comprimida. Dessa forma, pode-se denominar tal modelo como MDE clássico, ilustrado na Figura 5. Posteriormente, diversos outros modelos analíticos, baseados no MDE clássico, foram propostos, inclusive com múltiplas diagonais simulando o comportamento da alvenaria. Alguns desses modelos serão abordados adiante neste trabalho.

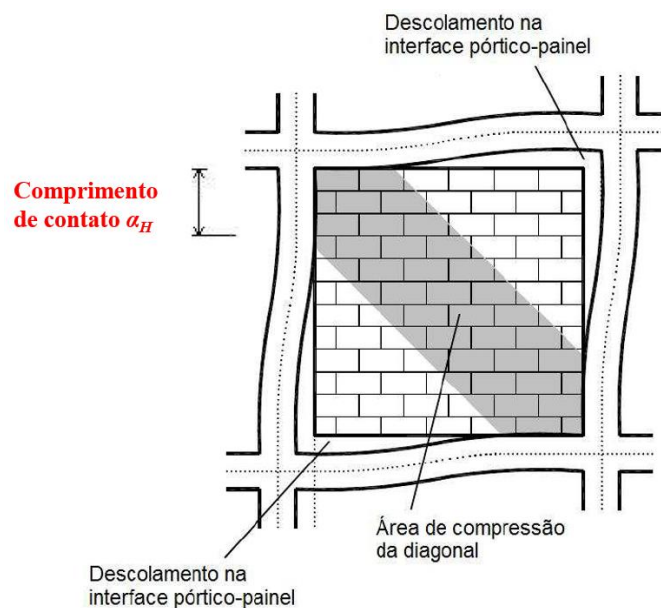


Fonte: Adaptado de Medeiros (2018).

Após as observações obtidas por Polyakov (1960), Holmes (1961 *apud* GRANDI, 2018) sugeriu que a geometria da barra diagonal fosse função das dimensões e das propriedades mecânicas da alvenaria de preenchimento. Assim, foi proposto que a barra diagonal apresente a mesma espessura e módulo de elasticidade da alvenaria, com largura igual a um terço do seu comprimento.

Posteriormente, Stafford-Smith e Carter (1969, *apud* GRANDI, 2018), fundamentados por diversos estudos prévios, indicaram que a rigidez da diagonal da alvenaria de preenchimento não é função somente de suas dimensões e propriedades mecânicas, sendo também dependente dos comprimentos de contato entre o pórtico e a parede. Os autores, por meio de investigações experimentais, declararam que em caso de estruturas de múltiplos pavimentos, a rigidez do pilar do pórtico tem uma importante influência na rigidez e resistência final do conjunto, sendo o comprimento de contato entre o pilar e a parede (α_H), ilustrado na Figura 6, um parâmetro fundamental para determinação da rigidez da diagonal equivalente.

Figura 6 – Comprimento de contato entre o pilar e a parede (α_H)



Fonte: Adaptado de Asteris *et al.* (2011a).

O comprimento de contato α_H é determinado pela rigidez relativa entre a parede e o pilar, podendo ser estimado pela Equação 1.

$$\frac{\alpha_H}{H} = \frac{\pi}{2 * \lambda_H} \quad (1)$$

onde λ_H é um parâmetro adimensional que expressa a rigidez relativa do pilar com a parede e H é a distância entre os eixos das vigas (distância entre andares). O parâmetro λ_H é determinado pela Equação 2.

$$\lambda_H = H * \sqrt[4]{\frac{E_a * t * \text{sen}(2\theta)}{4 * E_p * I_p * h}} \quad (2)$$

onde E_a , t e h são o módulo de elasticidade da parede de alvenaria, a espessura e a altura da parede, respectivamente; E_p e I_p são o módulo de elasticidade e o momento de inércia (no plano do pórtico em torno do eixo de flexão) do pilar, e θ é o ângulo da diagonal equivalente em relação à horizontal.

Em contrapartida, Stafford-Smith e Carter (1969, *apud* GRANDI, 2018), declararam que variações na rigidez da viga mostraram poucos efeitos no comportamento da estrutura, podendo essa baixa influência estar associada ao fato de que, independentemente da rigidez da viga, o comprimento do contato entre a viga e a parede é metade de seu vão, de maneira grosseira. Assim, os autores determinaram a Equação 3 para o cálculo da largura da barra diagonal equivalente (w).

$$w = \sqrt{\alpha_H^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} \quad (3)$$

onde l é o comprimento da parede.

Fundamentados pelos estudos desenvolvidos por Stafford-Smith e Carter (1969), diversos outros autores elaboraram diferentes expressões analíticas para o cálculo da largura da diagonal equivalente ao longo das últimas décadas.

Hendry (1981, *apud* MONTANDON, 2018) propôs uma equação que além de utilizar o comprimento de contato entre o pilar e a parede (α_H), também se utiliza o comprimento de contato entre a viga e a parede (α_L). Cada um desses comprimentos de contato, é função de seu respectivo parâmetro de rigidez relativa, seja entre o pilar e a parede (λ_p) ou entre a viga e a parede (λ_v). Ressalta-se que, o parâmetro λ_p está relacionado com o λ_H apresentado

anteriormente, conforme a Equação 4. Assim, para o cálculo proposto por Hendry (1981), os parâmetros de rigidez relativa são obtidos pelas Equações 5 e 6.

$$\lambda_H = \lambda_p * H \quad (4)$$

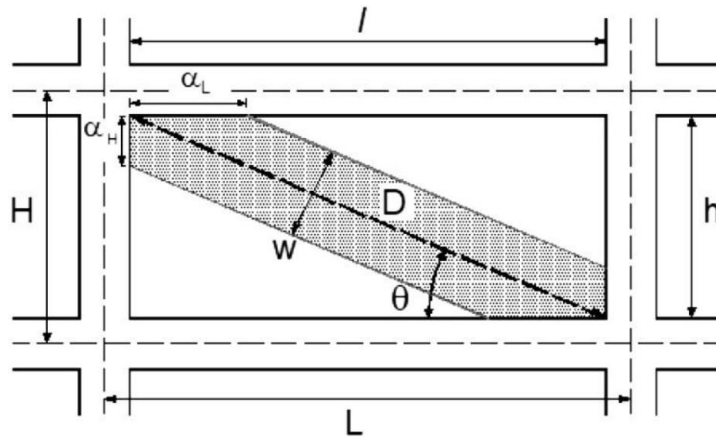
$$\lambda_p = \sqrt[4]{\frac{E_a * t * \text{sen}(2\theta)}{4 * E_p * I_p * h}} \quad (5)$$

$$\lambda_v = \sqrt[4]{\frac{E_a * t * \text{sen}(2\theta)}{4 * E_v * I_v * l}} \quad (6)$$

onde E_v e I_v são o módulo de elasticidade e o momento de inércia (no plano do pórtico em torno do eixo de flexão) da viga, respectivamente.

As equações para obtenção dos comprimentos de contato α_H e α_L , bem como a expressão para o cálculo da largura da diagonal equivalente (w) proposta por Hendry (1981) estão dispostas no Quadro 1. Também estão representadas as expressões propostas por Mainstone (1974), Liauw e Kwan (1984), Decanini e Fantin (1987), Paulay e Priestley (1992), Durrani e Luo (1994), Chrysostomou e Asteris (2012) e Montandon (2018). Tais expressões foram analisadas nos estudos de Montandon (2018) e Queiroz (2020). Na Figura 7 estão ilustradas as dimensões do pórtico preenchido que são utilizadas nas diferentes expressões.

Figura 7 – Dimensões do pórtico preenchido e dos comprimentos de contato



Fonte: Adaptado de Silva (2014).

Quadro 1 – Expressões para o cálculo da largura da diagonal equivalente

Autores	Expressões analíticas
Mainstone (1974)	$w = 0,175 * (\lambda_H)^{-0,4} * D$
Hendry (1981)	$w = \frac{\sqrt{\alpha_H^2 + \alpha_L^2}}{2} \quad \alpha_H = \frac{\pi}{2 * \lambda_p} \leq h \quad \alpha_L = \frac{\pi}{\lambda_v} \leq l$
Liau e Kwan (1984)	$w = \frac{0,95 * \text{sen}(2\theta)}{2 * \sqrt{\lambda_H}} * D$
Decanini e Fantin (1987): não fissurado	$\lambda_H \leq 7,85 \quad \lambda_H > 7,85$ $w = \left(0,085 + \frac{0,748}{\lambda_H}\right) * D \quad w = \left(0,130 + \frac{0,393}{\lambda_H}\right) * D$
Decanini e Fantin (1987): fissurado	$\lambda_H \leq 7,85 \quad \lambda_H > 7,85$ $w = \left(0,010 + \frac{0,707}{\lambda_H}\right) * D \quad w = \left(0,040 + \frac{0,470}{\lambda_H}\right) * D$
Paulay e Priestley (1992)	$w = \frac{D}{4}$
Durrani e Luo (1994)	$w = \gamma * \text{sen}(2\theta) * D$ $\gamma = 0,32 * \sqrt{\text{sen}(2\theta)} * \left(\frac{H^4 * E_a * t}{m * E_p * I_p * h}\right)^{-0,1}$ $m = 6 * \left(\frac{1 + 6 * E_v * I_v * H}{\pi * E_p * I_p * L}\right)$
Chrysostomou e Asteris (2012)	$w = 0,27 * (\lambda_H)^{-0,4} * D$
Montandon (2018)	$w = 0,51 * (\lambda_H)^{-0,3} * D$

Fonte: Adaptado de Queiroz (2020).

 D – comprimento da diagonal da parede E_a – módulo de elasticidade da parede de alvenaria E_p – módulo de elasticidade do pilar E_v – módulo de elasticidade da viga H – distância entre os eixos das vigas (distância entre andares) h – altura da parede I_p – momento de inércia do pilar no plano do pórtico em torno do eixo de flexão I_v – momento de inércia da viga no plano do pórtico em torno do eixo de flexão

L – comprimento da viga entre os eixos dos pilares (vão teórico da viga)

l – comprimento da parede

t – espessura da parede

w – largura da diagonal equivalente

α_H – comprimento de contato entre o pilar e a parede

α_L – comprimento de contato entre a viga e a parede

θ – ângulo de inclinação diagonal em relação à horizontal

λ_H – parâmetro adimensional que expressa a rigidez relativa do pilar com a parede

λ_p – parâmetro de rigidez relativa do pilar com a parede

λ_v – parâmetro de rigidez relativa da viga com a parede

Araújo (2014) destaca que apesar de existirem várias expressões analíticas para o cálculo da largura da diagonal equivalente, tais expressões costumam fornecer resultados muito diferentes, dificultando uma escolha adequada para se modelar corretamente a parede de alvenaria. Dessa forma, o autor sugere ter prudência ao escolher um modelo para a análise de pórticos preenchidos, de modo que não se obtenha uma solução contrária à segurança.

Nesse contexto, Montandon (2018) e Queiroz (2020) confirmaram, em suas respectivas pesquisas, que os valores da largura de diagonal equivalente fornecidas pelas expressões da literatura apresentam diferenças bastante significativas, com variações de até 212%. Outras importantes conclusões obtidas pelos referidos autores estão descritas a seguir.

Nos modelos analisados por Montandon (2018) a expressão de Durrani e Luo (1994) foi a que forneceu resultados mais próximos aos obtidos nos seus modelos de referência, simulados pelo MEF. Além disso, o autor notou que os comprimentos de contato fornecidos pelas expressões de Hendry (1981) foram significativamente maiores aos observados nos modelos MEF, tanto no contato pilar-parede quanto no contato viga-parede.

Queiroz (2020), por sua vez, notou que o aumento da resistência dos blocos que compõem a alvenaria faz com que a expressão de Mainstone (1974) forneça resultados mais próximos aos obtidos nos modelos MEF. O mesmo ocorreu com relação ao aumento do vão da viga dos modelos analisados.

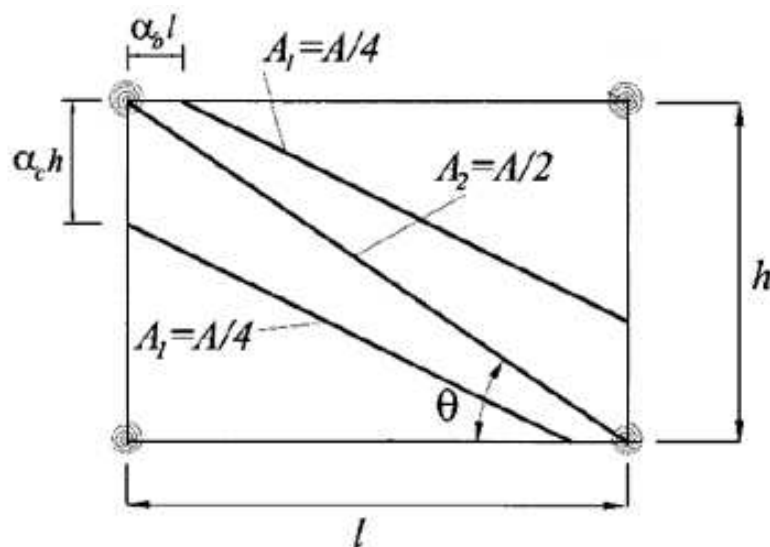
2.2.1 Modificações do MDE clássico

Apesar do MDE clássico ser bastante difundido no meio técnico para a consideração da contribuição das paredes de alvenaria em pórticos preenchidos, diversos autores já concluíram que esse modelo não consegue descrever adequadamente o comportamento de todos os elementos envolvidos no conjunto. Ainda que seja um método simples e capaz de prever o comportamento do pórtico preenchido num sentido global, o MDE clássico não fornece resultados satisfatórios quanto a efeitos locais nos elementos do pórtico, principalmente se tratando de esforços internos de força cortante e momento fletor atuantes nos pilares e nas vigas. Tais afirmações podem ser encontradas nas pesquisas de El-Dakhakhni, Elgaaly e Hamid (2003), Crisafulli e Carr (2007) e Yekrangnia e Mohammadi (2017), que foram citadas na seção 2.1.3 deste trabalho.

Dessa forma, os autores citados anteriormente apresentaram modelos com modificações em relação ao MDE clássico, desenvolvendo métodos analíticos em que a parede de alvenaria é simulada por meio de múltiplas barras diagonais. A seguir, estão ilustrados esses modelos.

O modelo proposto por El-Dakhakhni, Elgaaly e Hamid (2003) consiste em simular a parede de alvenaria por meio de três barras diagonais, com características mecânicas que considerem o comportamento ortotrópico da alvenaria. Esse modelo está representado na Figura 8.

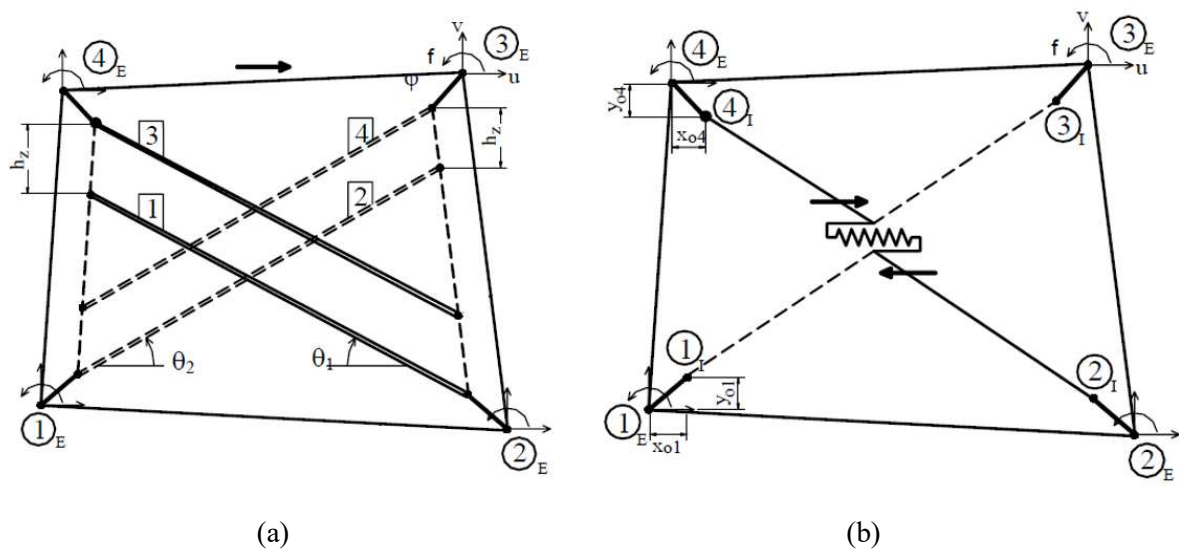
Figura 8 – Modelo proposto por El-Dakhakhni, Elgaaly e Hamid (2003)



Fonte: Adaptado de El-Dakhakhni, Elgaaly e Hamid (2003).

Crisafulli e Carr (2007), após estudos preliminares realizados em modelos com uma, duas e três diagonais, apresentaram um modelo que considera separadamente o comportamento da alvenaria frente à compressão, com a utilização de duas barras diagonais, e ao cisalhamento, com a consideração de uma mola. O modelo proposto está ilustrado na Figura 9.

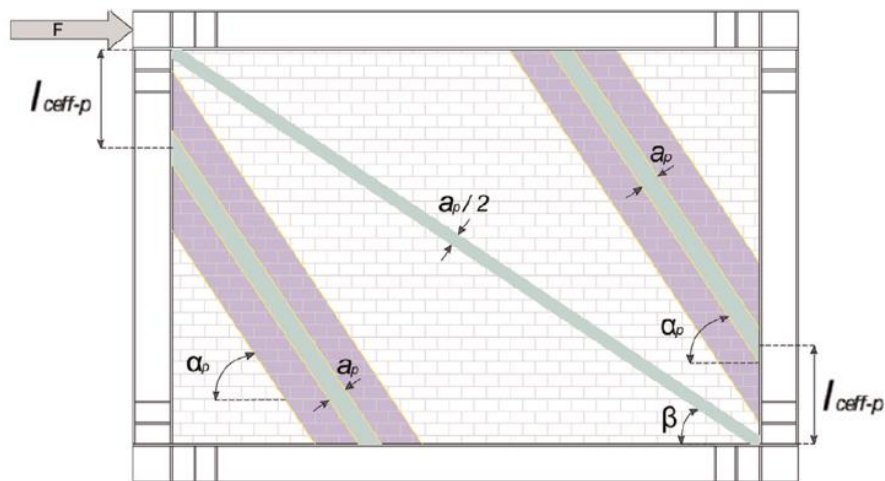
Figura 9 – Modelo proposto por Crisafulli e Carr (2007): (a) Comportamento frente à compressão; (b) Comportamento frente ao cisalhamento



Fonte: Adaptado de Crisafulli e Carr (2007).

Yekrangnia e Mohammadi (2017) também apresentaram um modelo com a utilização de três barras diagonais para simular a parede de alvenaria, representado na Figura 10.

Figura 10 – Modelo proposto por Yekrangnia e Mohammadi (2017)



Fonte: Adaptado de Yekrangnia e Mohammadi (2017).

2.3 RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS INTERNACIONAIS

Diversos estudos já foram realizados com o intuito de se analisar o comportamento de estruturas aporticadas submetidas a ações horizontais quando a alvenaria é considerada como elemento resistente de contraventamento. Vários modelos foram propostos para o dimensionamento desses elementos, sendo o MDE clássico o mais difundido e utilizado, devido a facilidade de sua aplicação. Baseados nesse modelo, alguns códigos normativos de projeto foram elaborados com a finalidade de quantificar a rigidez e a resistência proporcionada pelas paredes de alvenaria na estrutura, de forma a viabilizar a consideração da alvenaria como elemento resistente em uma estrutura formada por pórticos preenchidos (GRANDI, 2018).

Dessa forma, serão abordados a seguir, procedimentos para a determinação da largura da diagonal equivalente especificados por quatro diferentes normas internacionais: as normas americanas FEMA 306 (1998) e TMS 402/602 (2016), a norma canadense CSA S304 (2014) e a norma neozelandesa NZS 4230 (2004). Ressalta-se que tais normas também abordam procedimentos para verificação das forças que causam a ruptura das paredes de preenchimento, que não serão abordados diretamente neste trabalho.

2.3.1 Norma americana FEMA 306 (1998)

Para o cálculo da largura da diagonal equivalente, a norma americana FEMA 306 (1998) indica a expressão analítica proposta por Mainstone (1974), que foi apresentada no Quadro 1 do presente trabalho. De acordo com Asteris *et al.* (2011b) essa expressão tem se provado como a mais popular ao longo dos anos, sendo aceita pela maioria dos pesquisadores que trabalham com pórticos preenchidos. Os autores também destacam que, quando comparada com outras expressões, a fórmula proposta por Mainstone (1974) resulta em um menor valor para a largura da diagonal equivalente, apresentando resultados mais conservadores.

Essa norma é frequentemente referenciada em trabalhos onde são verificadas as forças que causam a ruptura das paredes de preenchimento, que utilizam suas recomendações para o cálculo dos parâmetros resistentes da alvenaria. Como exemplos, podem-se citar os trabalhos de Silva (2014), Alva *et al.* (2015), Montandon (2018) e Grandi (2018).

2.3.2 Norma canadense CSA S304 (2014)

A norma canadense, para efeitos de dimensionamento, admite que as propriedades geométricas da diagonal equivalente é função dos comprimentos de contato entre o pilar e a parede (α_H) e entre a viga e a parede (α_L). Para isso, são utilizadas as expressões recomendadas por Hendry (1981), que foram fundamentadas pelos estudos de Stafford-Smith e Carter (1969). Assim, por meio das Equações 5 e 6 (cálculo dos parâmetros de rigidez relativa) e das expressões indicadas por Hendry (1981) para o cálculo dos comprimentos de contato, dispostas no Quadro 1, têm se:

$$\alpha_H = \frac{\pi}{2} * \sqrt[4]{\frac{4 * E_p * I_p * h}{E_a * t_e * \sin(2\theta)}} \quad (7)$$

$$\alpha_L = \pi * \sqrt[4]{\frac{4 * E_v * I_v * l}{E_a * t_e * \sin(2\theta)}} \quad (8)$$

onde t_e é a espessura efetiva da parede participante, tomada como a soma da espessura das paredes longitudinais do bloco vazado não totalmente grauteado e a espessura da parede para o tijolo ou bloco vazado totalmente grauteado. Os demais parâmetros são os mesmos já citados neste trabalho.

É possível observar que, diferentemente das equações recomendadas por Stafford-Smith e Carter (1969) e Hendry (1981), para determinação dos parâmetros de rigidez relativa (λ_p e λ_v) a norma CSA S304 (2014) se baseia na espessura efetiva da parede (t_e), ao invés da espessura total (t). Essa consideração é proveniente do fato de que, na prática, as paredes de alvenaria geralmente não são construídas com blocos maciços e nem apresentam blocos vazados totalmente preenchidos. Dessa forma, não se torna coerente a utilização da espessura total do bloco nessa situação (GRANDI, 2018).

A partir disso, a largura da diagonal equivalente (w) pode ser determinada pela Equação 9 a seguir:

$$w = \sqrt{\alpha_H^2 + \alpha_L^2} \quad (9)$$

Entretanto, a largura efetiva da diagonal equivalente (w_{eff}), para efeitos de cálculos de resistência e rigidez, é tomada como sendo metade do valor da diagonal equivalente (w) e não deve exceder um quarto do comprimento da diagonal (D). Assim:

$$w_{eff} = \frac{w}{2} \leq \frac{D}{4} \quad (10)$$

É possível perceber, portanto, que a expressão recomendada pela norma canadense possui como limite superior a expressão proposta por Paulay e Priestley (1992), que está representada no Quadro 1.

Além disso, a norma CSA S304 (2014) indica que a rigidez efetiva da diagonal equivalente (K_{eff}), utilizada nos cálculos dos esforços e deslocamentos, é calculada conforme a Equação 11.

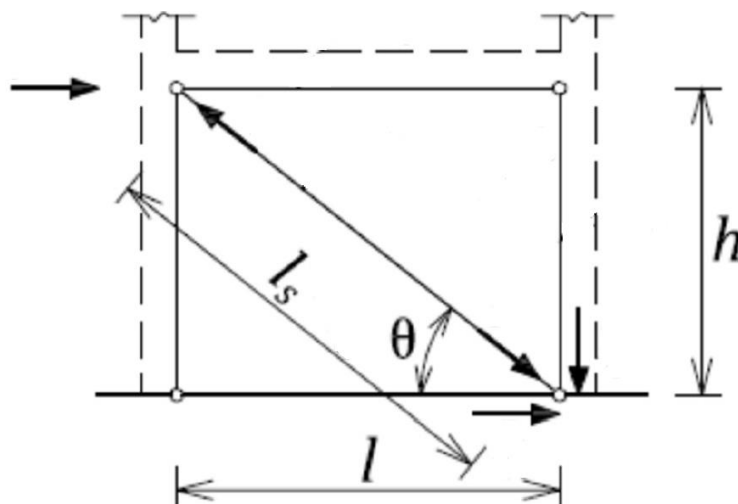
$$K_{eff} = \frac{\varphi_{st} * w_{eff} * t_e * E_a}{l_s} \quad (11)$$

onde φ_{st} é o fator de redução de rigidez da diagonal equivalente, tomado como 0,5, de forma a considerar a parede em condição fissurada e l_s é o comprimento de projeto da diagonal equivalente, que é determinado pela Equação 12.

$$l_s = D - w_{eff} \quad (12)$$

Na Figura 11 ilustra-se o modelo analítico proposto pela norma canadense (MDE clássico). A figura é adaptada de Brzev e Anderson (2018), autores de um guia para projetos de edifícios de alvenaria, tendo como referência a norma canadense.

Figura 11 – Modelo analítico proposto pela norma canadense



Fonte: Adaptado de Brzev e Anderson (2018).

2.3.3 Norma americana TMS 402/602 (2016)

De acordo com Foroushani (2019), a norma americana TMS 402/602 (2016), baseada no trabalho conduzido por Flanagan e Bennett (1999), recomenda a Equação 13 para o cálculo da largura da diagonal equivalente.

$$w = \frac{0,3}{\lambda_p * \cos(\theta)} \quad (13)$$

onde o parâmetro de rigidez relativa entre o pilar e a parede (λ_p) é calculado conforme a Equação 5, já apresentada neste trabalho, com a diferença de que é utilizada a espessura efetiva da parede (t_e), ao invés da espessura total (t), de maneira similar à norma canadense.

Com relação ao cálculo dos parâmetros resistentes da alvenaria, Foroushani (2019), comparou os procedimentos das normas canadense CSA S304 (2014) e americana TMS 402/602 (2016) com resultados obtidos em seus experimentos compostos por pórticos preenchidos submetidos a carregamentos horizontais. Assim, esse trabalho pode auxiliar na orientação sobre tais procedimentos normativos.

2.3.4 Norma neozelandesa NZS 4230 (2004)

Conforme Grandi (2018), a norma neozelandesa recomenda que a largura da diagonal equivalente seja tomada como um quarto do comprimento da diagonal, seguindo a expressão analítica proposta por Paulay e Priestley (1992). Em seu trabalho, a autora adotou a espessura efetiva da parede (t_e) como espessura da barra da diagonal equivalente, para as análises realizadas com as recomendações dessa norma.

2.4 RECOMENDAÇÕES ABNT NBR 16868-1 (2020)

Recentemente, foi publicada a norma brasileira ABNT NBR 16868-1 (2020) – Alvenaria Estrutural – Parte 1: Projeto, que atualizou e unificou as normas referentes ao projeto de alvenaria estrutural no país, substituindo a ABNT NBR 15812-1 (2010), que se refere a blocos cerâmicos, e a ABNT NBR 15961-1 (2011), que se refere a blocos de concreto. Uma das atualizações foi com relação à adição de um anexo informativo que aborda sobre a consideração de alvenarias participantes (Anexo D), foco deste trabalho. Assim, a seguir serão abordadas as recomendações da norma a respeito do tema. Ressalta-se que a norma brasileira toma como base as recomendações da norma canadense CSA S304 (2014), mencionada anteriormente.

A ABNT NBR 16868-1 (2020) define que “a alvenaria participante é a alvenaria estrutural construída dentro de um pórtico, intencionalmente dimensionada e construída como parte do sistema de contraventamento”. Dessa forma, as paredes constituídas de alvenarias participantes devem ser projetadas para resistir a todas as ações aplicadas dentro e fora do plano, além de resistir a todas as cargas que forem transferidas a elas pelo pórtico. Destaca-se que, de acordo com a norma, as paredes participantes não podem possuir aberturas ou espaços vazios entre a alvenaria e o pórtico. Caso se deseje considerar uma parede com aberturas como participante, o projetista deve indicar, por meio de ensaios experimentais ou investigações especiais, que a ação da diagonal comprimida pode ser formada e todos os outros requisitos estruturais da parede participante possam ser desenvolvidos.

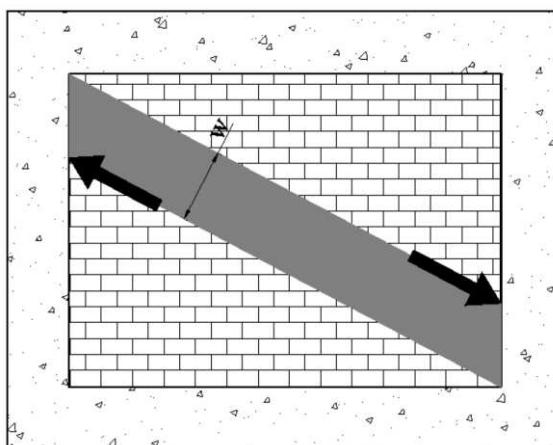
Assim sendo, o modelo analítico recomendado pela ABNT NBR 16868-1 (2020) para consideração das alvenarias participantes é o modelo de barra diagonal comprimida, também conhecido como Modelo de Diagonal Equivalente (MDE). Para o cálculo da largura da diagonal

equivalente, a norma brasileira recomenda a mesma expressão utilizada pela norma canadense CSA S304 (2014), exposta na seção 2.3.2 deste trabalho. Entretanto, a norma brasileira apresenta duas diferenças quando se comparada a norma canadense, que serão abordadas a seguir.

A primeira diferença é com relação a espessura da parede a ser considerada no modelo. Diferentemente da norma canadense, que indica a utilização da espessura efetiva da parede participante (t_e), a norma brasileira recomenda a utilização de uma espessura t_{ap} , que equivale a duas vezes a soma da espessura das paredes longitudinais do bloco para o caso de bloco vazado não totalmente grauteado; ou, é a espessura da parede para o caso de tijolo maciço ou bloco vazado totalmente grauteado. A diferença se dá pelo fato de que a norma canadense não faz menção sobre dobrar o valor da soma da espessura das paredes longitudinais do bloco, para o caso de bloco vazado não totalmente grauteado. Dessa forma, a norma brasileira recomenda todas as equações descritas na seção 2.3.2, com a substituição da espessura t_e pela espessura t_{ap} .

A segunda diferença é com relação ao posicionamento da força resultante da diagonal equivalente no pórtico. A norma canadense indica o modelo clássico de diagonal equivalente, no qual a barra diagonal é definida entre os pontos de encontro viga-pilar, conforme está representado na Figura 11, o que faz com que a força diagonal resultante seja aplicada nesse ponto. Em contrapartida, a norma brasileira sugere que a força diagonal resultante da diagonal equivalente seja aplicada diretamente sobre os pilares, apresentando então, uma excentricidade com relação ao nó de pórtico, conforme representado na Figura 12.

Figura 12 – Posição sugerida da força diagonal resultante para dimensionamento dos pilares do pórtico



Fonte: ABNT NBR 16868-1 (2020).

Esse posicionamento, sugerido pela norma brasileira, deve-se pelos esforços adicionais de força cortante e momento fletor que são introduzidos nos pilares pela ação da diagonal comprimida, que não são considerados no MDE clássico. Tal recomendação está alinhada aos estudos mencionados na seção 2.2.1 deste trabalho, que indicam que o MDE clássico não consegue capturar adequadamente os esforços internos solicitantes nos elementos do pórtico.

A norma brasileira ainda especifica que os elementos de pilar, viga ou laje em contato com a alvenaria participante devem ser dimensionados considerando os esforços de força cortante e momento fletor, obtidos no MDE, majorados por um fator adicional igual a 1,1. É enfatizado que, especialmente a força cortante proveniente da diagonal equivalente deve ser somada aos esforços dos pilares

Com relação ao cálculo da capacidade resistente das alvenarias participantes, se faz necessário determinar as resistências relacionadas à compressão diagonal, ao cisalhamento por escorregamento da junta horizontal e à tração diagonal. Os procedimentos recomendados pela norma brasileira são detalhados no trabalho de Queiroz (2020).

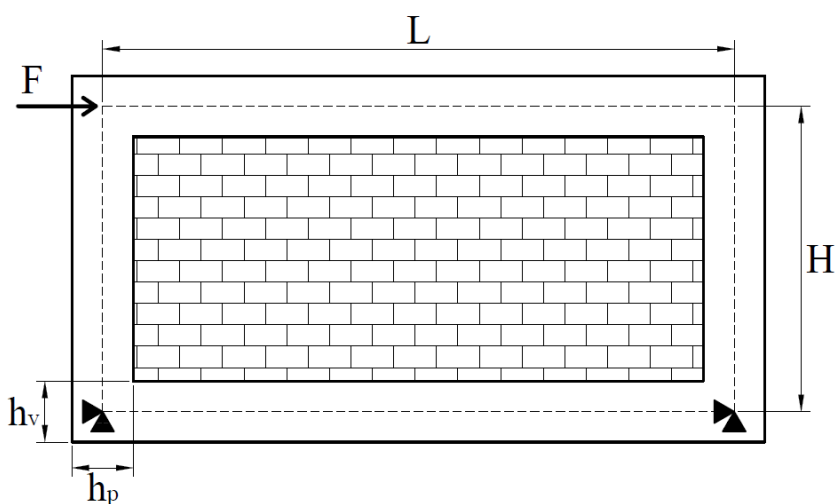
3 MODELAGEM NUMÉRICA GERAL

Este capítulo tem como objetivo demonstrar os procedimentos que foram adotados para o desenvolvimento dos modelos numéricos de pórticos preenchidos estudados neste trabalho. Os modelos nos quais foi empregado o Método dos Elementos Finitos (MEF) foram realizados no programa computacional ANSYS, plataforma Mechanical APDL versão 2020 R1, onde foram realizadas simulações com elementos finitos bidimensionais de estado plano de tensões e elementos de contato. Já para os Modelos de Diagonal Equivalente (MDE), foi utilizado o programa de análise estrutural de pórticos planos FTOOL, versão 4.0.

3.1 PARÂMETROS GERAIS

Neste trabalho foram desenvolvidos diversos modelos numéricos de pórticos preenchidos com alvenarias participantes submetidos a ações horizontais, sem a presença de aberturas. Tais modelos foram elaborados mediante o esquema estático ilustrado na Figura 13. Destaca-se que, os modelos simulados nos capítulos 4 e 5 consistem em pórticos preenchidos isolados, com apenas um vão e um andar.

Figura 13 – Esquema estático do pórtico preenchido



Fonte: Autor (2022).

Com relação às vinculações do pórtico preenchido, foram considerados dois apoios fixos nos pontos de encontro dos eixos dos pilares com o eixo da viga inferior do pórtico. A escolha por dois apoios fixos foi baseada em dois aspectos, expostos a seguir. Primeiro, devido ao

procedimento que foi adotado para determinação do valor da força horizontal F (descrito mais adiante nesta seção do trabalho), no qual é utilizado a recomendação da ABNT NBR 6118 (2014) relacionada ao deslocamento horizontal máximo entre pavimentos (deslocamento relativo), optou-se por restringir as translações horizontais e verticais dos dois apoios, de modo que o deslocamento horizontal medido na região superior do pórtico seja equivalente ao deslocamento relativo entre os pavimentos. O segundo aspecto está relacionado ao que foi abordado por Montandon (2018), que também considerou dois apoios fixos em seus modelos de pórticos preenchidos isolados: o autor comparou resultados de modelos nos quais foram aplicados dois apoios fixos com modelos que combinaram apoio móvel e apoio fixo e destacou que “após comparação, viu-se que as tensões no painel, os valores das larguras da diagonal equivalentes e os esforços na estrutura tiveram diferenças relativamente baixas” (MONTANDON, 2018, p. 37). Destaca-se que a vinculação com dois apoios fixos também foi utilizada por Queiroz (2020) nos modelos de pórticos preenchidos isolados estudados em seu trabalho.

Além das condições de apoio, a força horizontal (F) também foi aplicada no encontro dos eixos da viga e do pilar do pórtico, com o intuito de aproximar as modelagens MEF e MDE, uma vez que nos modelos MDE a análise é realizada apenas com os eixos desses elementos. Ressalta-se que esse procedimento também foi adotado por Montandon (2018) e Queiroz (2020).

Com relação aos elementos do pórtico, adotou-se que são de concreto armado, admitindo-se material isotrópico elástico-linear como simplificação. As propriedades mecânicas do concreto armado foram obtidas da ABNT NBR 6118 (2014), sendo o módulo de elasticidade do concreto (E_c) estimado pelo Quadro 2, em função da classe de resistência do concreto e o coeficiente de Poisson (ν) tomado como 0,2. Para as seções transversais dos elementos do pórtico, foram definidas as seguintes nomenclaturas: h_p e h_v para as alturas das seções transversais dos pilares e das vigas, respectivamente, medidas no plano do pórtico preenchido (Figura 13); por sua vez, b_p e b_v são as larguras dessas mesmas seções (medidas na direção perpendicular ao plano do pórtico).

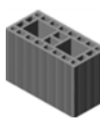
Quadro 2 – Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão do concreto

Classe de resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
E_c (GPa)	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118 (2014).

Já com relação à alvenaria participante, foram adotados blocos estruturais de concreto e cerâmicos, não preenchidos com graute, com diferentes valores de resistência característica de compressão simples (f_{bk}). As resistências à compressão da argamassa (f_a) e do prisma (f_{pk}), bem como a espessura mínima das paredes longitudinais do bloco, foram estimadas por meio das especificações do Quadro 3, em função da resistência f_{bk} do bloco. Essas especificações foram extraídas da ABNT NBR 16868-1 (2020), sendo valores de referência e sugestivos. As propriedades mecânicas da alvenaria participante também foram obtidas de recomendações da ABNT NBR 16868-1 (2020), dispostas no Quadro 4. Destaca-se que o módulo de deformação longitudinal, é equivalente ao módulo de elasticidade da alvenaria (E_a).

Quadro 3 – Recomendação para especificação dos materiais da alvenaria estrutural

Tipo de bloco		f_{bk}	f_a	f_{pk}	Espessura mínima de parede do bloco mm
		MPa			
Bloco vazado de concreto		3,0	4,0	2,4	25
		4,0	4,0	3,2	25
		6,0	6,0	4,5	25
		8,0	6,0	6,0	25
		10,0	8,0	7,0	25
		12,0	8,0	8,4	25
		14,0	12,0	9,8	25
		16,0	12,0	10,4	25
		18,0	14,0	11,7	25
		20,0	14,0	12,0	25
		22,0	18,0	12,1	25
24,0	18,0	13,2	25		
Bloco cerâmico de parede vazada		4,0	4,0	2,0	8
		6,0	6,0	3,0	8
		8,0	6,0	4,0	8
		10,0	8,0	4,5	8
		12,0	8,0	5,4	8
Bloco cerâmico de parede maciça		10,0	8,0	6,0	22
		14,0	12,0	8,4	25
		18,0	15,0	10,8	30

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16868-1 (2020).

Quadro 4 – Propriedades da alvenaria

Componente	Propriedade	Valor
Bloco de concreto	Módulo de deformação longitudinal	$800 f_{pk}$ se $f_{bk} \leq 20$ MPa $750 f_{pk}$ se $f_{bk} = 22$ e 24 MPa $700 f_{pk}$ se $f_{bk} \geq 26$ MPa
	Coefficiente de Poisson	0,20
Bloco cerâmico	Módulo de deformação longitudinal	$600 f_{pk}$
	Coefficiente de Poisson	0,15

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16868-1 (2020).

Ainda a respeito das propriedades mecânicas da alvenaria participante, assim como o concreto armado do pórtico, foi considerado que o material também apresenta um comportamento elástico-linear. Foram realizadas simulações considerando a alvenaria como material isotrópico e ortotrópico. As considerações a respeito da ortotropia da alvenaria estão dispostas no capítulo 4 deste trabalho.

Para a determinação do valor da força horizontal (F) a ser aplicada em cada modelo, utilizou-se o procedimento descrito por Queiroz (2020): partindo do exposto por Montandon (2018), primeiramente é aplicada uma força horizontal (representando um carregamento provocado pelas ações do vento) capaz de produzir, no pórtico não preenchido (sem a alvenaria participante), um deslocamento horizontal relativo entre dois andares consecutivos iguais a $H/850$ (limite recomendado pela ABNT NBR 6118 (2014) para a verificação do Estado Limite de Serviço – ELS), sendo H a distância entre andares consecutivos (distância entre os eixos das vigas).

Após encontrada essa força, é realizado um procedimento para encontrar um valor compatível com o Estado Limite Último – ELU. De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), para a combinação frequente de serviço (ELS), o fator de redução ψ_1 da ação do vento é igual a 0,3. Já para as combinações do ELU em que o vento é considerado ação variável direta principal, seu coeficiente de ponderação γ_q é igual a 1,4. Dessa forma, tem-se uma relação de aproximadamente 4,67 vezes entre o valor da força no ELU e no ELS (1,4/0,3). Assim, para se obter o valor da força horizontal (F) a ser aplicada em cada modelo, encontra-se o valor necessário para se atingir o deslocamento limite recomendado para o ELS, multiplicando-se posteriormente por 4,67 vezes para obter um valor compatível com o ELU.

Destaca-se que esse procedimento, no qual é necessário analisar o pórtico não preenchido, foi realizado nos modelos MEF, que são os modelos de referência deste trabalho. No capítulo 4 está exemplificado a aplicação desse processo em um dos modelos analisados.

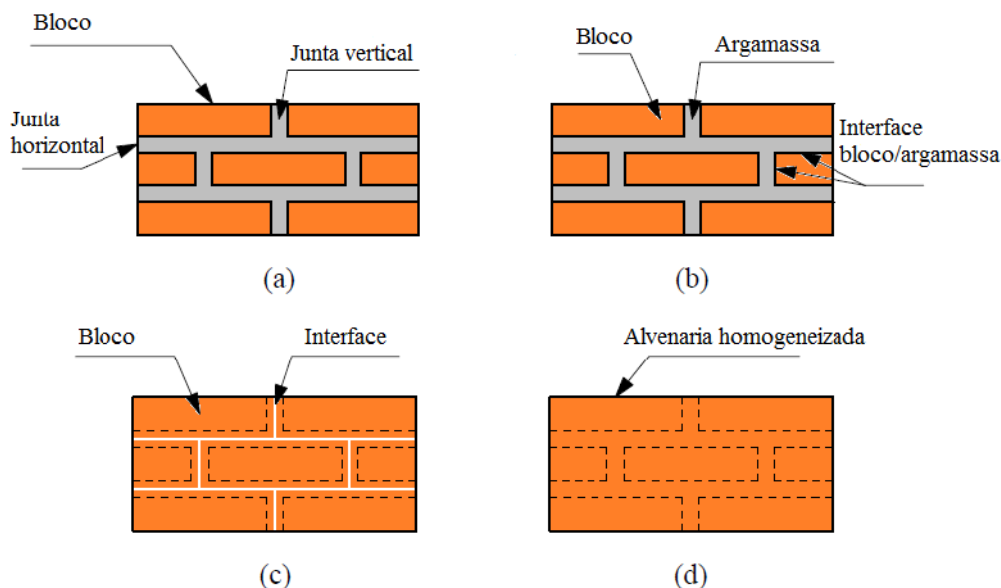
3.2 MODELOS MEF DE PÓRTICOS PREENCHIDOS

De acordo com Lourenço (1996, *apud* MEDEIROS, 2018), o comportamento da alvenaria pode ser analisado numericamente, pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), de três diferentes maneiras (representados na Figura 14), dependendo do grau de precisão e simplicidade desejado:

- a) Micromodelagem detalhada: blocos e argamassa são representados por elementos contínuos, enquanto a interface entre esses elementos é representada por elementos descontínuos. Nessa abordagem, as propriedades mecânicas de ambos os materiais, blocos e argamassa, são consideradas.
- b) Micromodelagem simplificada: a junta de argamassa é simulada por interface de espessura zero, enquanto as unidades são representadas com dimensões expandidas, para não se alterar a geometria. Assim, o coeficiente de Poisson da argamassa é ignorado. A precisão dessa abordagem é inferior à anterior.
- c) Macromodelagem: não faz distinção entre bloco e argamassa, tratando a alvenaria como um meio contínuo e homogêneo.

Medeiros (2018) ressalta que uma abordagem não deve ser considerada melhor que a outra, pois existem diferentes campos de aplicação para cada uma. As análises por micromodelagem, por exemplo, são necessárias para permitir um estudo mais preciso sobre o comportamento local das estruturas de alvenaria, sendo aplicadas aos detalhes estruturais, como os sistemas de construção com blocos de silicato de cálcio e na consideração de aberturas de janelas e portas. Já os macromodelos são escolhidos quando se deseja analisar o comportamento global da estrutura, onde as tensões podem ser consideradas uniformes, por simplificação. Notoriamente, a macromodelagem é uma abordagem mais prática, devido à redução de tempo e de requisitos computacionais, além da geração de uma malha mais amigável.

Figura 14 – Abordagens para modelagem da alvenaria: (a) Representação da alvenaria; (b) Micromodelagem detalhada; (c) Micromodelagem simplificada; (d) Macromodelagem



Fonte: Medeiros (2018).

Para este trabalho, optou-se por adotar a macromodelagem para os modelos com o emprego do MEF. Os procedimentos adotados para esses modelos estão abordados a seguir.

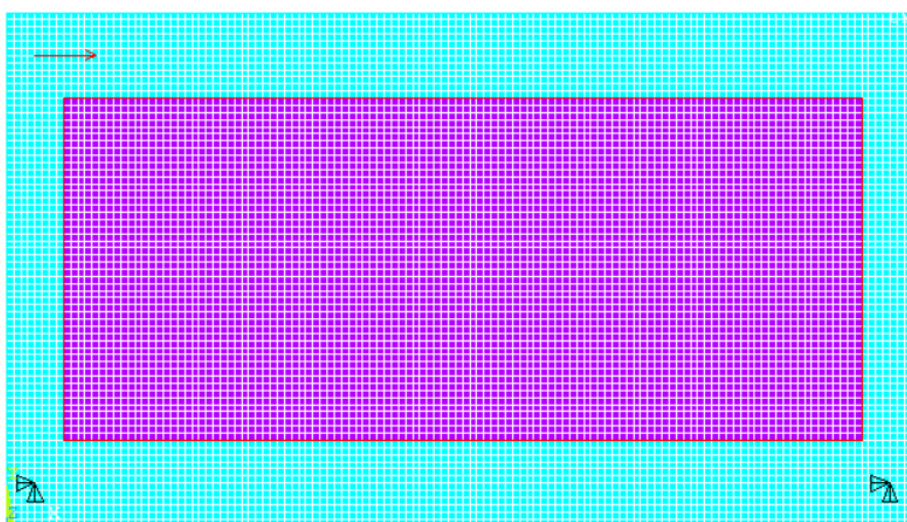
Primeiramente, fez-se necessário a definição do elemento finito a ser utilizado para a modelagem do pórtico preenchido. Tanto para se modelar a estrutura de concreto, quanto para a parede de alvenaria, foi escolhido o elemento PLANE182, da biblioteca do ANSYS, o mesmo utilizado por Montandon (2018) e Queiroz (2020) em suas pesquisas. Esse elemento finito é aplicável para o caso de estado plano de tensões e possui quatro nós, sendo que cada nó possui dois graus de liberdade, que são as translações nas direções x e y . Essas direções formam o plano xy , no qual se encontra o pórtico preenchido (MONTANDON, 2018).

Com relação à discretização da malha de elementos finitos, também se adotou os mesmos valores utilizados pelos dois autores citados anteriormente. Foram empregados elementos finitos de dimensões 5 cm x 5 cm, tanto para o pórtico, quanto para a alvenaria. Queiroz (2020), fundamentou sua escolha por esse tamanho de malha no estudo realizado por Doudoumis (2007), que relatou que uma densidade de malha de 4 cm x 4 cm fornece resultados satisfatórios, em termos de rigidez total do sistema e tensão dentro da parede de preenchimento, para os casos em que é considerado comportamento linear do material. Assim, como a malha de 5 cm x 5 cm

se ajustou melhor nas dimensões do pórtico preenchido analisados em sua pesquisa, e conduziu a resultados praticamente iguais aos obtidos com a malha de 4 cm x 4 cm, Queiroz (2020) optou pela malha de 5 cm x 5 cm. Dessa forma, para este trabalho, foram adotadas essas mesmas dimensões para a malha.

Na Figura 15 está representado um dos modelos de pórticos preenchidos simulado pelo MEF analisado neste trabalho.

Figura 15 – Modelo de pórtico preenchido simulado pelo MEF



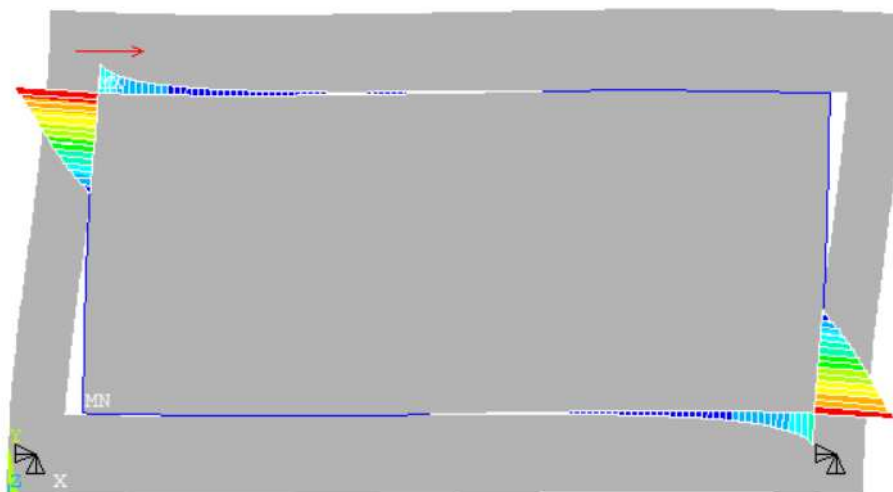
Fonte: Autor (2022).

Ressalta-se que, para a análise do pórtico preenchido via MEF faz-se necessária, também, a modelagem do contato entre os elementos do pórtico e da alvenaria, a fim de permitir o deslizamento e a separação entre as superfícies em contato. Os procedimentos a respeito da modelagem do contato dessa interface estão descritos na seção a seguir.

3.2.1 Modelagem do contato na interface pórtico-alvenaria

A consideração do contato entre a parede e o pórtico é de extrema importância na modelagem de pórticos preenchidos, uma vez que, quando submetidos à ação de forças horizontais, apresentam uma concentração de tensões nos cantos da diagonal comprimida e descolamento (separação) dos elementos nos cantos opostos a essa diagonal (MONTANDON, 2018). Na Figura 16 está representado esse comportamento, obtido a partir da simulação de um dos modelos analisados neste trabalho.

Figura 16 – Deformada do pórtico preenchido e pressão de contato entre pórtico e parede



Fonte: Autor (2022).

Na Figura 16 também é possível perceber a pressão de contato que atua nos comprimentos onde o pórtico e a parede estarão efetivamente em contato, na região onde se forma a diagonal comprimida. Essa pressão de contato é responsável por um acréscimo dos esforços de cisalhamento e de momentos fletores nos pilares e nas vigas do pórtico. Esse comportamento é um dos objetivos de estudo desta pesquisa, e será abordado ao longo do trabalho.

Em relação ao problema de contato, os elementos CONTA172/TARGE169 foram utilizados para o par de contato, com a finalidade de permitir o deslizamento e a separação entre as superfícies.

Fisicamente, é de se esperar que não exista penetração entre corpos em contato. Entretanto, por motivos de convergência numérica, em simulações com o MEF é necessário permitir certo nível de penetração. O programa computacional ANSYS lida com tal situação a partir de dois coeficientes: FKN (fator de rigidez normal de contato) e FTOLN (fator de tolerância à penetração). O fator FKN dita quanto um corpo é resistente à penetração de outro; quanto maior esse fator, menor a penetração. Já o FTOLN é utilizado para definir qual a máxima penetração permitida entre os elementos em contato (QUEIROZ, 2020).

Com relação aos parâmetros FKN e FTOLN, empregou-se neste trabalho, os mesmos procedimentos adotados por Montandon (2018) e Queiroz (2020), que foram fundamentados

pela pesquisa desenvolvida por Silva (2009): o fator FKN foi calibrado para cada modelo, a fim de se obter a menor penetração possível entre as superfícies, sem causar inconsistências numéricas (problemas de convergência); já o fator FTOLN foi mantido com o valor padronizado pelo ANSYS, igual a 0,1.

Ainda com relação ao problema de contato, é necessário também a definição de três parâmetros para simular a resistência ao cisalhamento entre a parede de alvenaria e o pórtico de concreto: a máxima tensão resistente de cisalhamento entre as superfícies do pórtico com a parede ($f_{v,max}$), a coesão (τ_0) e o coeficiente de atrito entre a parede e o pórtico (μ). Para isso, adotou-se o critério de Coulomb, descrito na Equação 14 a seguir:

$$\tau = \tau_0 + \mu * \sigma \quad (14)$$

onde τ é a tensão de cisalhamento mobilizada e σ é a pressão de contato entre a parede e o pórtico.

Os coeficientes do critério de Coulomb podem ser estimados pelo Quadro 5, extraído da ABNT NBR 16868-1 (2020), sendo função da resistência média a compressão da argamassa (f_a) a ser considerada no modelo, que por sua vez pode ser obtida em função da resistência f_{bk} do bloco (Quadro 3).

Quadro 5 – Valores característicos da resistência ao cisalhamento em juntas horizontais de paredes (f_{vk})

Resistência média a compressão da argamassa (f_a)	f_{vk} MPa
Entre 1,5 e 3,4 MPa	$0,10 + 0,5 \sigma \leq 1,0$
Entre 3,5 e 7,0 MPa	$0,15 + 0,5 \sigma \leq 1,4$
Acima de 7,0 MPa	$0,35 + 0,5 \sigma \leq 1,7$

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16868-1 (2020).

Para os modelos do capítulo 4 e os modelos preliminares do capítulo 5 (seção 5.1), assumiu-se que a máxima tensão resistente ao cisalhamento entre as superfícies ($f_{v,max}$) seja igual ao limite superior indicado no Quadro 5, em função da resistência média da argamassa (f_a). Para a coesão (τ_0) e para o coeficiente de atrito (μ) adotaram-se, respectivamente, o primeiro termo da

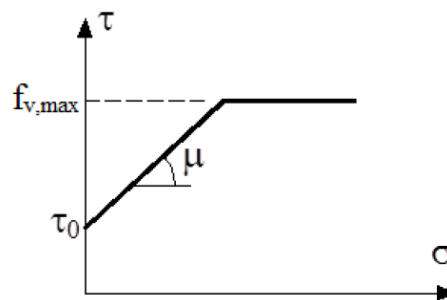
expressão e o termo que multiplica a tensão σ . Assim, caso se adote uma argamassa com resistência média de 4,0 MPa, por exemplo, têm-se: $f_{v,max} = 1,4$ MPa; $\tau_0 = 0,15$ MPa; $\mu = 0,5$.

Já para os modelos definitivos do capítulo 5 (seção 5.2), optou-se por realizar um procedimento mais refinado para determinação do parâmetro $f_{v,max}$: partindo das equações utilizadas para determinar a resistência ao cisalhamento da alvenaria e considerando a componente vertical da resultante de compressão diagonal, é possível se chegar na Equação 15. Destaca-se que, para se chegar na expressão a seguir, foi assumido que $f_{v,max}$ não pode superar a resistência ao cisalhamento da própria parede de alvenaria. Também foi desprezada a tensão vertical de compressão decorrente do peso próprio da parede, o que torna o resultado ligeiramente mais conservador. Assim, o parâmetro $f_{v,max}$ é função da coesão (τ_0), do coeficiente de atrito (μ) e do ângulo de inclinação da diagonal em relação à horizontal (θ).

$$f_{v,max} = \frac{\tau_0}{1 - \mu * tg\theta} \quad (15)$$

Dessa maneira, o gráfico da tensão resistente ao cisalhamento entre as superfícies (τ) em função da pressão de contato (σ) fica definido como apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Critério de resistência adotado para o cisalhamento entre as superfícies



Fonte: Montandon (2018).

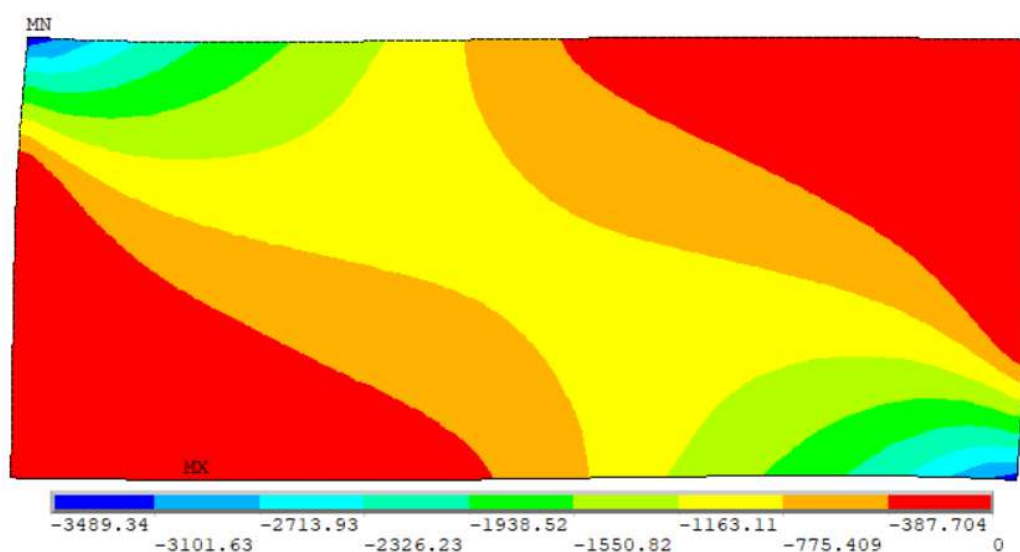
3.2.2 Resultados analisados nos modelos MEF

Neste trabalho, foram analisados os seguintes resultados extraídos dos modelos MEF: deslocamento horizontal do pórtico preenchido, tensões de compressão na alvenaria, força cortante e momento fletor atuantes nos elementos do pórtico. A seguir estão indicados os procedimentos adotados para a obtenção de cada resultado.

Com relação ao deslocamento horizontal do pórtico preenchido de cada modelo, este foi obtido diretamente pelos resultados fornecidos pelo ANSYS, sendo analisado no mesmo nó onde é aplicada a força horizontal.

As tensões de compressão na alvenaria também são obtidas diretamente no ANSYS, sendo analisadas as tensões normais principais que atuam na parede. Na Figura 18 está representado o resultado gerado pelo ANSYS para um dos modelos estudados neste trabalho, sendo possível perceber a esperada formação da diagonal comprimida na alvenaria. Foram analisadas as máximas tensões principais de compressão, que atuam nas extremidades da diagonal comprimida (atentando a uma possível região de concentração de tensões), e também as tensões principais de compressão que atuam no meio da parede (região central da diagonal comprimida).

Figura 18 – Tensões principais de compressão na alvenaria (kPa)



Fonte: Autor (2022).

Já com relação à força cortante e ao momento fletor atuantes nos pilares e nas vigas, os resultados não são obtidos diretamente do programa computacional utilizado, sendo necessário adotar um procedimento numérico para se chegar nos seus valores (via integração de tensões).

No ANSYS, é possível obter os resultados, nos pontos nodais, de tensões cisalhantes atuantes no plano xy , no qual se encontra o pórtico preenchido, bem como as tensões normais nas direções x e y atuantes em cada nó da malha de elementos finitos. Por meio das equações estudadas na Mecânica das Estruturas, é possível relacionar a força cortante (V) com a tensão

cisalhante no plano xy (τ_{xy}). Da mesma maneira, pode-se relacionar o momento fletor (M) com as tensões normais (σ_x ou σ_y).

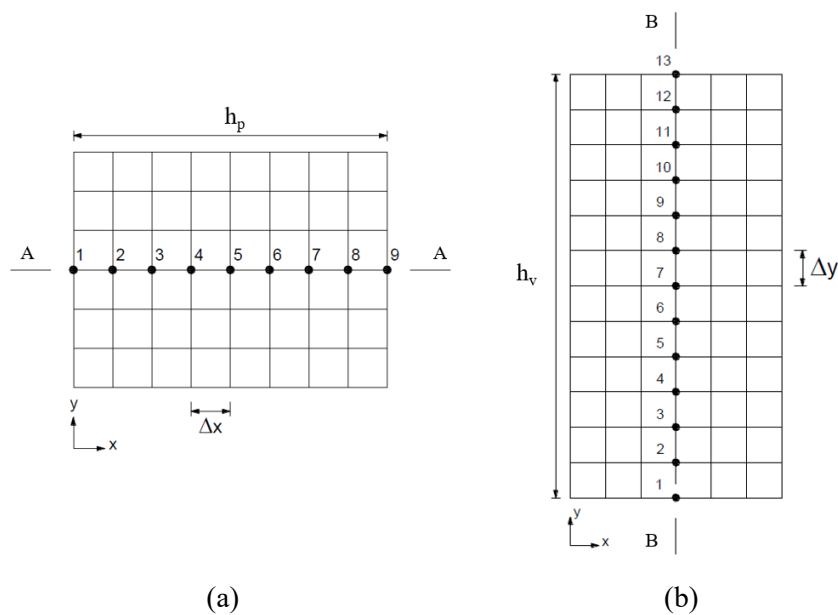
Para um pilar, essas relações são expressas pelas Equações 16 e 17, nas quais t representa a largura da seção analisada, x é a distância do centro de gravidade do elemento até o ponto analisado e h_p é a altura da seção transversal analisada do pilar (medida na direção x).

$$V = \int_0^{h_p} \tau_{xy} * t \, dx \quad (16)$$

$$M = \int_0^{h_p} \sigma_y * x * t \, dx \quad (17)$$

Empregando a Regra dos Trapézios, para a realização da integração numérica, e assumindo que t é constante na seção analisada, pode-se obter a força cortante (V) e o momento fletor (M) em uma seção genérica do pilar, exemplificada na Figura 19 (a), por meio das Equações 18 e 19, nas quais Δx representa o tamanho do elemento finito na direção x . Ressalta-se que $f(x)$ representa o produto entre σ_y e x .

Figura 19 – Seções genéricas dos elementos do pórtico: (a) Seção AA - pilar; (b) Seção BB - viga



Fonte: Autor (2022).

$$V = t * \frac{\Delta x}{2} * [\tau_{xy1} + 2 * \tau_{xy2} + 2 * \tau_{xy3} + \dots + 2 * \tau_{xy8} + \tau_{xy9}] \quad (18)$$

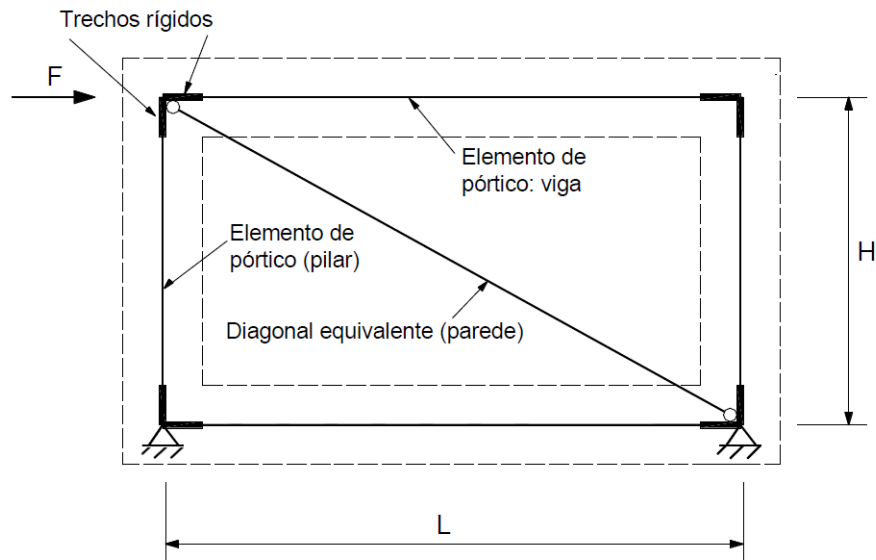
$$M = t * \frac{\Delta x}{2} * [f(x_1) + 2 * f(x_2) + 2 * f(x_3) + \dots + 2 * f(x_8) + f(x_9)] \quad (19)$$

De maneira análoga, pode-se obter as expressões para o cálculo de V e M para uma viga, nas quais serão utilizados os valores de σ_x , y , h_v e Δy , que são equivalentes aos parâmetros utilizados nas equações apresentadas para um pilar.

3.3 MODELOS MDE DE PÓRTICOS PREENCHIDOS

O Modelo de Diagonal Equivalente (MDE) clássico consiste em simular a parede de alvenaria por meio de uma barra diagonal comprimida (diagonal equivalente). Essa barra é definida nos pontos de encontro viga-pilar do pórtico, sendo rotulada em suas extremidades. Dessa forma, na Figura 20 está representado o esquema estático adotado para esse modelo.

Figura 20 – Esquema estático de pórtico preenchido simulado pelo MDE clássico

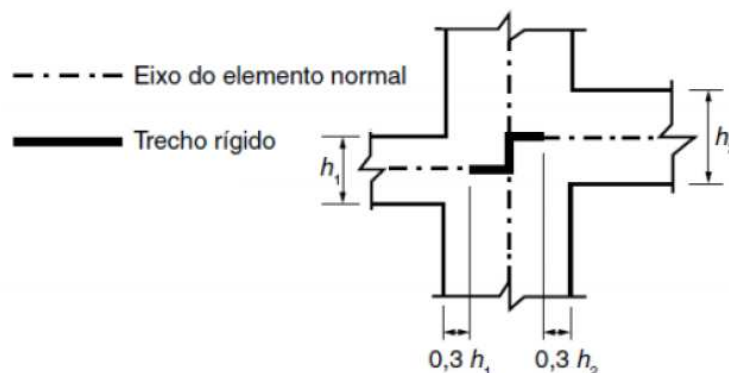


Fonte: Adaptado de Silva (2014).

Ressalta-se que foram adotados pórticos de concreto armado para todos os modelos analisados neste trabalho. Na modelagem dos pórticos, aderiu-se a recomendação da norma ABNT NBR 6118 (2014), que indica que “os trechos de elementos lineares pertencentes à região comum ao

cruzamento de dois ou mais elementos podem ser considerados rígidos (nós de dimensões finitas)”, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Trechos rígidos



Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

Para a consideração dos trechos rígidos, adotou-se o seguinte procedimento: suas posições foram definidas de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), sendo o momento de inércia à flexão desses trechos obtidos em função dos resultados fornecidos pelos modelos MEF. Essa obtenção teve o seguinte critério: a igualdade entre o deslocamento horizontal relativo, medido no ponto de aplicação da força horizontal, entre os modelos MDE e os modelos MEF sem a presença da alvenaria participante (MONTANDON, 2018).

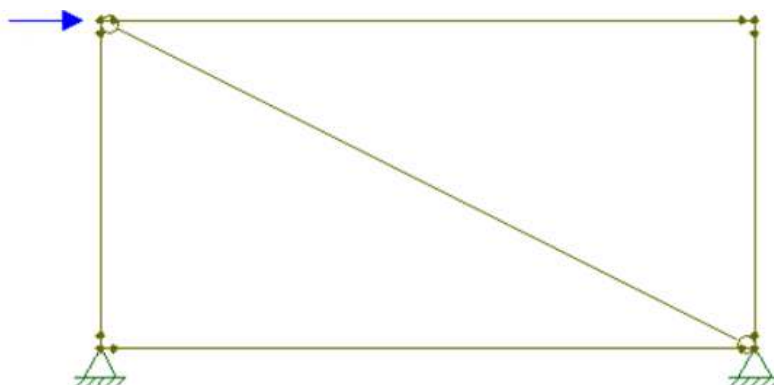
Com relação às propriedades da diagonal equivalente, foram adotadas as recomendações citadas para cada método de cálculo da largura da diagonal equivalente (expressões encontradas na literatura e recomendações normativas), conforme exposto no capítulo 2 deste trabalho.

Os resultados analisados nos modelos MDE foram os mesmos analisados nos modelos MEF. Destaca-se que, nos modelos MDE, com exceção da tensão de compressão atuante na alvenaria, os resultados foram obtidos diretamente do programa FTOOL (deslocamento horizontal, força cortante e momento fletor nos elementos do pórtico). Já em relação à tensão de compressão na alvenaria, foi calculada a tensão média na diagonal equivalente, por meio da razão entre a força normal atuante na barra e a área de sua seção transversal.

Na Figura 22 está ilustrado um dos modelos analisados neste trabalho, calculado no programa FTOOL. Destaca-se que, além de simular pórticos preenchidos com o MDE clássico (uma

diagonal definida nos pontos de encontro viga-pilar), também foram analisados modelos com múltiplas diagonais equivalentes, que serão abordados no capítulo 5.

Figura 22 – Modelo MDE clássico de pórtico preenchido no FTOOL



Fonte: Autor (2022).

3.3.1 Consideração da rigidez efetiva da diagonal equivalente

Para os modelos MDE em que se adotaram as recomendações da ABNT NBR 16868-1 (2020), se fez necessário realizar um procedimento para a consideração da rigidez efetiva da diagonal equivalente indicada pela referida norma.

Conforme exposto no capítulo 2, a norma brasileira recomenda a mesma expressão da norma canadense CSA S304 (2014) para o cálculo da rigidez efetiva da diagonal equivalente (Equação 11), com a substituição do parâmetro t_e por t_{ap} . Assim, é possível notar que a rigidez efetiva da diagonal é função do parâmetro l_s , que é obtido pela subtração do comprimento da diagonal (D) por sua largura efetiva (Equação 12).

Em programas computacionais de análise estrutural de pórticos, a rigidez axial de um elemento é representada por EA/L , onde A é a área da seção transversal, E é o módulo de elasticidade e L é o comprimento desse elemento (calculado a partir das coordenadas do nó inicial e do nó final do elemento). Dessa forma, no caso da diagonal equivalente, o comprimento considerado pelo programa é o comprimento total da barra (l_{DE}), definido entre os pontos de encontro dos eixos dos elementos do pórtico.

Com isso, para considerar a recomendação da ABNT NBR 16868-1 (2020) a respeito da rigidez efetiva da diagonal equivalente, foi proposto para este trabalho a inclusão de um coeficiente a

ser multiplicado na rigidez da diagonal equivalente no programa computacional FTOOL, de forma a relacionar os comprimentos l_s e l_{DE} mencionados anteriormente (para este trabalho, optou-se por multiplicar o valor do módulo de elasticidade a ser utilizado no programa). Atribuiu-se a letra grega β a esse coeficiente, que foi definido então como a razão entre l_{DE} e l_s . Dessa forma, se chegou a Equação 20 para a determinação de β , onde os parâmetros contidos na expressão já foram citados neste trabalho.

$$\beta = \frac{\sqrt{H^2 + L^2}}{\sqrt{h^2 + l^2} - w_{eff}} \quad (20)$$

Ressalta-se que a expressão anterior foi aplicada apenas para os modelos MDE clássicos (com uma diagonal) com as recomendações da ABNT NBR 16868-1 (2020). Para os modelos com múltiplas diagonais, a expressão sofre algumas alterações, que serão comentadas no capítulo 5.

4 MODELAGEM DE PÓRTICOS PREENCHIDOS: EFEITO DA ORTOTROPIA DA PAREDE

Um importante aspecto para a análise estrutural de pórticos preenchidos é com relação às propriedades mecânicas da alvenaria participante. A alvenaria é um material que apresenta um comportamento complexo, devido a suas propriedades de anisotropia e heterogeneidade (SANTOS, 2001), o que dificulta a definição dos parâmetros a serem adotados para os modelos numéricos.

Nesse contexto, usualmente, em simulações numéricas, a alvenaria é admitida como material de comportamento isotrópico, com a finalidade de simplificar o modelo, uma vez que se reduz o número de parâmetros a serem determinados. Tal procedimento foi adotado por Montandon (2018) e Queiroz (2020), em suas respectivas pesquisas, sendo fundamentados por conclusões provenientes de Doudoumis (2007).

Doudoumis (2007) analisou diversos parâmetros em seus modelos numéricos de pórticos preenchidos, dentre eles a consideração da alvenaria como um material de comportamento ortotrópico, ou seja, um material que apresenta propriedades físicas independentes em direções ortogonais. O autor concluiu que para pórticos preenchidos retangulares, nos quais a razão entre o vão teórico da viga (L) e a distância entre andares (H) for igual ou superior a 1,5 ($L/H \geq 1,5$), a consideração da ortotropia da parede não afeta de forma significativa o comportamento do pórtico preenchido, com alterações na rigidez lateral do conjunto inferiores a 5,5%. Assim, o autor sugere que, para pórticos com essa característica, a consideração da ortotropia pode ser ignorada, podendo a alvenaria ser tratada como um material isotrópico.

Outros trabalhos relacionados à consideração da alvenaria como material ortotrópico em pórticos preenchidos que merecem destaque são as pesquisas de El-Dakhakhni, Elgaaly e Hamid (2003) e Cavaleri *et al.* (2014).

El-Dakhakhni, Elgaaly e Hamid (2003) destacaram que uma boa aproximação para a consideração da anisotropia da parede de alvenaria é considerá-la como um material de comportamento ortotrópico. Para isso, os autores sugerem adotar como módulo de elasticidade na direção paralela às juntas horizontais (E_x) o valor de 70% do módulo de elasticidade na

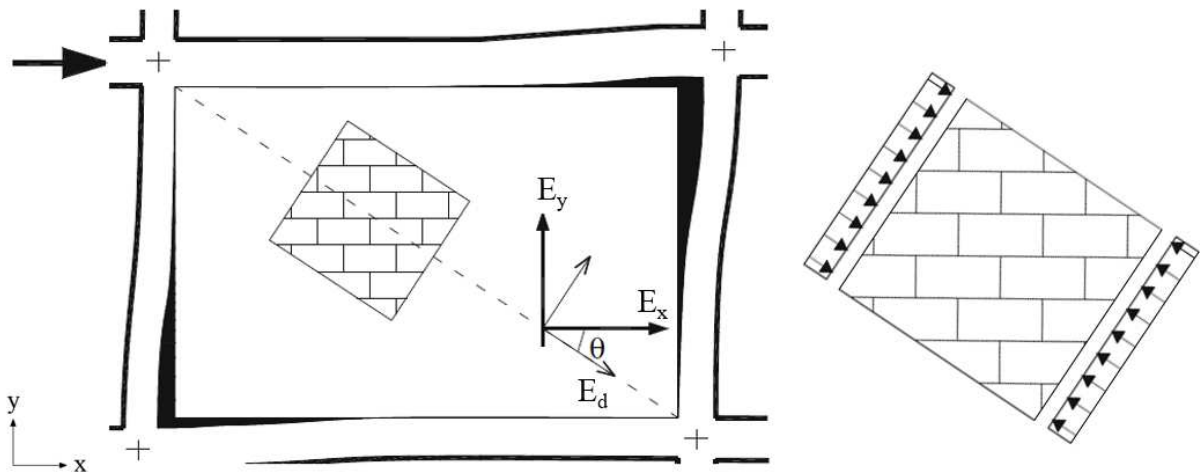
direção paralela às juntas verticais (E_y), que por sua vez é equivalente ao módulo de elasticidade usualmente empregado em análises que consideram a alvenaria como material isotrópico (E_a).

Cavaleri *et al.* (2014) realizaram experimentos com o intuito de definir as propriedades mecânicas das alvenarias a serem utilizadas nos Modelos de Diagonal Equivalente (MDE). Baseados na literatura disponível, a respeito de pórticos preenchidos submetidos a ações horizontais, os autores sugeriram uma expressão para o cálculo do módulo de elasticidade da alvenaria na direção diagonal (E_d), que foi obtida por meio de experimentos realizados com diferentes tipos de alvenaria. Além disso, para a obtenção da expressão, os autores consideraram a alvenaria como um material de comportamento ortotrópico. Dessa forma, o módulo de elasticidade E_d é obtido por meio da Equação 21, sendo dependente dos módulos E_x e E_y , do ângulo de inclinação da diagonal em relação à horizontal (θ), e também do módulo de elasticidade transversal (G) e coeficiente de Poisson (ν), ambos relativos ao plano xy .

$$\frac{1}{E_d} = \frac{1}{E_x} * (\cos \theta)^4 + \left[\frac{1}{G} - \frac{2 * \nu}{E_x} \right] * (\sin \theta * \cos \theta) + \frac{1}{E_y} * (\sin \theta)^4 \quad (21)$$

Na Figura 23 está representado o esquema para consideração do módulo de elasticidade da alvenaria na direção diagonal.

Figura 23 – Esquema para consideração do módulo E_d



Fonte: Adaptado de Cavaleri *et al.* (2014).

Tendo como embasamento os estudos citados anteriormente, foram elaborados modelos numéricos de pórticos preenchidos, com o emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Modelo de Diagonal Equivalente (MDE) clássico, considerando a alvenaria com comportamento ortotrópico e isotrópico, com o intuito de se analisar as diferenças obtidas com tais considerações.

4.1 MODELOS ANALISADOS

Os modelos analisados consistem em um pórtico de concreto armado isolado, preenchido com alvenaria participante, submetido a uma ação horizontal. Todos os modelos apresentam a mesma geometria e os mesmos materiais para compor o pórtico preenchido, sendo alterada apenas a consideração do comportamento do material da alvenaria: consideração da ortotropia/isotropia. Ressalta-se que o esquema estático do modelo, definição dos parâmetros e procedimentos utilizados para as modelagens estão descritos no capítulo 3 deste trabalho.

As características geométricas do pórtico preenchido adotadas para os modelos foram:

- Vão teórico da viga (L) = 6,0 m;
- Distância entre andares (H) = 3,0 m;
- Seção transversal dos pilares = 19 x 40 cm ($b_p \times h_p$);
- Seção transversal das vigas = 19 x 60 cm ($b_v \times h_v$);
- Espessura da parede (t) = 19 cm.

Com relação aos materiais, optou-se por utilizar um concreto com classe de resistência C25 para compor os elementos do pórtico, e bloco estrutural cerâmico de parede maciça, com resistência característica de compressão simples (f_{bk}) igual a 10 MPa para compor a alvenaria participante (bloco vazado não preenchido). Destaca-se que a escolha desse bloco foi realizada com base no trabalho de Galvão (2019). Assim, por meio dos procedimentos descritos no capítulo 3, obtiveram-se os parâmetros da Tabela 1 utilizados nos modelos.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados nos modelos

Material	E (MPa)	ν	μ	$f_{v,max}$ (MPa)	τ_0 (MPa)
Concreto	28000	0,20	-	-	-
Alvenaria	3600	0,15	0,5	1,7	0,35

Fonte: Autor (2022).

Com a definição da geometria e dos materiais a serem empregados nos modelos, foram realizadas as modelagens MEF e MDE. A seguir, estão descritos, de maneira sintetizada, os procedimentos adotados, que foram abordados nos capítulos 2 e 3 deste trabalho. Ressalta-se que as análises realizadas foram elásticas lineares, sem considerar reduções de rigidez nos elementos do pórtico e da alvenaria.

4.1.1 Modelos MEF

Por serem modelos com uma análise mais refinada (hierarquia superior), os modelos MEF foram considerados como referência para a comparação com os resultados fornecidos pelos modelos MDE. Foram elaborados dois modelos MEF, um com a consideração da ortotropia da alvenaria e outro com a consideração da isotropia.

O primeiro passo realizado foi calcular a força horizontal (F) a ser aplicada nos modelos. Para isso, primeiramente foi modelado apenas os elementos do pórtico de concreto (sem alvenaria) e aplicada uma força horizontal capaz de provocar um deslocamento horizontal igual a $H/850$ no seu ponto de aplicação. Foi encontrada uma força de 64,3 kN, que resultou em um deslocamento de 3,53 mm ($3000 \text{ mm}/850$). Assim, multiplicando a força encontrada por 4,67 vezes, obteve-se o valor de F a ser utilizada nos modelos, igual a 300 kN.

Em seguida, foi modelada a parede de alvenaria com suas propriedades mecânicas. Para o modelo no qual foi considerada a isotropia da alvenaria, as propriedades mecânicas foram as mesmas já exibidas na Tabela 1. Já no modelo em que se considerou a ortotropia da parede, se levou em consideração a recomendação de El-Dakhkhni, Elgaaly e Hamid (2003), adotando o valor de E_x como 70% do valor de E_y . Como não foram encontradas referências para os demais parâmetros relacionados às propriedades mecânicas para consideração da ortotropia da alvenaria, optou-se por utilizar o mesmo valor de coeficiente de Poisson (ν) e de módulo de elasticidade transversal (G) – que pode ser calculado por equações da Mecânica das Estruturas – para todas as direções; Dessa forma, o único parâmetro que foi alterado para a consideração da ortotropia nos modelos MEF foi o módulo E_x .

Assim, os parâmetros utilizados no modelo com a consideração da ortotropia da alvenaria estão representados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados na consideração da ortotropia nos modelos MEF

Material	E_x (MPa)	E_y (MPa)	G (MPa)	ν
Alvenaria	2520	3600	1565	0,15

Fonte: Autor (2022).

Por fim, foi realizada a modelagem do contato entre os elementos do pórtico e da alvenaria para ambos os modelos. Ressalta-se que também foram seguidos os procedimentos descritos no capítulo 3, no qual se busca calibrar o fator FKN com o intuito de se obter a menor penetração possível entre as superfícies, mantendo-se a convergência numérica. No modelo com a consideração da ortotropia da alvenaria, o valor encontrado para o fator FKN foi de 0,037, que resultou em uma penetração de 0,437 mm. Já para o modelo com a consideração da isotropia, o fator FKN foi de 0,043 e resultou em uma penetração de 0,417 mm.

4.1.2 Modelos MDE

Para os modelos MDE, o primeiro passo consistiu em obter as propriedades geométricas dos trechos rígidos dos elementos do pórtico. Para isso, inicialmente foi modelado apenas os elementos do pórtico de concreto (sem alvenaria), limitando o comprimento dos trechos rígidos de acordo com as recomendações da ABNT NBR 6118 (2014). Feito isso, os trechos rígidos tiveram seus respectivos momentos de inércia a flexão determinados de forma a se obter o mesmo deslocamento encontrado no modelo MEF, sem a presença da alvenaria, com a aplicação da força horizontal F com valor de 300 kN. Ressalta-se que o deslocamento horizontal foi medido no exato ponto de aplicação de F em ambos os modelos.

Em sequência, foram definidos os métodos de cálculo para a obtenção das propriedades da diagonal equivalente. Optou-se pelo MDE clássico, com apenas uma diagonal equivalente, cujas propriedades foram obtidas a partir das expressões indicadas no Quadro 1 e das recomendações das normas CSA S304 (2014) e ABNT NBR 16868-1 (2020), dispostas no capítulo 2 deste trabalho.

Para as expressões indicadas no Quadro 1, a largura da diagonal equivalente a ser utilizada é o valor de w , calculado pela expressão proposta por cada autor, enquanto que a espessura da diagonal equivalente é adotada como a espessura total da parede (t).

Nos modelos em que se seguiram as recomendações das normas CSA S304 (2014) e ABNT NBR 1686-1 (2020), a largura da diagonal equivalente é igual ao valor de w_{eff} . Já a espessura da diagonal equivalente é calculada de maneira diferente para as duas normas (foi considerado bloco estrutural vazado não totalmente grauteado): a norma canadense indica a espessura efetiva da parede (t_e), enquanto a norma brasileira indica a espessura t_{ap} , sendo ambas dependentes das características das paredes longitudinais do bloco utilizado como alvenaria. Como foi adotado o bloco estrutural cerâmico de parede maciça, com f_{bk} igual a 10 MPa para os modelos analisados, por meio do Quadro 3 (capítulo 2), foi considerado que o bloco possui duas paredes longitudinais com espessura igual a 2,2 cm cada. Assim, a espessura t_e equivale a 4,4 cm, enquanto a espessura t_{ap} equivale a 8,8 cm. Ainda com relação a esses modelos, foi utilizado o coeficiente para consideração da rigidez efetiva da diagonal proposto neste trabalho, denominado de β . Ressalta-se que não foi considerado o fator de redução de rigidez ϕ_{st} , recomendado por ambas as normas para a consideração da fissuração da alvenaria. Da mesma forma, não se empregou qualquer redução na rigidez à flexão de vigas e pilares. Assim, as análises consideraram os materiais com comportamento elástico-linear.

Por fim, para consideração das propriedades mecânicas da alvenaria em cada modelo, adotou-se o seguinte: para os modelos com a consideração da ortotropia da alvenaria, utilizou-se o módulo E_d , calculado por meio da Equação 21, proposta por Cavaleri *et al.*, levando em consideração a recomendação de El-Dakhkhni, Elgaaly e Hamid (2003); já para os modelos com a consideração da isotropia, utilizou-se o valor indicado na Tabela 1; com relação ao coeficiente de Poisson, para todos os modelos se adotou o valor também indicado na Tabela 1.

Dessa forma, as propriedades adotadas em cada modelo MDE estão dispostas na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Propriedades da Diagonal Equivalente (DE)

Método de cálculo	Largura DE (cm)	Espessura DE (cm)	E_d (MPa) Ortotropia	E_a (MPa) Isotropia	β
Mainstone (1974)	64,72	19	2793	3600	-
Hendry (1981)	236,48	19	2793	3600	-
Liau e Kwan (1984)	112,28	19	2793	3600	-
Decanini e Fantin (1987): não fissurada	182,60	19	2793	3600	-
Decanini e Fantin (1987): fissurada	129,74	19	2793	3600	-
Paulay e Priestley (1992)	152,32	19	2793	3600	-
Durrani e Luo (1994)	84,92	19	2793	3600	-
Chrysostomou e Asteris (2012)	99,85	19	2793	3600	-
Montandon (2018)	84,17	19	2793	3600	-
Norma Canadense CSA 304 (2014)	152,32	4,4	2793	3600	1,468
ABNT NBR 16868-1 (2020)	152,32	8,8	2793	3600	1,468

Fonte: Autor (2022).

4.2 RESULTADOS

Para os modelos simulados neste capítulo, optou-se por analisar os resultados de deslocamentos horizontais do pórtico preenchido e as tensões de compressão atuantes na parede de alvenaria.

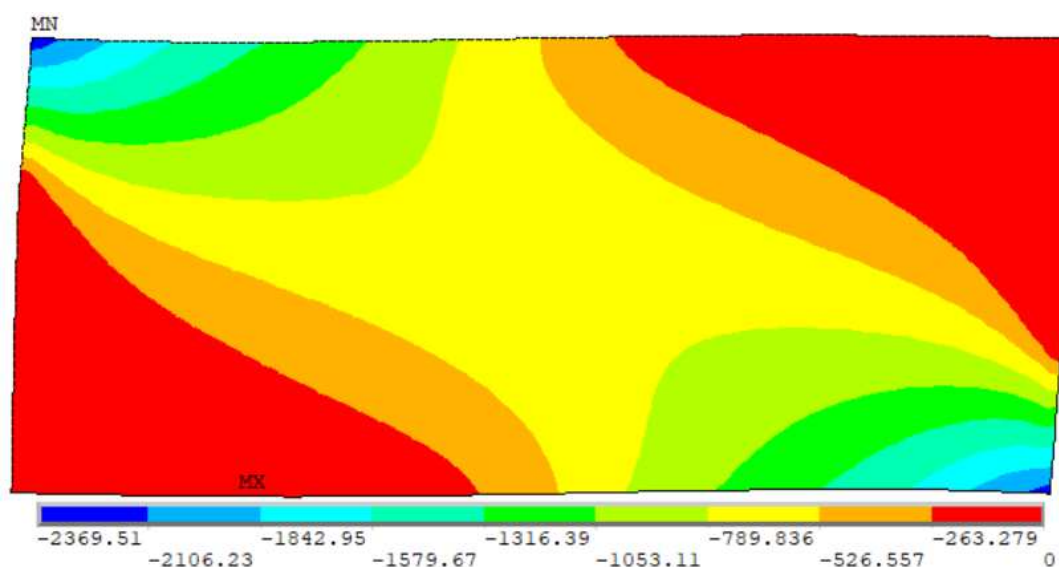
Ressalta-se que, nos modelos MEF, se analisou a máxima tensão principal de compressão na alvenaria, que foi obtida após descartar os valores de tensões nos nós situados próximos ao encontro do pilar com a viga, devido ao efeito de concentrações de tensões. Como exemplo, na Figura 24 estão ilustradas as tensões principais de compressão atuantes na parede que foram obtidas para o modelo com a consideração da ortotropia da alvenaria. Já com relação aos modelos MDE, a tensão de compressão analisada foi obtida pela razão entre a força de compressão atuante na diagonal equivalente e a área de sua seção transversal, podendo ser tratada como tensão média de compressão atuante na diagonal equivalente.

Os resultados obtidos para cada modelo analisado estão dispostos na Tabela 4. Para simplificar a exibição dos dados, optou-se por atribuir um número a cada modelo MDE, vinculado ao método de cálculo utilizado. Dessa forma, têm-se:

- (1) Mainstone (1974);
- (2) Hendry (1981);
- (3) Liauw e Kwan (1984);
- (4) Decanini e Fantin (1987): não fissurada;

- (5) Decanini e Fantin (1987): fissurada;
- (6) Paulay e Priestley (1992);
- (7) Durrani e Luo (1994);
- (8) Chrysostomou e Asteris (2012);
- (9) Montandon (2018);
- (10) Norma Canadense CSA 304 (2014)
- (11) ABNT NBR 16868-1 (2020)

Figura 24 – Tensões de compressão na alvenaria para o modelo MEF – Ortotropia (kPa)



Fonte: Autor (2022).

Tabela 4 – Comparação de resultados: MEF e MDE

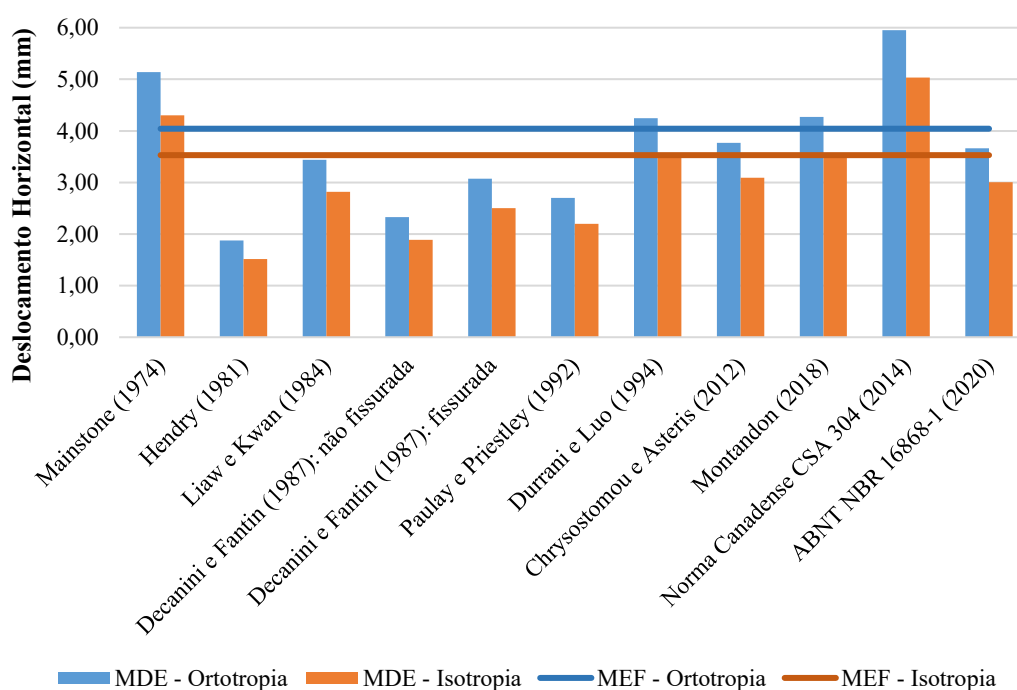
Modelo	Deslocamento Horizontal (mm)			Tensão de Compressão (MPa)		
	Ortotropia	Isotropia	Diferença	Ortotropia	Isotropia	Diferença
MEF	4,04	3,53	13%	1,84	2,07	-13%
MDE (1)	5,14	4,30	16%	1,88	2,02	-7%
MDE (2)	1,88	1,51	19%	0,66	0,68	-2%
MDE (3)	3,44	2,82	18%	1,25	1,31	-5%
MDE (4)	2,33	1,89	19%	0,83	0,86	-3%
MDE (5)	3,07	2,51	19%	1,11	1,16	-4%
MDE (6)	2,70	2,20	19%	0,97	1,01	-4%
MDE (7)	4,25	3,51	17%	1,55	1,64	-6%
MDE (8)	3,77	3,09	18%	1,37	1,44	-5%
MDE (9)	4,27	3,53	17%	1,56	1,65	-6%
MDE (10)	5,95	5,03	15%	3,21	3,49	-9%
MDE (11)	3,66	3,01	18%	1,95	2,05	-5%

Fonte: Autor (2022).

Ressalta-se que, para o cálculo da diferença percentual, entre os valores encontrados para os modelos com a consideração da ortotropia/isotropia (Tabela 4), assumiu-se como referência os resultados obtidos nos modelos em que a alvenaria foi tratada como material de comportamento ortotrópico, visto que essa consideração mais se aproxima das propriedades anisotrópicas do material. Assim, uma diferença percentual negativa indica que a consideração da ortotropia fornece menores resultados que quando comparados à consideração da isotropia e vice-versa.

Com os resultados exibidos na Tabela 4, foram elaborados os gráficos dispostos nas Figuras 25 e 26, comparando-se os deslocamentos horizontais e as tensões de compressão na alvenaria obtidos para cada modelo.

Figura 25 – Deslocamento horizontal em cada modelo

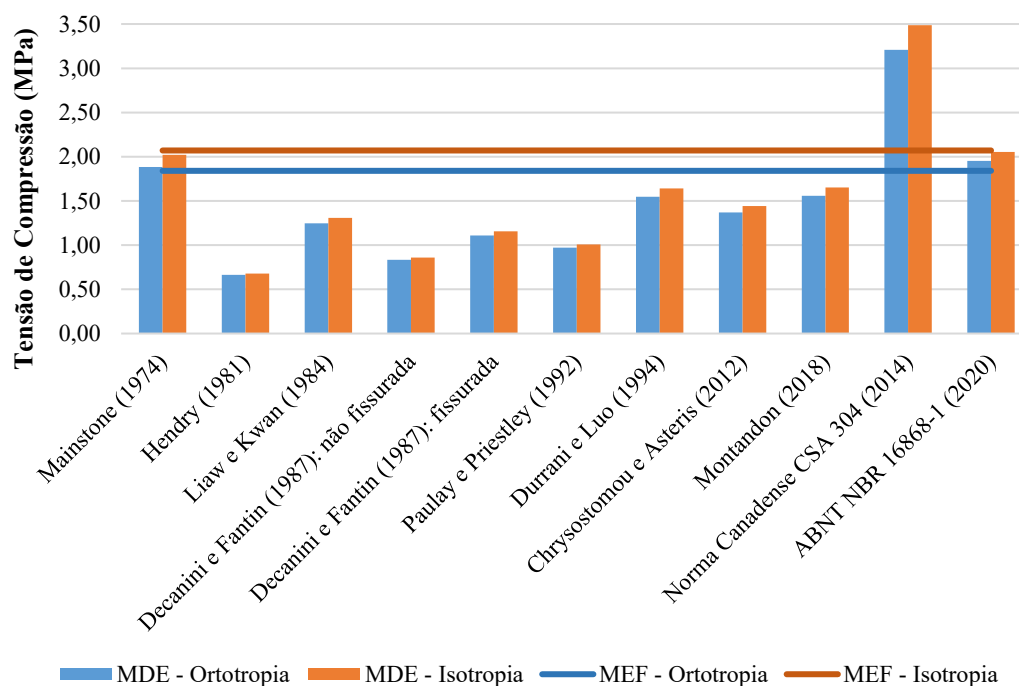


Fonte: Autor (2022).

Primeiramente, analisando os resultados obtidos nos modelos MEF, foi possível chegar a uma importante conclusão para o pórtico preenchido estudado: a consideração da alvenaria como um material de comportamento ortotrópico resultou em diferenças de 13%, tanto para o deslocamento horizontal (que foi maior no modelo com a consideração da ortotropia), quanto para a máxima tensão principal de compressão atuante na parede (que foi menor no modelo com a consideração da ortotropia). Dessa forma, mesmo o pórtico apresentando uma relação

$L/H \geq 1,5$ (6,0 m/3,0 m), considerar o efeito da ortotropia levou a diferenças significativas de resultados, diferentemente do que ocorreu nos modelos simulados por Doudoumis (2007).

Figura 26 – Tensão de compressão na alvenaria em cada modelo



Fonte: Autor (2022).

Com relação aos modelos MDE, para todas as expressões analisadas o comportamento foi semelhante: os modelos com a consideração da ortotropia da alvenaria apresentaram deslocamentos horizontais maiores (diferença entre 15% e 19%) e tensões de compressão na diagonal menores (diferenças entre 2% e 9%), quando comparados aos modelos com a consideração da isotropia.

Destaca-se que esse comportamento observado nos modelos MEF e MDE é condizente com a alteração de rigidez da alvenaria que foi aplicada nos modelos com a consideração da ortotropia. Tanto para o modelo MEF (com a consideração de um menor módulo de elasticidade na direção x), quanto para os modelos MDE (com a consideração do módulo de elasticidade E_d) a rigidez da alvenaria com a consideração da ortotropia é menor do que com a consideração da isotropia. Dessa forma, é de se esperar uma menor contribuição da parede na resistência do pórtico preenchido, ocasionando menores tensões de compressão na alvenaria e maiores deslocamentos horizontais no pórtico, conforme foi observado nos modelos analisados.

Comparando os resultados obtidos nos modelos MDE, com os obtidos nos modelos MEF (modelos de referência), foi possível analisar quais expressões para o cálculo da largura da diagonal equivalente se comportaram melhor para o pórtico preenchido com as propriedades estudadas neste capítulo. Com relação aos deslocamentos horizontais, as expressões de Durrani e Luo (1994) e Montandon (2018) foram as que apresentaram os resultados mais próximos aos obtidos nos modelos MEF em ambas as abordagens (ortotropia e isotropia da alvenaria), salientando-se que as expressões de Chrysostomou e Asteris (2012) e da ABNT NBR 16868-1 (2020) também apresentaram resultados próximos aos de referência. Com relação às tensões de compressão na alvenaria, as expressões de Mainstone (1974) e da ABNT NBR 16868-1 (2020) foram as que forneceram tensões de compressão na diagonal mais próximas da máxima tensão principal de compressão obtida nos modelos MEF.

Por fim, foi possível observar que o efeito da consideração da ortotropia da alvenaria, modelado por meio das referências citadas neste capítulo, foi significativo para o pórtico preenchido analisado, tanto nos modelos MEF (analisando o deslocamento horizontal do pórtico e a máxima tensão principal de compressão da alvenaria), quanto nos modelos MDE (analisando o deslocamento horizontal do pórtico). Com relação às tensões de compressão na diagonal dos modelos MDE, o efeito da consideração da ortotropia forneceu diferenças menores.

5 MODELAGEM DE PÓRTICOS PREENCHIDOS: MÚLTIPLAS DIAGONAIS EQUIVALENTES

Conforme já evidenciado pela literatura, em pórticos preenchidos submetidos a ações horizontais, a parede de alvenaria apresenta um comportamento de biela comprimida diagonalmente. Nesse contexto, o Modelo de Diagonal Equivalente (MDE) é a técnica analítica mais estudada pelos pesquisadores, sendo inclusive indicada por diferentes códigos normativos ao redor do mundo, devido a simplicidade de sua aplicação. O MDE mais difundido consiste em simular a parede por meio de uma barra diagonal comprimida (diagonal equivalente), definida nos pontos de encontro entre os pilares e as vigas do pórtico e rotulada em suas extremidades, sendo denominado como MDE clássico.

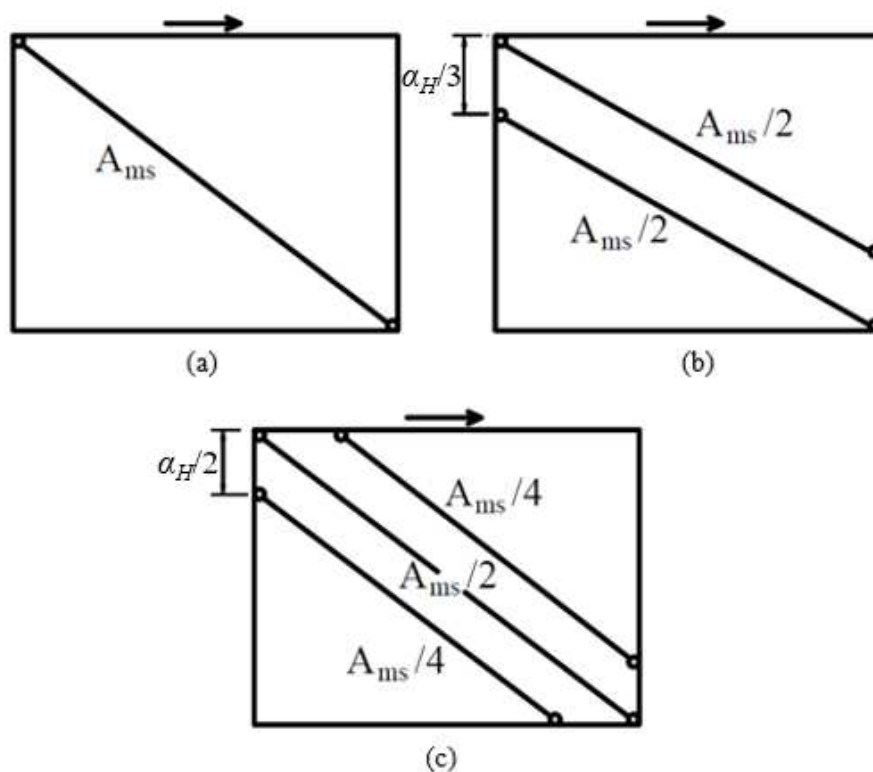
Entretanto, apesar de ser um modelo que possui precisão comprovada por vários estudos, principalmente no comportamento global dos pórticos preenchidos, o MDE clássico não consegue simular de maneira adequada os efeitos locais em todos os elementos constituintes do sistema, especialmente quando se trata dos esforços de cisalhamento e momentos fletores atuantes nos pilares e nas vigas em contato com a parede (YEKRANGNIA e MOHAMMADI, 2017). Isso pode ser explicado pelo fato de que o posicionamento da diagonal equivalente, no MDE clássico, não leva em consideração os comprimentos onde o pórtico e a parede estarão efetivamente em contato, região onde tais elementos estarão submetidos a uma pressão de contato que interfere na distribuição dos esforços solicitantes dos pilares e das vigas. Essa pressão de contato está ilustrada na Figura 16, conforme exposto no capítulo 3 deste trabalho.

Com o intuito de se obter modelos que consigam representar de maneira mais precisa o comportamento abordado anteriormente, pesquisas como as de El-Dakhkhni, Elgaaly e Hamid (2003), Crisafulli e Carr (2007) e Yekrangnia e Mohammadi (2017) apresentaram modelos com múltiplas diagonais equivalentes, nos quais a parede de alvenaria é simulada por duas ou três barras diagonais. Diferentemente do MDE clássico, no qual a única barra diagonal é definida entre os pontos de encontro viga-pilar, os modelos com múltiplas diagonais apresentam diagonais excêntricas, ou seja, que estão definidas com uma certa excentricidade em relação ao nó do pórtico. Destaca-se que, nos modelos com múltiplas diagonais, tais excentricidades afetam de maneira significativa a rigidez lateral da estrutura (CRISAFULLI E CARR, 2007), sendo parâmetros importantes a serem definidos.

Diante do que foi exposto, o objetivo deste capítulo consiste em propor um procedimento para a elaboração de modelos com duas e três diagonais equivalentes, que seja de simples aplicação, e avaliar o comportamento desses modelos comparando com resultados de referência, obtidos via Método dos Elementos Finitos (MEF) e via modelos MDE clássico. O procedimento foi elaborado com base em modelos analisados por Crisafulli e Carr (2007).

Na Figura 27 estão representados os MDE analisados por Crisafulli e Carr (2007). A área total da seção transversal das diagonais equivalentes foi considerada igual em todos os modelos, adotando as seguintes considerações: no MDE com duas diagonais, ambas possuem a mesma área de seção transversal, equivalente à metade da área da barra no MDE clássico; no MDE com três diagonais, a área da seção transversal da diagonal central foi adotada como sendo o dobro das diagonais excêntricas, conforme ilustrado na Figura 27 (c). Com relação ao posicionamento das diagonais excêntricas, os autores consideraram os valores das excentricidades iguais a frações do comprimento de contato (α_H) estimado pelas fórmulas de Stafford-Smith e Carter (1969) e Hendry (1981), citadas no capítulo 2.

Figura 27 – MDE: (a) Clássico – uma diagonal equivalente; (b) Duas diagonais; (c) Três diagonais



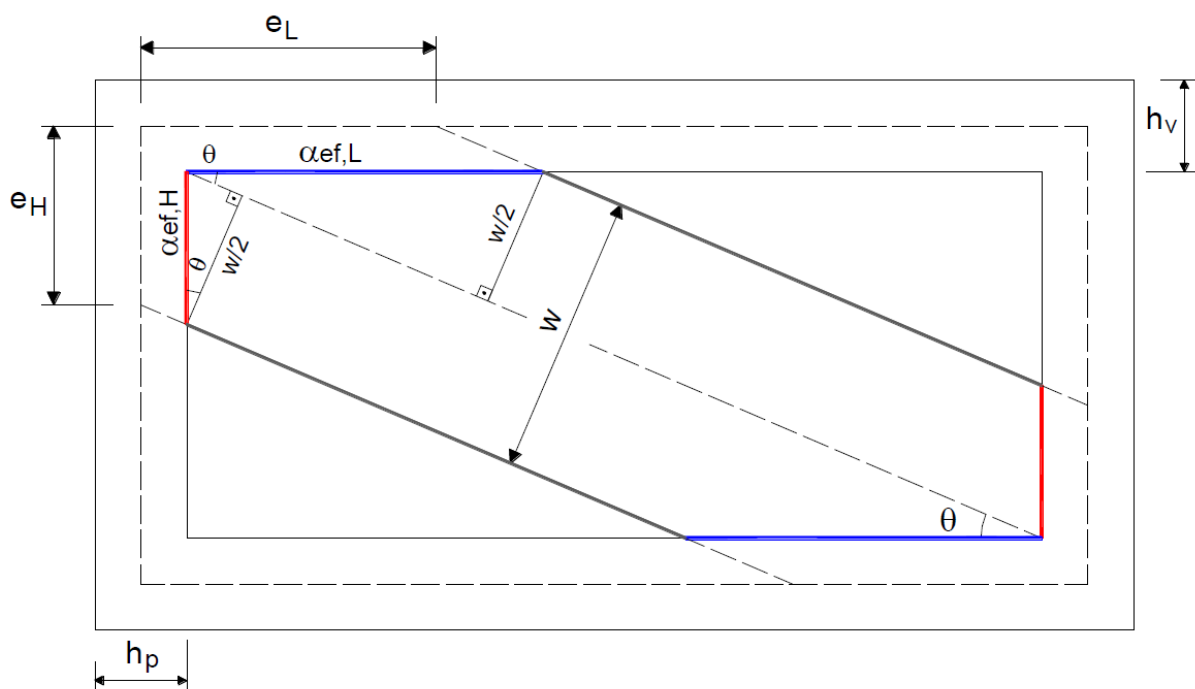
Fonte: Adaptado de Crisafulli e Carr (2007).

Para o procedimento proposto no presente trabalho, a distribuição das diagonais e o quinhão de áreas de seção transversal dessas diagonais foram mantidas as mesmas dos modelos de Crisafulli e Carr (2007). Já com relação ao cálculo das excentricidades, optou-se por uma proposta diferente, que será abordado a seguir. Essa opção se baseou em conclusões obtidas por Montandon (2018), que observou, em seu trabalho, que os comprimentos de contato fornecidos pelas expressões de Hendry (1981) foram significativamente maiores aos observados em seus modelos de referência, simulados via MEF.

Dessa forma, propõe-se neste trabalho que as excentricidades das barras diagonais sejam calculadas em função da largura da diagonal equivalente (w), que por sua vez pode ser calculada por diferentes expressões e procedimentos disponíveis na literatura e em códigos normativos.

Considerando o pórtico preenchido representado na Figura 28, que possui uma diagonal equivalente com largura igual a w e ângulo de inclinação igual a θ , a obtenção dos comprimentos de contato efetivos entre o pilar e a parede ($\alpha_{ef,H}$) e entre a viga e a parede ($\alpha_{ef,L}$) é realizada por meio de cálculos geométricos (propriedades de triângulos retângulos). Definidos esses parâmetros, as excentricidades e_H e e_L são obtidas por geometria, sendo também dependentes das alturas da seções transversais do pilar (h_p) e da viga (h_v).

Figura 28 – Parâmetros para o cálculo das excentricidades



Fonte: Autor (2022).

Assim, as expressões para os cálculos dos parâmetros $\alpha_{ef,H}$, $\alpha_{ef,L}$, e_H e e_L estão apresentadas nas Equações 22 à 25.

$$\alpha_{ef,H} = \frac{w}{2 * \cos \theta} \quad (22)$$

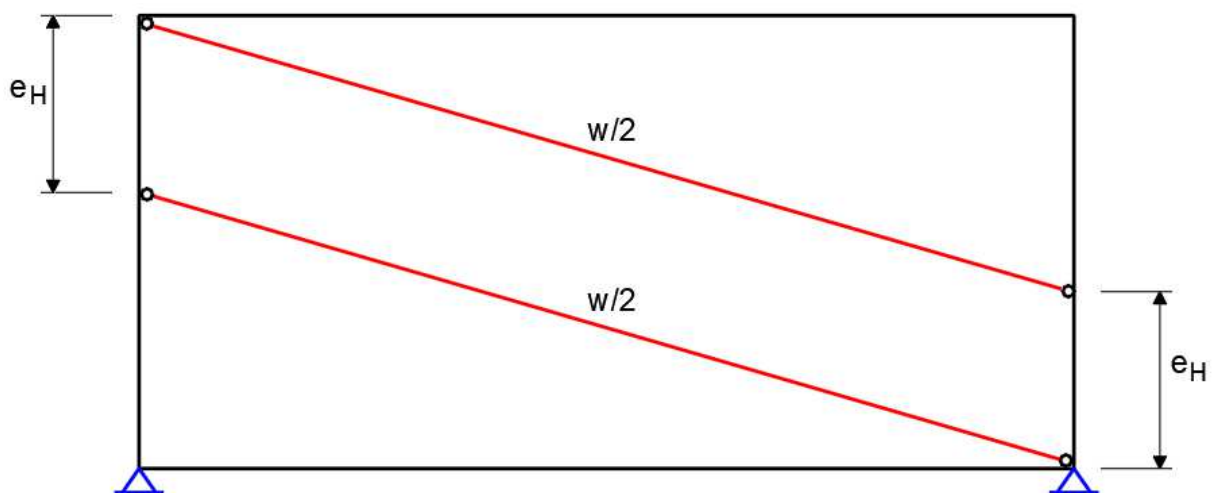
$$\alpha_{ef,L} = \frac{w}{2 * \sin \theta} \quad ou \quad \frac{\alpha_{ef,H}}{\tan \theta} \quad (23)$$

$$e_H = \frac{h_v}{2} + \alpha_{ef,H} - \frac{h_p}{2} * \tan \theta \quad (24)$$

$$e_L = \frac{h_p}{2} + \alpha_{ef,L} - \frac{h_v}{2 * \tan \theta} \quad (25)$$

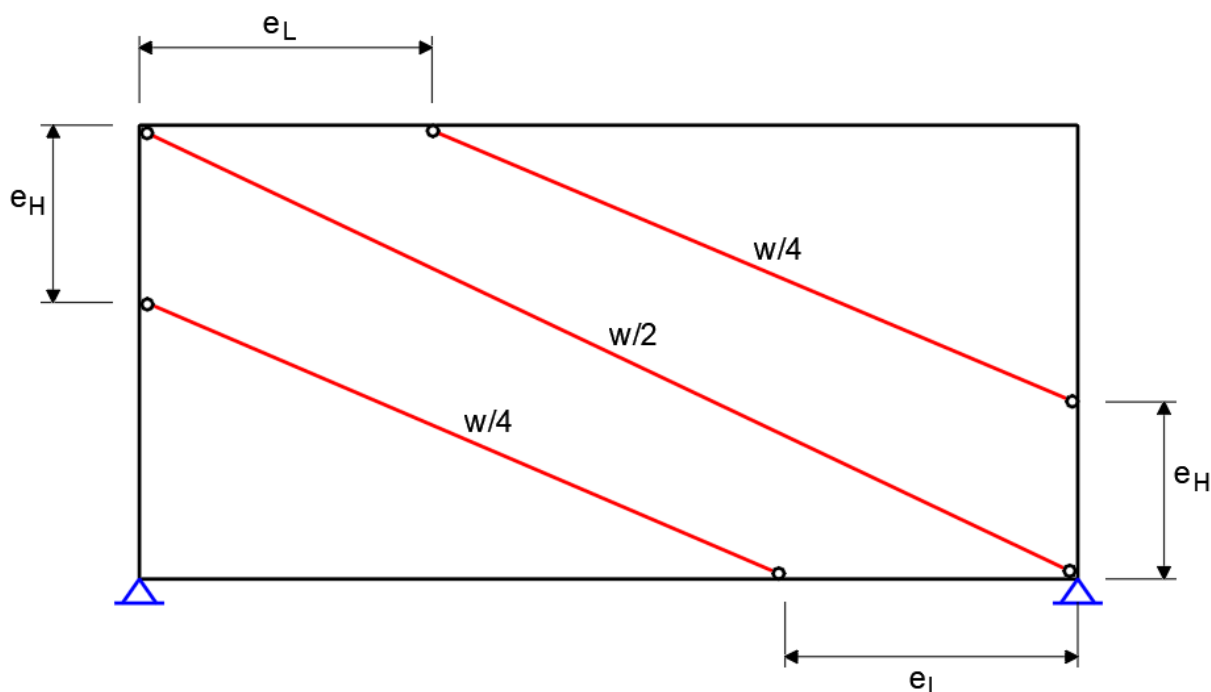
Com a definição das excentricidades, o posicionamento das diagonais equivalentes nos modelos de duas e três diagonais estão representados nas Figuras 29 e 30, respectivamente. Ressalta-se que, foi definido que todas as diagonais equivalentes possuem a mesma espessura. Além disso, destaca-se que todas as diagonais equivalentes são rotuladas em suas extremidades e possuem as mesmas propriedades mecânicas.

Figura 29 – Modelo com duas diagonais equivalentes



Fonte: Autor (2022).

Figura 30 – Modelo com três diagonais equivalentes



Fonte: Autor (2022).

Logo, para aplicação do procedimento proposto, se faz necessário a definição de qual método de cálculo utilizar para a obtenção das propriedades das diagonais equivalentes. Com base nas pesquisas de Montandon (2018) e Queiroz (2020), optou-se por utilizar as expressões de Mainstone (1974) e Durrani e Luo (1994) para o cálculo da largura da diagonal equivalente (expressões que apresentaram melhores resultados). Além disso, também foi escolhido o procedimento proposto pela ABNT NBR 16868-1 (2020), por ser o código normativo brasileiro que aborda sobre o assunto. Portanto, foram definidos três diferentes métodos de cálculo para aplicação do MDE clássico e do modelo de múltiplas diagonais a serem analisados neste capítulo: Mainstone (1974), Durrani e Luo (1994) e ABNT NBR 16868-1 (2020).

Com relação aos modelos que seguem os procedimentos da ABNT NBR 16868-1 (2020), destaca-se que, conforme apresentado na seção 3.3.1 deste trabalho, foi proposto a utilização do coeficiente β , para consideração da rigidez efetiva da diagonal. Para os modelos com duas e três diagonais, são apresentadas, a seguir, expressões para o cálculo desse coeficiente, de forma análoga à expressão utilizada no MDE clássico. Assim, para o modelo com duas diagonais, tem-se a seguinte expressão, válida para ambas as diagonais:

$$\beta = \frac{\sqrt{(H - e_H)^2 + L^2}}{\sqrt{(h - \alpha_{ef,H})^2 + l^2 - \frac{w_{eff}}{2}}} \quad (26)$$

Já para o modelo com três diagonais, a expressão para a diagonal central é diferente da expressão para as diagonais excêntricas. Para a diagonal central, o coeficiente é obtido pela Equação 27, enquanto para as diagonais excêntricas utiliza-se a Equação 28.

$$\beta = \frac{\sqrt{H^2 + L^2}}{\sqrt{h^2 + l^2 - \frac{w_{eff}}{2}}} \quad (27)$$

$$\beta = \frac{\sqrt{(H - e_H)^2 + (L - e_L)^2}}{\sqrt{(h - \alpha_{ef,H})^2 + (l - \alpha_{ef,L})^2 - \frac{w_{eff}}{4}}} \quad (28)$$

As análises numéricas desenvolvidas neste capítulo foram divididas em dois grupos: modelos preliminares, nos quais se buscou apresentar e avaliar, de maneira inicial, o procedimento proposto para modelos com múltiplas diagonais equivalentes; e os modelos definitivos, nos quais se busca obter conclusões referentes aos modelos desenvolvidos frente a variação de diferentes parâmetros do pórtico preenchido.

Destaca-se que, para todos os modelos analisados neste capítulo, a alvenaria foi considerada como material de comportamento ortotrópico, seguindo os procedimentos descritos no capítulo 4. Além disso, as análises realizadas também foram elásticas lineares, sem considerar reduções de rigidez nos elementos do pórtico e da alvenaria.

5.1 MODELOS PRELIMINARES

Foi considerado que todos os modelos preliminares apresentam as mesmas características geométricas do pórtico preenchido analisado no capítulo 4, além das mesmas propriedades mecânicas adotadas para o concreto dos elementos que compõem o pórtico. Assim, se alterou apenas o bloco estrutural que compõe a alvenaria participante em cada modelo. Dessa forma, têm-se os seguintes parâmetros definidos:

- Vão teórico da viga (L) = 6,0 m;
- Distância entre andares (H) = 3,0 m;
- Seção transversal dos pilares = 19 x 40 cm ($b_p \times h_p$);
- Seção transversal das vigas = 19 x 60 cm ($b_v \times h_v$);
- Espessura da parede (t) = 19 cm;
- Concreto C25: $E_c = 28000$ MPa, $\nu = 0,20$;
- Força horizontal aplicada nos modelos (F) = 300 kN.

Com relação ao material que constitui a alvenaria participante, optou-se por utilizar seis diferentes blocos estruturais (blocos vazados não preenchidos com graute), indicados na Tabela 5. A nomenclatura adotada para cada modelo foi definida pelo tipo de bloco, resistência característica de compressão simples do bloco (f_{bk}) e alturas das seções transversais dos pilares e das vigas, medidas no plano do pórtico preenchido (h_p e h_v).

Tabela 5 – Blocos estruturais adotados para os modelos preliminares

Modelo	Tipo de bloco	f_{bk} (MPa)
BVC04P40V60	Bloco vazado de concreto	4,0
BVC14P40V60	Bloco vazado de concreto	14,0
BVC24P40V60	Bloco vazado de concreto	24,0
BCPV04P40V60	Bloco cerâmico de parede vazada	4,0
BCPM10P40V60	Bloco cerâmico de parede maciça	10,0
BCPM18P40V60	Bloco cerâmico de parede maciça	18,0

Fonte: Autor (2022).

Os parâmetros relacionados à alvenaria a serem empregados nos modelos MEF e MDE foram obtidos de maneira análoga à descrita no capítulo 4 e estão representados na Tabela 6. Ressalta-se que, a espessura t_{ap} é calculada de acordo com as características das paredes longitudinais do bloco estrutural utilizado, sendo aplicada somente nos modelos MDE calculados de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 16868-1 (2020). Nos modelos calculados conforme as expressões de Mainstone (1974) e Durrani e Luo (1994), é considerada a espessura total da parede (t), conforme já comentado neste trabalho.

Tabela 6 – Parâmetros utilizados nos modelos preliminares

Modelo	E_x (MPa)	E_y (MPa)	ν	μ	$f_{v,max}$ (MPa)	τ_0 (MPa)	E_d (MPa)	t_{ap} (cm)
BVC04P40V60	1792	2560	0,20	0,5	1,4	0,15	1995	10,0
BVC14P40V60	5488	7840	0,20	0,5	1,7	0,35	6109	10,0
BVC24P40V60	7560	10800	0,20	0,5	1,7	0,35	8415	10,0
BCPV04P40V60	840	1200	0,15	0,5	1,4	0,15	931	6,4
BCPM10P40V60	2520	3600	0,15	0,5	1,7	0,35	2793	8,8
BCPM18P40V60	4536	6480	0,15	0,5	1,7	0,35	5027	12,0

Fonte: Autor (2022).

De acordo com o que já foi mencionado, para os modelos MDE, se utilizou três diferentes métodos de cálculo para a definição das propriedades das diagonais equivalentes: Mainstone (1974), Durrani e Luo (1994) e ABNT NBR 16868-1 (2020). Para cada um desses métodos, foram elaborados modelos com uma, duas e três diagonais equivalentes, de acordo com o procedimento proposto neste capítulo. Os valores referentes às larguras das diagonais equivalentes e às excentricidades encontradas para cada modelo estão indicados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros utilizados nos modelos MDE preliminares

Método de cálculo	Modelo	Largura DE (cm)	e_H (cm)	e_L (cm)
Mainstone (1974)	BVC04P40V60	66,96	57,85	34,99
	BVC14P40V60	59,87	54,00	26,00
	BVC24P40V60	57,98	52,97	23,60
	BCPV04P40V60	72,23	60,72	41,69
	BCPM10P40V60	64,72	56,63	32,15
	BCPM18P40V60	61,02	54,62	27,46
Durrani e Luo (1994)	BVC04P40V60	87,87	69,23	61,53
	BVC14P40V60	78,56	64,17	49,72
	BVC24P40V60	76,09	62,82	46,58
	BCPV04P40V60	94,78	72,99	70,31
	BCPM10P40V60	84,92	67,62	57,79
	BCPM18P40V60	80,07	64,99	51,64
ABNT NBR 16868-1 (2020)	BVC04P40V60	152,32	104,29	143,33
	BVC14P40V60	152,32	104,29	143,33
	BVC24P40V60	152,32	104,29	143,33
	BCPV04P40V60	152,32	104,29	143,33
	BCPM10P40V60	152,32	104,29	143,33
	BCPM18P40V60	152,32	104,29	143,33

Fonte: Autor (2022).

Ressalta-se que, o valor de largura da diagonal equivalente indicado na Tabela 7 equivale a largura aplicada no MDE clássico (uma diagonal), sendo que nos modelos de duas e três diagonais, o valor adotado para cada diagonal varia de acordo com o que está ilustrado nas Figuras 29 e 30.

Por fim, na Tabela 8 estão dispostos os valores do coeficiente para consideração da rigidez efetiva da diagonal equivalente (β), que foi aplicado nos modelos calculados de acordo com a ABNT NBR 16886-1 (2020). Destaca-se que o valor do coeficiente, para os modelos analisados, não foi influenciado pela variação do tipo de bloco utilizado como alvenaria, uma vez que a geometria do pórtico preenchido e a largura da diagonal equivalente encontrada foram iguais para todos os modelos.

Tabela 8 – Coeficiente β calculado para os modelos preliminares

Método de cálculo	Nº de diagonais	Posição da diagonal	β
ABNT NBR 16868-1 (2020)	1	Central	1,468
	2	Excêntricas	1,249
	3	Central	1,258
	3	Excêntricas	1,377

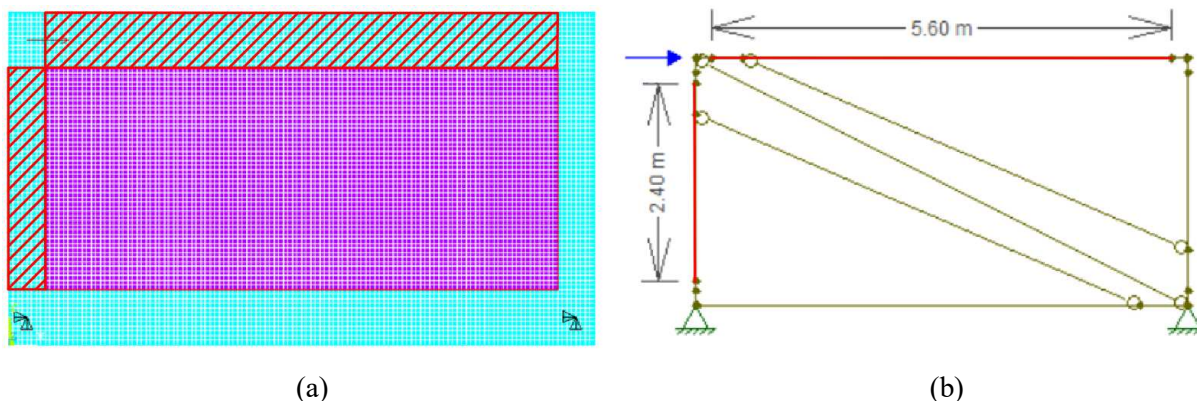
Fonte: Autor (2022).

5.1.1 Resultados

Para os modelos preliminares deste capítulo, optou-se por analisar os resultados de deslocamento horizontal do pórtico preenchido e os diagramas de força cortante e momento fletor atuantes nos elementos do pórtico.

Com relação aos diagramas citados anteriormente, os mesmos foram obtidos, nos modelos MEF, seguindo o procedimento descrito na seção 3.2.2 deste trabalho. Foram calculados os valores de força cortante (V) e momento fletor (M) em diferentes seções do pilar (ao longo de sua altura livre) e da viga (ao longo de seu vão livre) que formam o nó de pórtico onde foi aplicada a força horizontal (F). Ressalta-se que a altura livre do pilar equivale à altura da parede ($h = 2,4$ m) e o vão livre da viga equivale ao comprimento da parede ($l = 5,6$ m). Dessa forma, nos modelos MDE, os esforços analisados foram extraídos nessas mesmas regiões. Na Figura 31 estão destacadas as regiões dos elementos do pórtico analisadas nos modelos MEF e MDE.

Figura 31 – Regiões de análise dos esforços V e M : (a) MEF; (b) MDE



Fonte: Autor (2022).

Primeiramente, foram analisados os resultados obtidos nos modelos MEF, com o intuito de examinar o comportamento do pórtico preenchido frente à variação do material que compõe a alvenaria participante. Na Tabela 9 estão representados resultados obtidos referentes à calibração do fator FKN, pressão de contato máxima na interface pórtico-parede e deslocamento horizontal para cada modelo MEF.

Tabela 9 – Resultados obtidos via modelos MEF

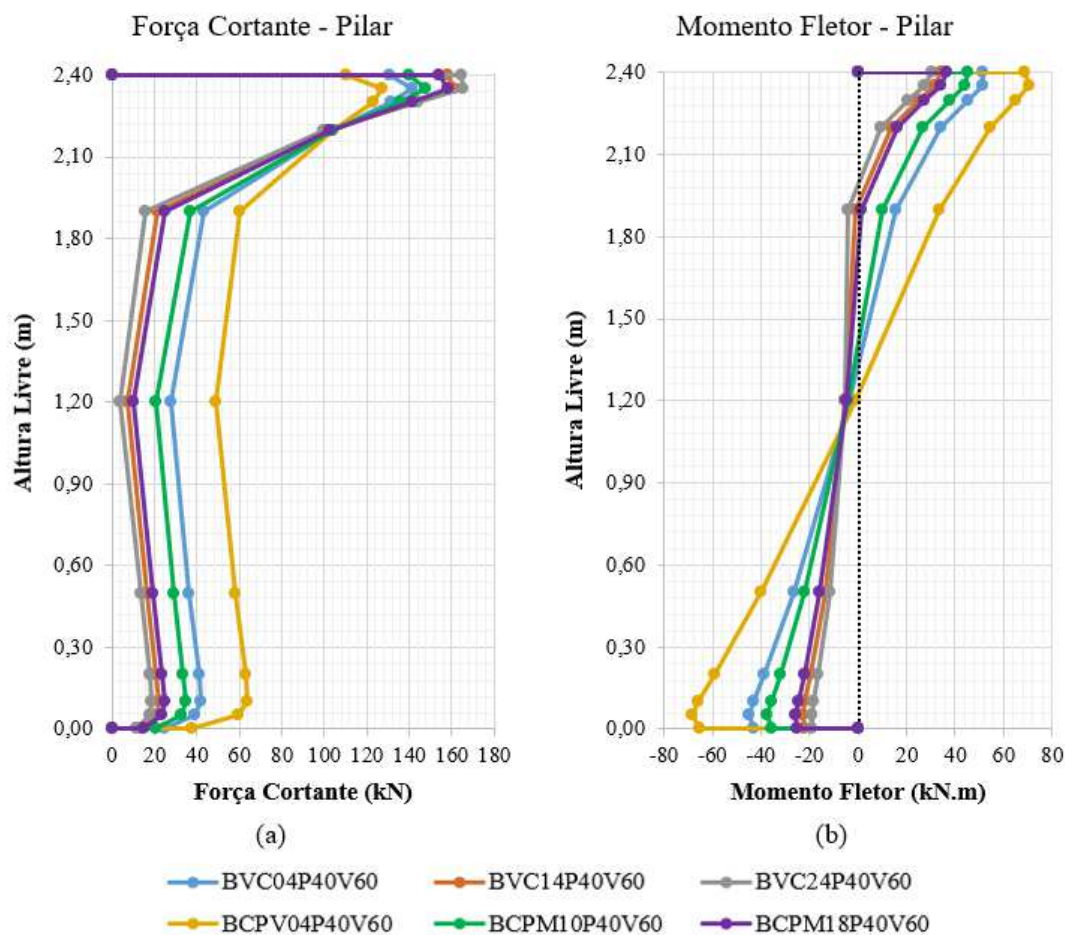
Modelo	E_y (MPa)	FKN	Penetração (mm)	Pressão de Contato (MPa)	Deslocamento Horizontal (mm)
BVC04P40V60	2560	0,042	0,435	1,96	4,72
BVC14P40V60	7840	0,023	0,404	3,05	2,77
BVC24P40V60	10800	0,019	0,393	3,38	2,40
BCPV04P40V60	1200	0,065	0,447	1,36	6,69
BCPM10P40V60	3600	0,037	0,437	2,28	4,04
BCPM18P40V60	6480	0,027	0,417	2,85	3,05

Fonte: Autor (2022).

Com relação à calibração do fator FKN, foram obtidos valores entre 0,019 e 0,065 para o fator FKN, que resultaram em penetrações inferiores a 0,5 mm em todos os modelos simulados. Analisando os outros dados dispostos na Tabela 9, foi possível inferir que, quanto maior o módulo de elasticidade da alvenaria participante, maior foi a pressão de contato máxima na interface pórtico-parede e menor foi o deslocamento horizontal do pórtico preenchido (conforme é de se esperar intuitivamente).

Nas Figuras 32 e 33 estão representados os diagramas de força cortante e momento fletor atuantes no pilar e na viga analisados, obtidos em cada modelo MEF.

Figura 32 – Diagrama de esforços no pilar via MEF: (a) Força cortante; (b) Momento Fletor



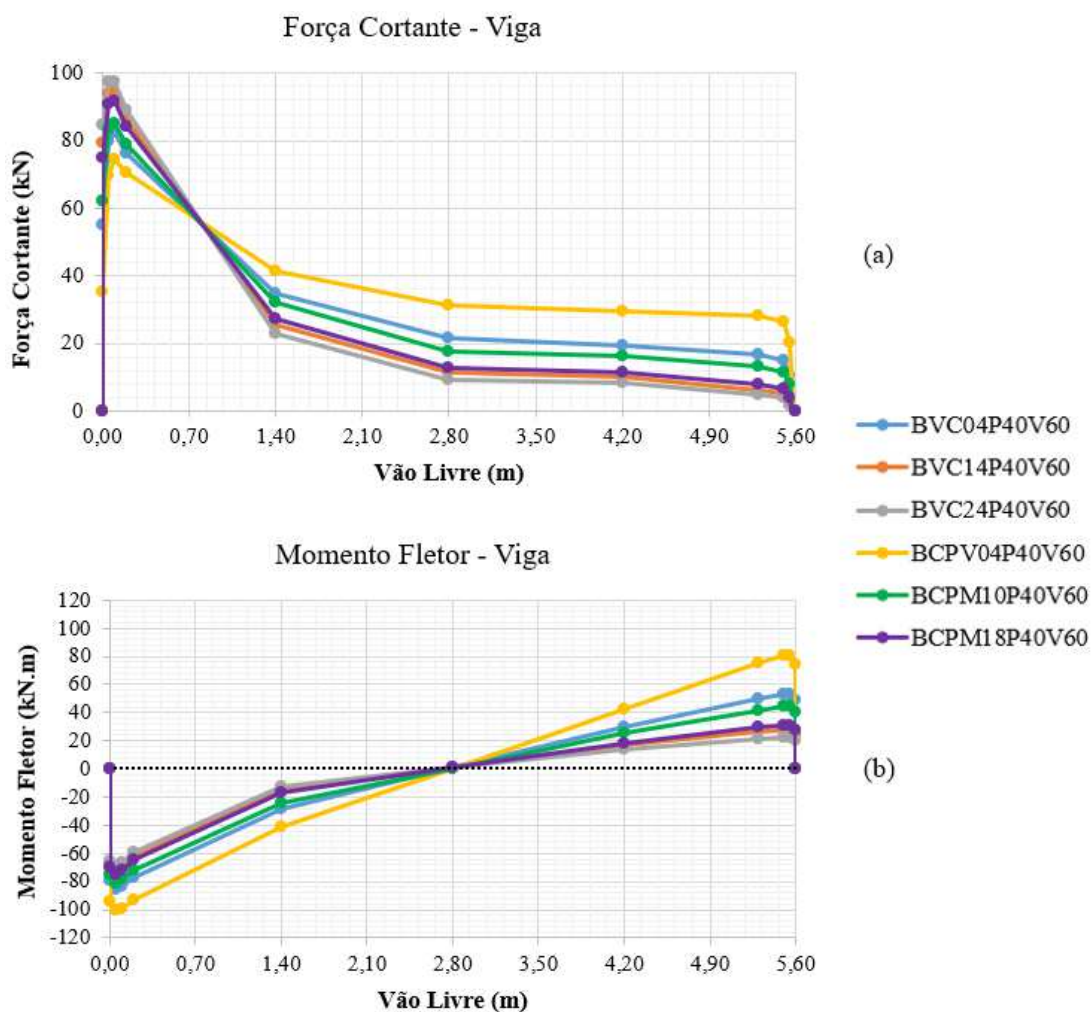
Fonte: Autor (2022).

Analisando o diagrama referente à força cortante que atua no pilar, foi possível observar resultados importantes: percebe-se um pico de esforço na região superior do pilar, região onde o pilar está efetivamente em contato com a parede de alvenaria, e com isso, submetido a uma pressão de contato (Figura 16, capítulo 3); além disso, notou-se que, quanto mais rígida a alvenaria, maior foi a força cortante máxima atuando no pilar (e maior foi a máxima pressão de contato, conforme exibido na Tabela 9); por outro lado, quanto maior a rigidez da alvenaria, menor foi a força cortante que atua na região fora da região de contato com a parede.

Com relação ao momento fletor que atua no pilar, notou-se que: quanto mais rígida a alvenaria, menores foram os momentos fletores atuantes em todas as regiões do pilar; também se observou

que os momentos que atuam no topo do pilar foram maiores, em módulo, do que os momentos que atuam na base, sendo a diferença entre eles mais significativa nos modelos em que a alvenaria apresenta maior rigidez.

Figura 33 – Diagrama de esforços na viga via MEF: (a) Força cortante; (b) Momento Fletor



Fonte: Autor (2022).

Com relação aos diagramas obtidos para a viga, o comportamento foi análogo ao que foi observado para os pilares, com maiores solicitações na região onde a viga está efetivamente em contato com a parede.

Para as análises envolvendo os modelos MDE (com uma, duas e três diagonais), com o intuito de simplificar a exibição dos resultados, foram adotadas as seguintes abreviaturas para cada modelo:

- Expressão de Mainstone (1974) – MA;
- Expressão de Durrani e Luo (1994) – DL;
- Procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) – NBR;
- MDE clássico (uma diagonal) – 1D;
- MDE com duas diagonais – 2D;
- MDE com três diagonais – 3D.

Primeiramente, para analisar os deslocamentos horizontais do pórtico preenchido, optou-se por apresentar os resultados dos seis modelos preliminares, dispostos na Figura 34.

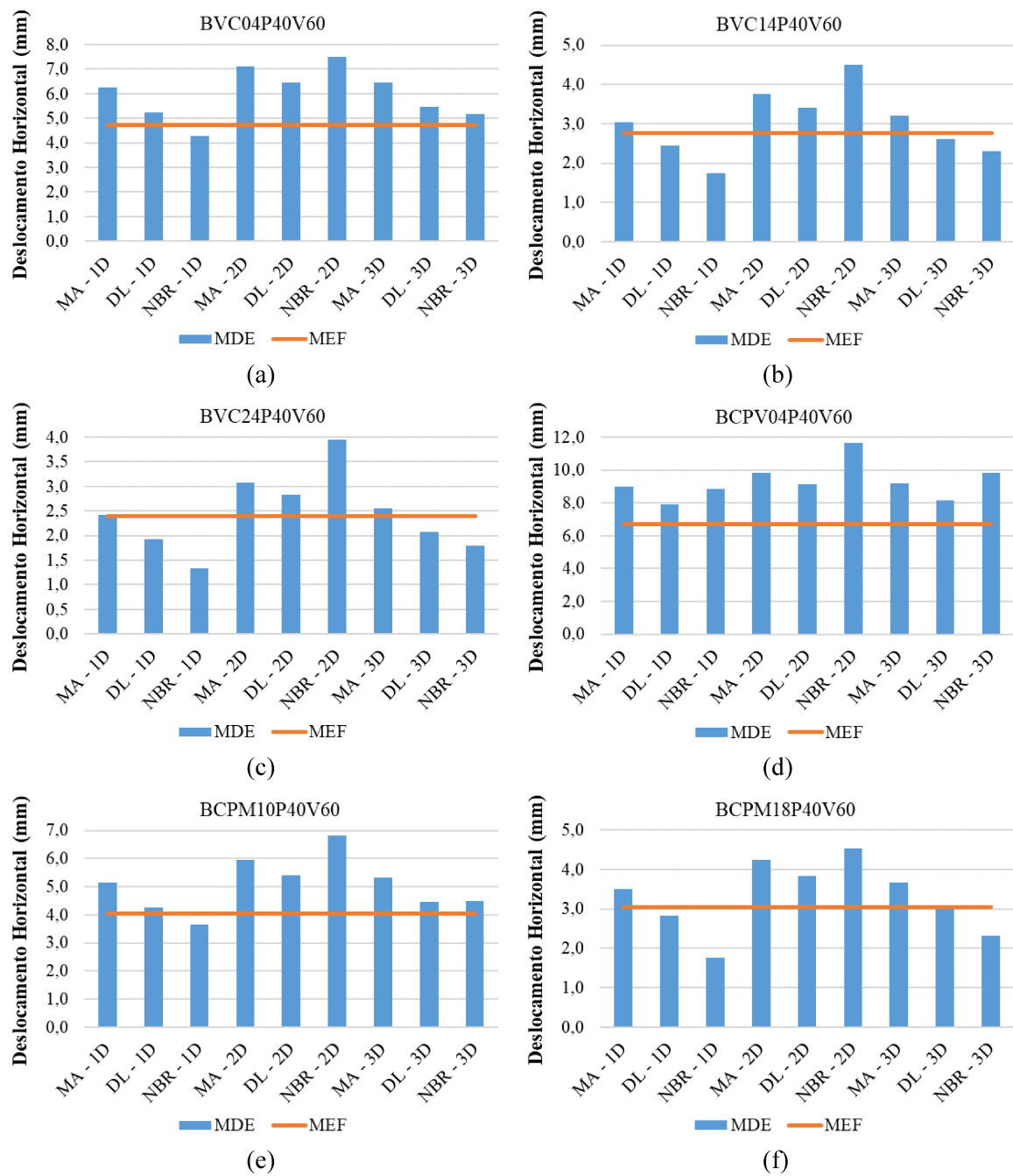
Comparando os modelos com uma, duas e três diagonais, notou-se que: i) os modelos com três diagonais forneceram resultados mais próximos aos modelos de referência (obtidos via MEF) quando comparado aos modelos com duas diagonais; ii) os modelos com duas diagonais forneceram os maiores deslocamentos horizontais, apresentando resultados maiores que os obtidos via MEF em todos os seis modelos analisados, com diferenças relevantes; iii) os modelos com três diagonais forneceram deslocamentos horizontais maiores do que os com uma diagonal para todos os casos analisados.

Analisando os resultados obtidos por cada método de cálculo das propriedades das diagonais equivalentes, para o modelo com uma diagonal, constatou-se que: i) a expressão de Mainstone (1974) apresentou os resultados mais conservadores para todas as alvenarias que foram analisadas (ou seja, os resultados que mais superaram os deslocamentos horizontais obtidos nos modelos de referência); ii) Durrani e Luo (1994) foi a expressão que forneceu os resultados mais próximos aos de referência nos modelos com alvenaria menos rígidas, ainda que conservadores; iii) já para os modelos com alvenaria de maior módulo de elasticidade, a expressão de Mainstone (1974) foi a que mais se aproximou dos deslocamentos horizontais obtidos via MEF; iv) o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) apresentou menores deslocamentos horizontais aos obtidos via MEF em quase todos os casos analisados, com exceção do modelo com alvenaria de menor módulo de elasticidade (BCPV04P40V60), com os resultados se distanciando dos obtidos nos modelos de referência à medida em que se aumentou o módulo de elasticidade da alvenaria.

Para o modelo com duas diagonais: i) os deslocamentos obtidos em todos os modelos MDE foram maiores que os obtidos no MEF; ii) a expressão de Durrani e Luo (1994) foi a que

forneceu os resultados mais próximos aos de referência, seguida pela expressão de Mainstone (1974); iii) o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) apresentou os resultados que mais se distanciaram dos obtidos pelo MEF.

Figura 34 – Deslocamento horizontal para os modelos preliminares: (a) BVC04P40V60; (b) BVC14P40V60; (c) BVC24P40V60; (d) BCPV04P40V60; (e) BCPM10P40V60; (f) BCPM18P40V60



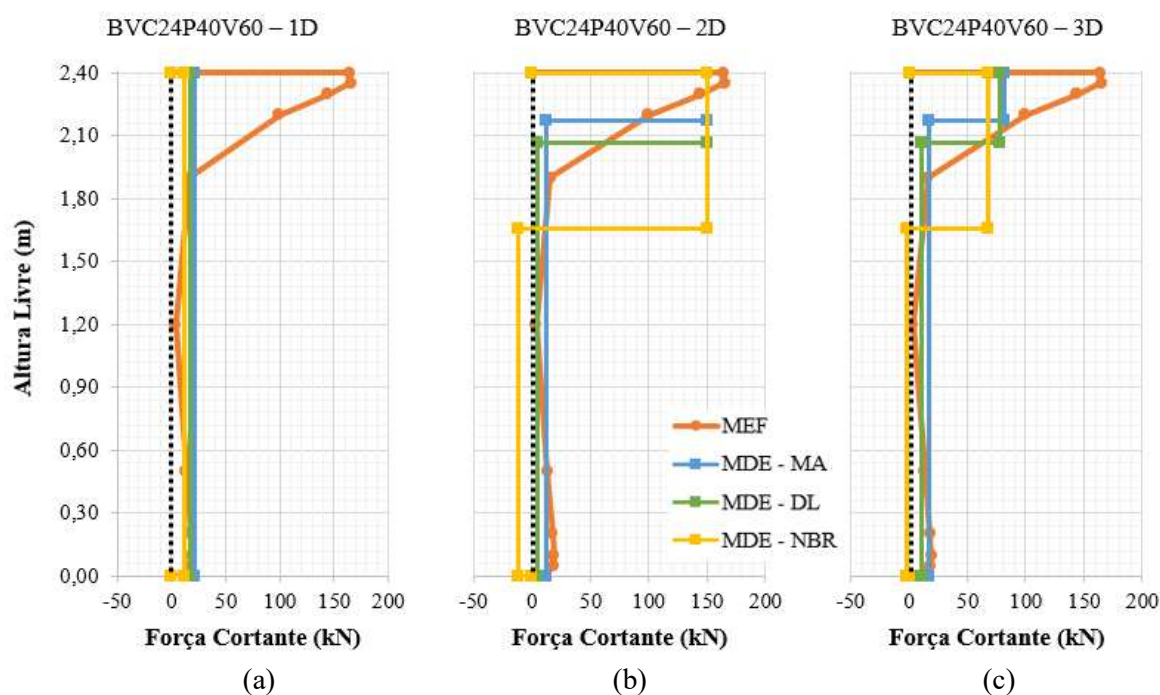
Fonte: Autor (2022).

Para o modelo com três diagonais: i) em geral, a expressão de Durrani e Luo (1994) forneceu resultados mais próximos do modelo MEF para os casos com alvenarias de menor módulo de elasticidade; ii) a expressão de Mainstone (1974), por sua vez, apresentou resultados mais próximos aos de referência para os casos com alvenarias de maior módulo de elasticidade; iii) o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020), forneceu resultados contrários à segurança nos modelos com alvenaria com maior módulo de elasticidade.

Com relação aos diagramas de força cortante e momento fletor que atuam no pilar e na viga, destaca-se que, no Apêndice A deste trabalho, estão dispostos todos os diagramas obtidos para os seis modelos preliminares, nas Figuras A-1 a A-24. As análises a seguir foram baseadas nos dados obtidos de todos os modelos, entretanto, optou-se por inserir nesta seção apenas alguns dos resultados, de forma a ilustrar o comportamento dos diagramas.

Para ilustrar o comportamento do diagrama de força cortante no pilar, decidiu-se apresentar os resultados de dois modelos: o que possui a alvenaria com maior módulo de elasticidade, (BVC24P40V60) e que detêm a alvenaria com menor módulo de elasticidade (BCPV04P40V60). Tais diagramas estão dispostos nas Figuras 35 e 36, respectivamente.

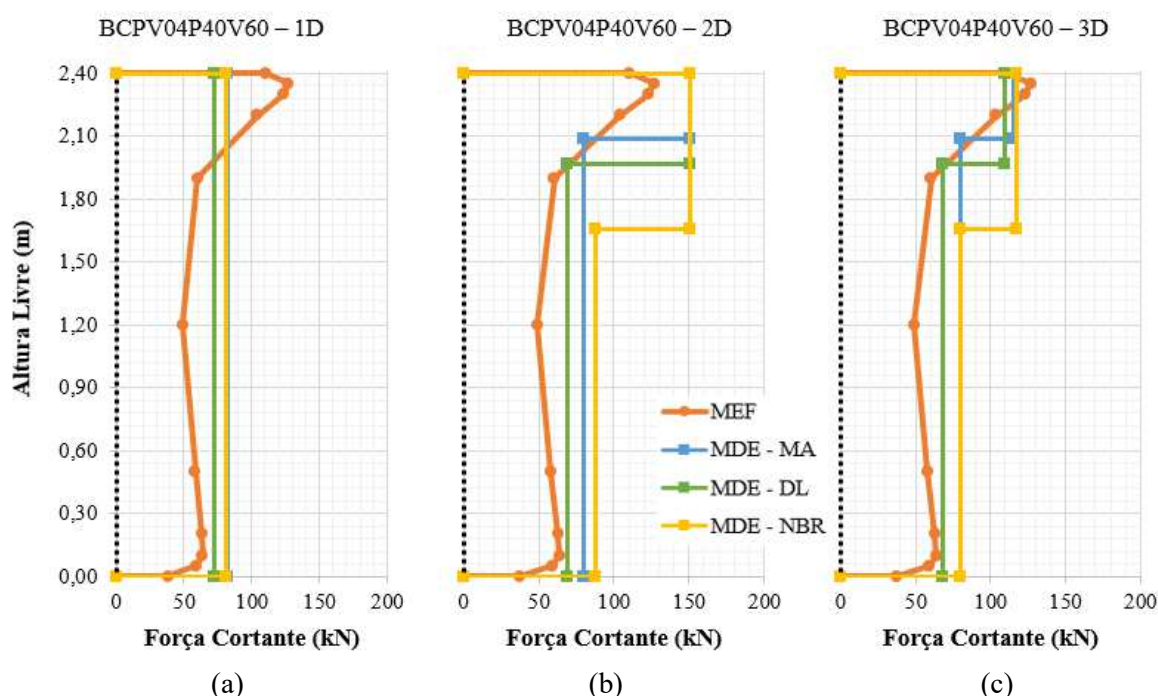
Figura 35 – Diagramas de força cortante no pilar MEF x MDE para o modelo BVC24P40V60: (a) MDE com uma diagonal; (b) MDE com duas diagonais; (c) MDE com três diagonais



Fonte: Autor (2022).

Por meio dos resultados obtidos, para o modelo com uma diagonal notou-se que: i) o MDE clássico não consegue capturar o pico de força cortante no pilar na região de contato com a parede, fornecendo resultados bem menores que os cortantes máximos obtidos no MEF, principalmente nos modelos com alvenarias de maior módulo de elasticidade; ii) sob o ponto de vista de segurança, a expressão de Mainstone (1974) foi a que apresentou melhores resultados.

Figura 36 – Diagramas de força cortante no pilar MEF x MDE para o modelo BCPV04P40V60: (a) MDE com uma diagonal; (b) MDE com duas diagonais; (c) MDE com três diagonais



Fonte: Autor (2022).

Para o modelo com duas diagonais: i) observou-se que o modelo com duas diagonais forneceu resultados relativamente próximos aos obtidos com o MEF para obtenção da força cortante máxima do pilar na região de contato com a parede (V_A), com valores até 18% maiores que o de referência (à favor da segurança) e 9% menores (contrários à segurança); ii) para a força cortante máxima V_A , praticamente não houve diferença de resultados entre o método de cálculo utilizado (Mainstone, Durrani e Luo e NBR 16868-1); iii) com relação a força cortante máxima fora da região de contato com a parede (V_B), nos modelos com alvenarias mais rígidas, notou-se que o modelo com duas diagonais forneceu resultados contrários à segurança, apresentando inclusive uma inversão no diagrama, nos modelos calculados pelo procedimento da ABNT

NBR 16868-1 (2020); iv) em geral, do ponto de vista de segurança, a expressão de Mainstone (1974) forneceu melhores resultados para a obtenção de V_B .

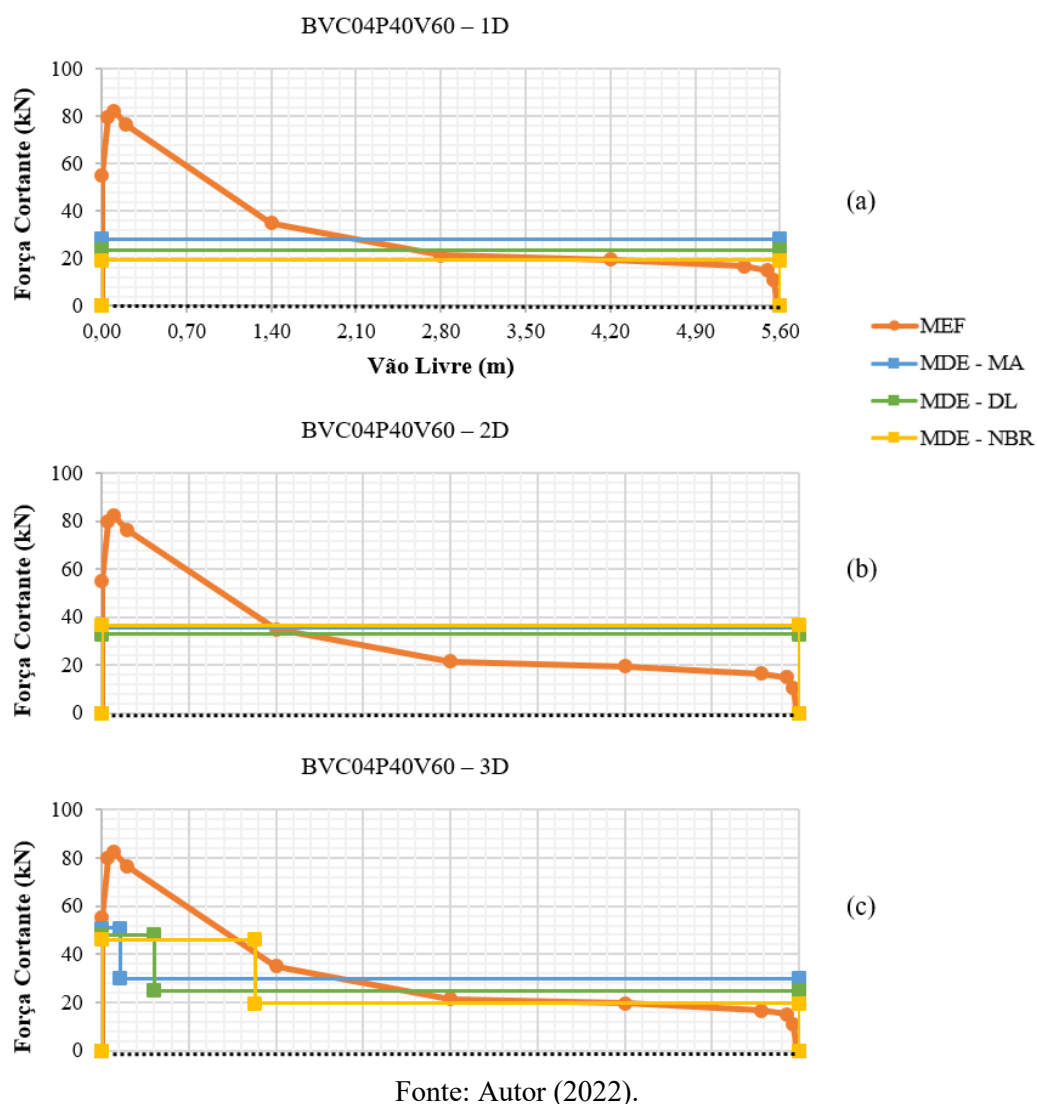
Para o modelos com três diagonais: i) notou-se que esse modelo forneceu melhores resultados que os obtidos no modelo com uma diagonal com relação à força cortante máxima na região de contato com a parede (V_A); entretanto, não forneceu bons resultados quando comparado com o modelo de duas diagonais, com valores menores do que os obtidos via MEF para todos os casos analisados; ii) os resultados fornecidos para V_A foram piores a medida em que se aumentou o módulo de elasticidade da alvenaria; iii) no caso da força cortante V_B , o modelo com três diagonais apresentou resultados mais próximos aos de referência, quando comparado com o modelo com duas diagonais.

Com relação aos diagramas de força cortante que atuam na viga, optou-se por apresentar os resultados obtidos para o modelo BVC04P40V60 que estão dispostos na Figura 37 (para os outros modelos, os diagramas estão dispostos no Apêndice A). Destaca-se que, para os modelos com uma e três diagonais, o comportamento foi análogo ao observado para os pilares.

Para o modelo com duas diagonais, notou-se que: i) diferentemente do que ocorre no modelo com duas diagonais para o pilar, na viga não há um pico de força cortante na região de contato com a parede, devido ao fato das diagonais não apresentarem excentricidades na direção da viga nesses modelos (Figura 29); assim, o modelo com duas diagonais não consegue capturar o pico de força cortante na região de contato com a parede, fornecendo resultados menores do que os obtidos via MEF; ii) o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) forneceu os resultados mais próximos ao de referência nos modelos com duas diagonais.

Figura 37 – Diagramas de força cortante na viga MEF x MDE para o modelo BVC04P40V60:

(a) MDE com uma diagonal; (b) MDE com duas diagonais; (c) MDE com três diagonais

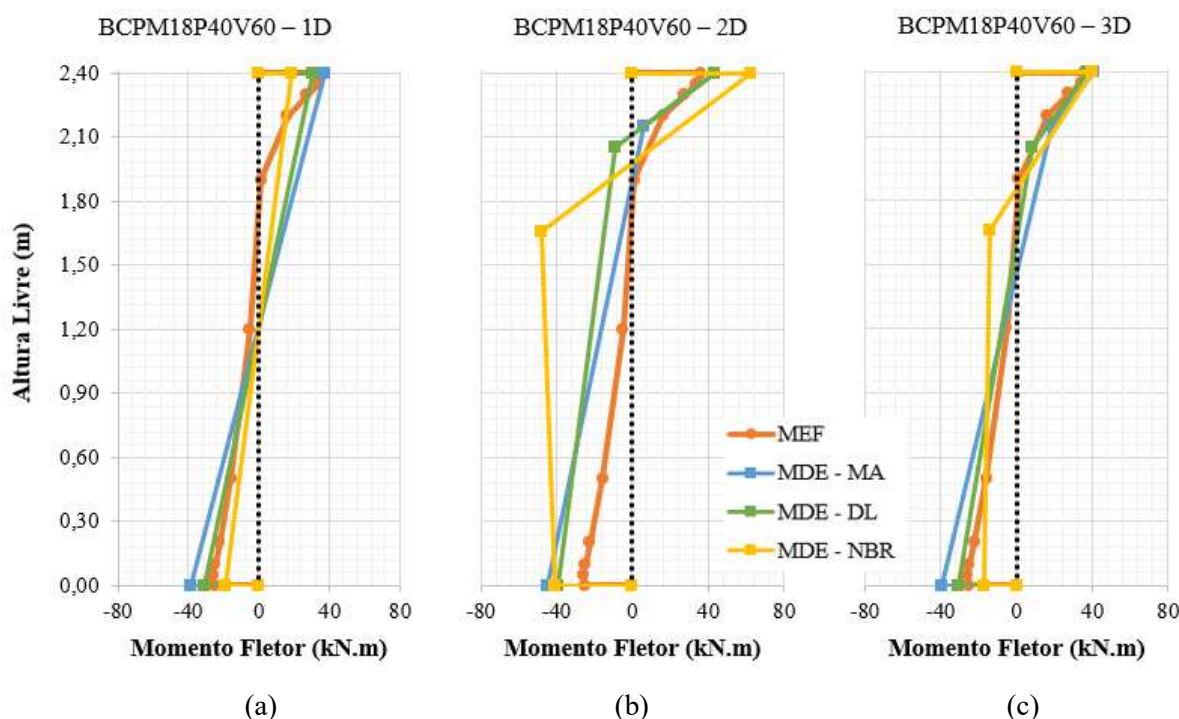


Por fim, com relação aos diagramas de momento fletor, optou-se por apresentar os resultados obtidos para o modelo BCPM18P40V60 tanto para o pilar, quanto para a viga, dispostos nas Figuras 38 e 39, respectivamente (para os outros modelos, os diagramas estão dispostos no Apêndice A).

Por meio dos resultados obtidos, foi possível perceber que, para o MDE com uma diagonal: i) nos dois modelos com alvenaria de maior módulo de elasticidade (BVC14P40V60 e BVC24P40V60), todos os métodos de cálculo analisados forneceram momentos fletores no topo do pilar menores do que os obtidos via MEF, sendo a expressão de Mainstone (1974) a

que forneceu os resultados mais próximos aos de referência; ii) ainda com relação aos momentos fletores no topo do pilar, nos modelos com alvenaria menos rígidas, as expressões de Mainstone (1974) e Durrani e Luo (1994) forneceram resultados maiores em comparação aos obtidos via MEF; iii) com relação ao momento na base, apenas o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) apresentou resultados contrários à segurança, nos modelos com alvenarias de maior módulo de elasticidade.

Figura 38 – Diagramas de momento fletor no pilar MEF x MDE para o modelo BCPM18P40V60: (a) MDE com uma diagonal; (b) MDE com duas diagonais; (c) MDE com três diagonais



Fonte: Autor (2022).

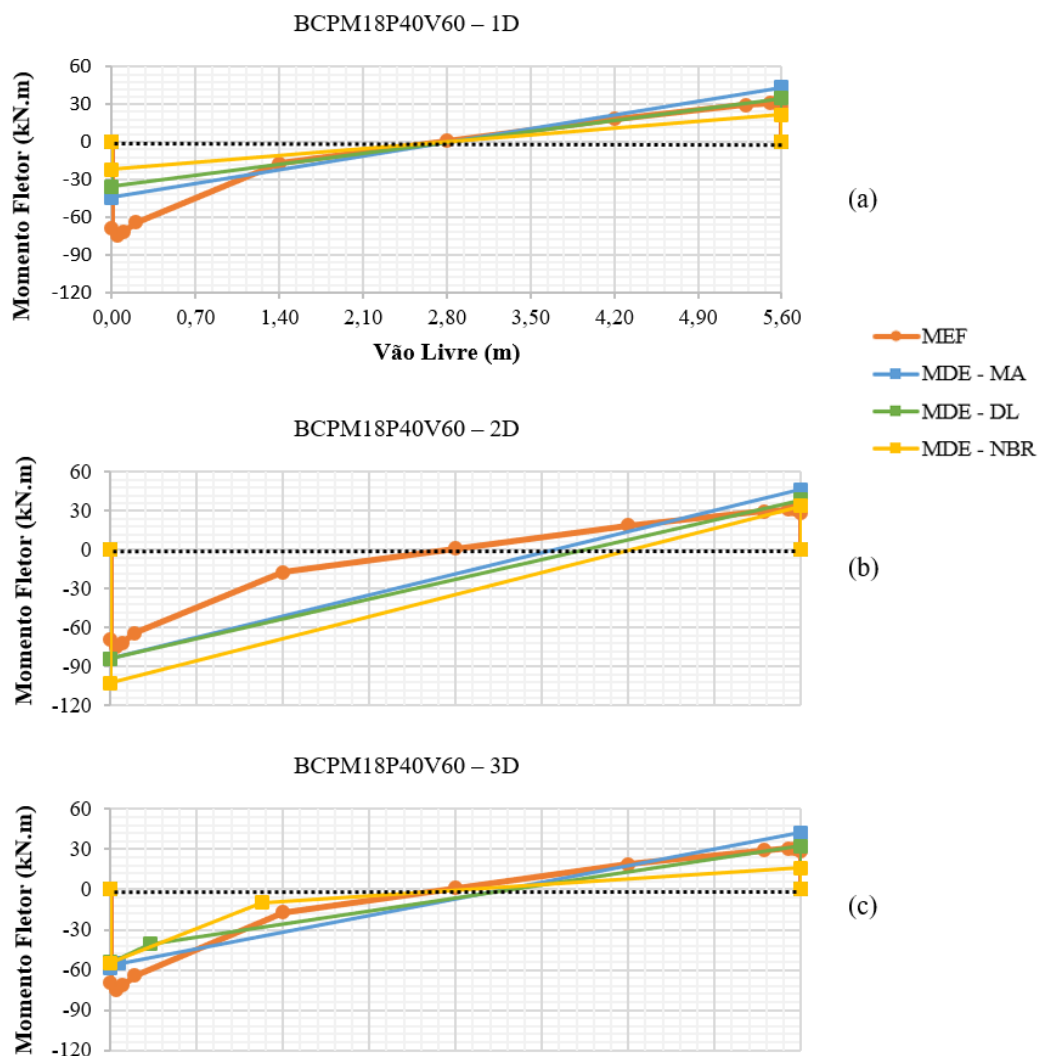
Para o modelo com duas diagonais: i) o procedimento da norma brasileira forneceu os maiores resultados para o momento fletor no topo do pilar em todos os modelos, com valores bem superiores aos obtidos no MEF; ii) além disso, nos modelos com alvenarias de maior módulo de elasticidade, o procedimento da norma apresentou um diagrama de comportamento diferente dos demais, com o momento fletor ao longo da altura livre do pilar sendo maior que o momento na base; iii) com relação ao momento na base do pilar, todos os resultados obtidos nos modelos MDE foram maiores do que os obtidos no MEF.

Para o modelo com três diagonais: i) apenas no modelo com alvenaria de maior módulo de elasticidade (BVC24P40V60), o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) forneceu momentos no vão do pilar maiores que o da base; ii) o procedimento da norma brasileira forneceu resultados contrários à segurança com relação aos momentos na base do pilar nos modelos com alvenarias mais rígidas; iii) em geral as expressões de Mainstone (1974) e Durrani e Luo (1994) apresentaram momentos fletores maiores do que os obtidos via MEF no topo e na base do pilar, com Mainstone (1974) fornecendo os maiores valores.

Com relação aos diagramas obtidos para a viga, notou-se que para os momentos positivos: i) os modelos com uma diagonal forneceram resultados menores do que os obtidos via MEF, principalmente nos que possuem alvenarias com maior módulo de elasticidade; ii) já os modelos com duas diagonais apresentaram resultados maiores que os obtidos pelo MEF, com o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) fornecendo os maiores valores; iii) nos modelos com três diagonais, com exceção dos que possuem alvenarias com menor módulo de elasticidade (BVC04P40V60 e BCPV04P40V60), os momentos foram menores do que os de referência para todos os métodos de cálculo analisados.

Para os momentos negativos na viga: i) em geral, a expressão de Durrani e Luo (1994) forneceu os resultados mais próximos aos obtidos pelo MEF; ii) a expressão de Mainstone (1974) forneceu resultados maiores que o MEF em todos os modelos analisados; iii) o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) forneceu resultados maiores que o MEF nos modelos com duas diagonais; iv) já nos modelos com uma e três diagonais, o procedimento da norma brasileira apresentou resultados contra a segurança nos modelos com alvenarias de maior rigidez (BVC14P40V60, BVC24P40V60 e BCPM18P40V60).

Figura 39 – Diagramas de momento fletor na viga MEF x MDE para o modelo BCPM18P40V60: (a) MDE com uma diagonal; (b) MDE com duas diagonais; (c) MDE com três diagonais



Fonte: Autor (2022).

5.2 MODELOS DEFINITIVOS

Para os modelos definitivos, optou-se por simular diferentes pórticos isolados (um vão e um andar), cujos elementos estruturais apresentam seções transversais compatíveis a pórticos de edifícios altos, submetidos a ações horizontais de vento, com o intuito de avaliar os resultados obtidos por meio do MDE clássico (uma diagonal) e dos modelos com duas e três diagonais, de acordo com o procedimento proposto neste capítulo. Para isso, também foram simulados modelos com o emprego do MEF, que são os modelos de referência para as análises.

Decidiu-se por avaliar pórticos com diferentes seções transversais de pilares e vigas, além de empregar variações nos blocos estruturais que compõem a alvenaria participante. Foi adotado um concreto com classe de resistência C40 para os elementos do pórtico. As larguras das seções transversais dos pilares e das vigas (medidas na direção perpendicular ao plano do pórtico) foram as mesmas para todos os modelos. Assim, os parâmetros constantes em todos os modelos definitivos são:

- Vão teórico da viga (L) = 6,0 m;
- Distância entre andares (H) = 3,0 m;
- Largura da seção transversal do pilar (b_p) = 30 cm;
- Largura da seção transversal da viga (b_v) = 20 cm;
- Espessura da parede (t) = 19 cm;
- Concreto C40: $E_c = 35000$ MPa.

Com relação ao bloco estrutural que compõe a alvenaria participante, foram adotados os mesmos seis blocos analisados nos modelos preliminares (vide seção 5.1). Dessa forma, a nomenclatura dos modelos definitivos possui os mesmos caracteres iniciais dos modelos preliminares, conforme representado na Tabela 10.

Tabela 10 – Blocos estruturais utilizados nos modelos definitivos

Nomenclatura	Tipo de bloco	f_{bk} (MPa)	E_y (MPa)
BVC04	Bloco vazado de concreto	4,0	2560
BVC14	Bloco vazado de concreto	14,0	7840
BVC24	Bloco vazado de concreto	24,0	10800
BCPV04	Bloco cerâmico de parede vazada	4,0	1200
BCPM10	Bloco cerâmico de parede maciça	10,0	3600
BCPM18	Bloco cerâmico de parede maciça	18,0	6480

Fonte: Autor (2022).

As alturas da seção transversal analisadas para o pilar (h_p) foram de 60, 80, 100 e 120 cm. Para as vigas (h_v), foram adotadas as alturas de 60 e 80 cm para a seção transversal. Ressalta-se que, a escolha de 80 cm para a altura da seção transversal da viga foi com o intuito de simular o que acontece em edifícios mais altos, em que as vigas dos primeiros andares necessitam maior altura, por serem mais solicitadas aos esforços de flexão. Combinando tais dimensões, juntamente com os seis diferentes blocos analisados, obteve-se um total de 48 modelos. No Quadro 6 apresenta-se a nomenclatura para todos os modelos definitivos.

Quadro 6 – Nomenclatura dos modelos definitivos

Dimensões	$h_p = 60 \text{ cm}$	$h_p = 80 \text{ cm}$	$h_p = 100 \text{ cm}$	$h_p = 120 \text{ cm}$
$h_v = 60 \text{ cm}$	BVC04P60V60	BVC04P80V60	BVC04P100V60	BVC04P120V60
	BVC14P60V60	BVC14P80V60	BVC14P100V60	BVC14P120V60
	BVC24P60V60	BVC24P80V60	BVC24P100V60	BVC24P120V60
	BCPV04P60V60	BCPV04P80V60	BCPV04P100V60	BCPV04P120V60
	BCPM10P60V60	BCPM10P80V60	BCPM10P100V60	BCPM10P120V60
	BCPM18P60V60	BCPM18P80V60	BCPM18P100V60	BCPM18P120V60
$h_v = 80 \text{ cm}$	BVC04P60V80	BVC04P80V80	BVC04P100V80	BVC04P120V80
	BVC14P60V80	BVC14P80V80	BVC14P100V80	BVC14P120V80
	BVC24P60V80	BVC24P80V80	BVC24P100V80	BVC24P120V80
	BCPV04P60V80	BCPV04P80V80	BCPV04P100V80	BCPV04P120V80
	BCPM10P60V80	BCPM10P80V80	BCPM10P100V80	BCPM10P120V80
	BCPM18P60V80	BCPM18P80V80	BCPM18P100V80	BCPM18P120V80

Fonte: Autor (2022).

Destaca-se que, em todos os modelos definitivos a alvenaria foi considerada como material de comportamento ortotrópico. Os parâmetros relacionados à alvenaria a serem empregados nos modelos MEF e MDE foram obtidos de maneira análoga aos modelos preliminares (seção 5.1), com apenas uma exceção: a máxima tensão resistente de cisalhamento entre as superfícies do pórtico com a parede ($f_{v,max}$). Conforme exposto no capítulo 3 deste trabalho, para os modelos definitivos optou-se por um cálculo mais refinado para esse parâmetro (Equação 15), sendo função da coesão (τ_0), do coeficiente de atrito entre a parede e o pórtico (μ) e do ângulo da diagonal equivalente em relação à horizontal (θ).

Para a obtenção da força horizontal a ser aplicada em cada modelo (F), também se utilizou os mesmos procedimentos já comentados neste trabalho. Dessa forma, obteve-se um valor de F para cada pórtico analisado, cujos valores estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 – Valor de F aplicado em cada pórtico analisado

Pórtico	F (kN)	Pórtico	F (kN)
P60V60	768,37	P60V80	1372,19
P80V60	949,43	P80V80	1825,70
P100V60	1093,91	P100V80	2171,61
P120V60	1231,43	P120V80	2465,45

Fonte: Autor (2022).

Para os modelos definitivos, optou-se por analisar os seguintes resultados: i) deslocamento horizontal do pórtico preenchido; ii) força cortante máxima no pilar (região de contato do pórtico com a alvenaria); iii) momentos fletores máximos nas extremidades do pilar; iv) momento negativo máximo na extremidade da viga; v) tensão de compressão na parede de alvenaria. Destaca-se que a opção de analisar apenas o momento negativo na extremidade da viga (ocasionado por uma ação horizontal), foi devido ao fato de que, em um edifício real, esse momento será adicionado ao momento negativo proveniente das ações verticais aplicadas nesses elementos; já com relação aos momentos positivos na extremidade da viga (decorrente da ação horizontal), ocorrerá o oposto, não sendo a situação mais crítica. Ressalta-se ainda que, assim como nos modelos preliminares, foram analisados esforços atuantes na altura livre do pilar e no vão livre da viga que formam o nó de pórtico onde é aplicada a força horizontal (F).

Todos os resultados citados anteriormente, obtidos para os modelos definitivos, estão dispostos nas Tabelas B-1 a B-7, localizadas no Apêndice B deste trabalho. As análises desses resultados estão apresentadas nas seções a seguir.

5.2.1 Deslocamento horizontal

Analisando-se os resultados obtidos como um todo, as diferenças entre os modelos MDE e MEF (referência), em termos absolutos, foram de: 8,9% para o modelo com uma diagonal; 19,2% para o modelo com duas diagonais; 7,8% para o modelo com três diagonais. Assim, pode-se perceber que o modelo com três diagonais foi o que forneceu deslocamentos mais próximos em comparação ao MEF (em média).

O modelo com duas diagonais foi o que forneceu os maiores deslocamentos. Seus resultados foram maiores que os de referência em todos os casos analisados, com valores cerca de 19,2% maiores que os fornecidos pelo MEF. Já os modelos com uma e três diagonais forneceram resultados maiores e menores que o MEF. Para o modelo com uma diagonal: a média dos deslocamentos maiores que o MEF foi de 7,8%, enquanto para os menores foi de -10,1%. De forma análoga, para o modelo com três diagonais, tais médias foram de 8,2% e -6,9%.

A expressão de Durrani e Luo (1994) foi a que apresentou valores mais próximos em relação ao MEF. No modelo com três diagonais, seus resultados foram: média dos valores maiores que o MEF de 3,4%, enquanto para os menores -3,4%. Em comparação análoga, para o modelo com

três diagonais, a expressão de Mainstone (1974) apresentou resultados maiores que MEF em todos os casos, fornecendo valores cerca de 10,3% maiores. Já para o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020), as diferenças com relação ao MEF foram de 9,8% e -9,6%.

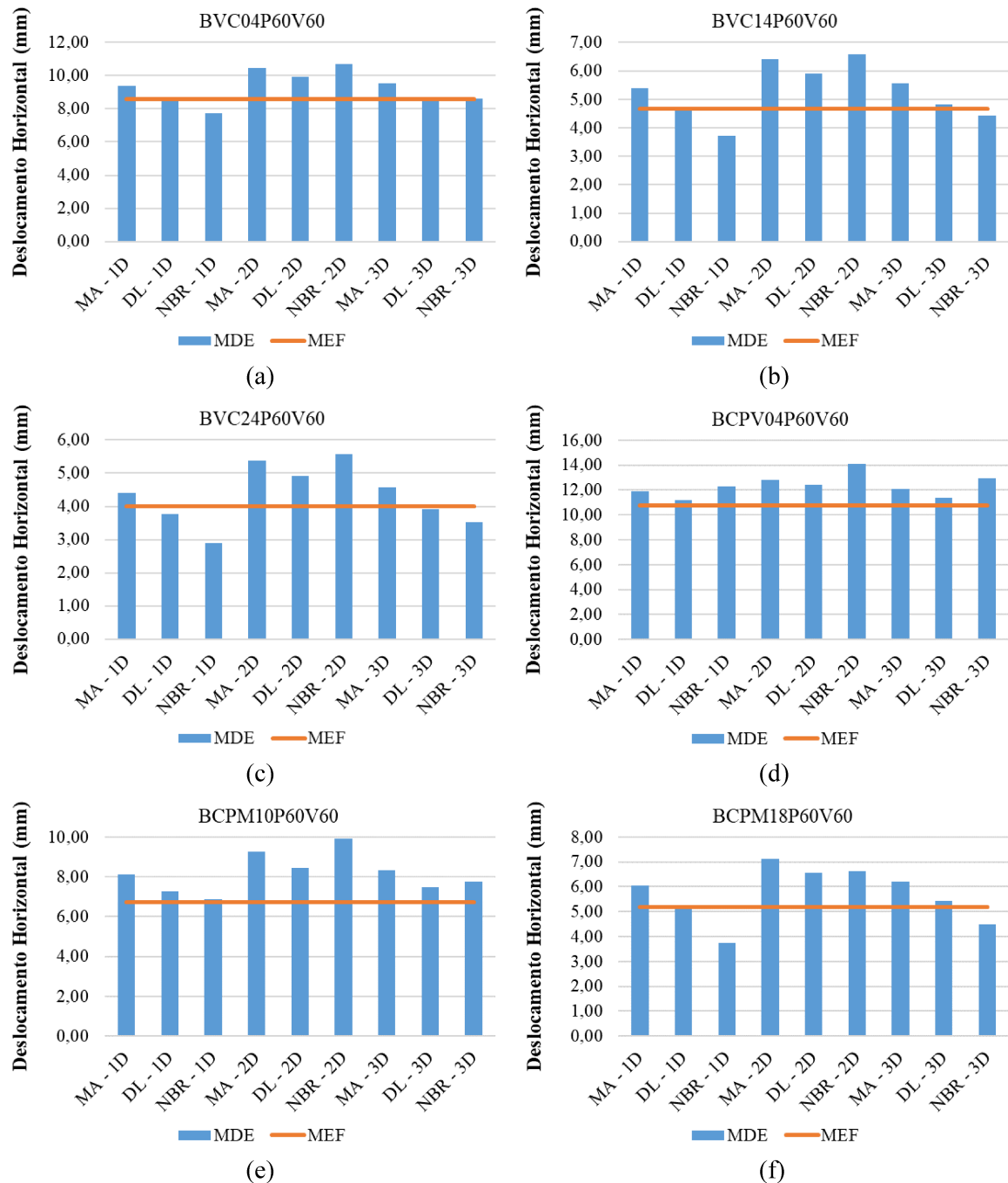
Conforme já mencionado, o modelo com duas diagonais forneceram valores de deslocamentos maiores em relação ao MEF para todos os casos analisados. As diferenças entre os três métodos de cálculo avaliados foram importantes nesses modelos: 14,6% para Durrani e Luo (1994), 21,4% para Mainstone (1974) e 21,6% para ABNT NBR 16868-1 (2020).

Na maioria dos pórticos preenchidos analisados, os deslocamentos fornecidos pelo modelo com três diagonais foram ligeiramente maiores que os obtidos com o modelo clássico com uma diagonal, com diferença média de 5,0%. Esse fato não ocorreu somente para a expressão de Mainstone (1974), nos pórticos P100V60 e P120V60, e para a expressão de Durrani e Luo (1994) no pórtico P100V60; para esses casos, os deslocamentos no modelo com três diagonais foi menor que no modelo com uma diagonal, com diferença média de -1,3%.

Cabe destacar que, nos modelos com uma e três diagonais, o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) foi o que forneceu os menores deslocamentos, em média. Analisando os pórticos com alvenarias mais rígidas, o procedimento da norma brasileira forneceu resultados menores do que o MEF (contrários à segurança) em todos os casos analisados, com diferenças, em média, de -21,4% (uma diagonal) e -10,7% (três diagonais). Já para pórticos com alvenarias menos rígidas, destaca-se que nem todos os resultados foram menores que o MEF e, considerando somente aqueles que foram menores (contrários à segurança), as diferenças foram de -4,6% (uma diagonal) e -0,8% (três diagonais).

A seguir, na Figura 40, estão apresentados gráficos com resultados de deslocamento horizontal obtidos para modelos de pórtico preenchido P60V60, como exemplo. Destaca-se que esses gráficos foram elaborados a partir de resultados que estão dispostos na Tabela B-1 deste trabalho.

Figura 40 – Deslocamento horizontal para os modelos definitivos com pórtico P60V60: (a) BVC04P60V60; (b) BVC14P60V60; (c) BVC24P60V60; (d) BCPV04P60V60; (e) BCPM10P60V60; (f) BCPM18P60V60



Fonte: Autor (2022).

5.2.2 Força cortante no pilar

Com base nos resultados obtidos, foi possível notar claramente que o modelo clássico (com uma diagonal) é inadequado para capturar a máxima força cortante no pilar (na região de contato

com a alvenaria), com resultados menores do que os obtidos pelo MEF em todos os casos analisados. Em média, a força cortante máxima fornecida pelo modelo com uma diagonal representou apenas cerca de metade (50%) do valor da cortante máxima obtida nos modelos MEF. Considerando-se as alvenarias de maior rigidez, essa diferença se acentua ainda mais, uma vez que a força cortante máxima do modelo com uma diagonal foi cerca de 33% apenas do valor máximo fornecido pelos modelos de referência.

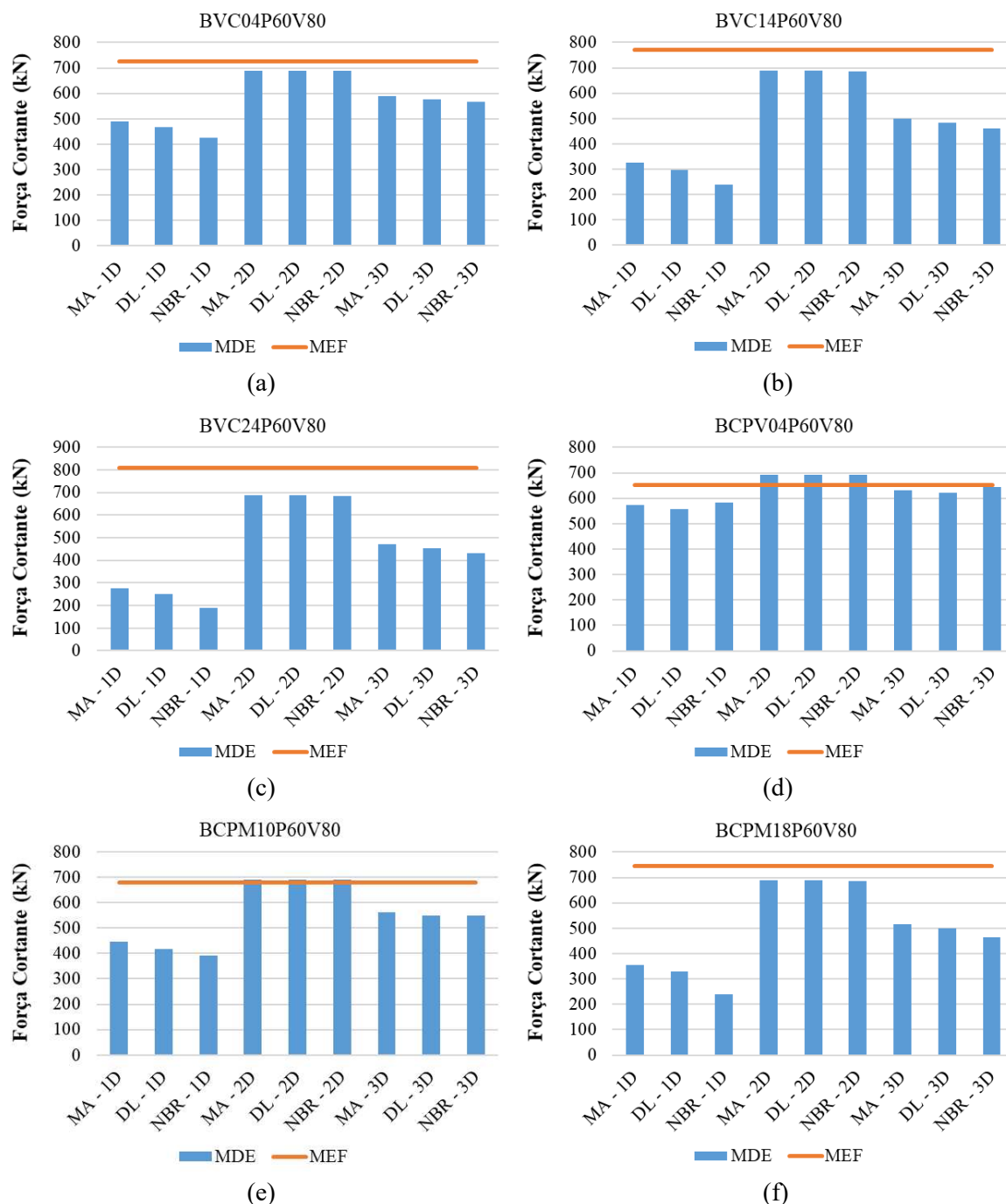
O modelo com duas diagonais foi o que conseguiu capturar a máxima força cortante no pilar de forma mais satisfatória. Para os valores que foram maiores que os obtidos no MEF, a diferença foi, em média, de 2,6%; já para os valores que foram menores, -11,1%. Para os pórticos preenchidos com alvenarias de maior módulo elasticidade, os modelos com duas diagonais forneceram resultados menores que os fornecidos pelo MEF para todos os casos, com cerca de -14,6% de diferença; para os pórticos preenchidos com alvenarias de menor módulo de elasticidade, foram obtidas diferenças médias de 2,6% e -5,6% em relação ao MEF. Cabe destacar que o método de cálculo utilizado para calcular as propriedades da diagonal equivalente praticamente não altera o valor da máxima força cortante nos modelos com duas diagonais.

O modelo com três diagonais forneceu melhores resultados que os fornecidos pelo modelo clássico com uma diagonal; entretanto, não forneceu bons resultados quando comparado com o modelo de duas diagonais. O modelo com três diagonais proporcionou resultados menores que a máxima cortante fornecida pelo MEF em todos os casos analisados. Em geral, a diferença foi de -29,2%. Para os pórticos preenchidos com alvenarias de maior módulo de elasticidade, a diferença foi de -40,7%, enquanto para os pórticos preenchidos com alvenarias de menor módulo de elasticidade, foi de -17,6%. Dessa forma, notou-se que os modelos com duas e três diagonais forneceram resultados menos satisfatórios para as alvenarias de elevada rigidez.

A seguir, na Figura 41, estão apresentados gráficos com resultados de força cortante máxima obtidas para modelos de pórtico preenchido P60V80, como exemplo. Destaca-se que esses gráficos foram elaborados a partir de resultados que estão dispostos na Tabela B-2 deste trabalho.

Figura 41 – Força cortante máxima no pilar para os modelos definitivos com pórtico P60V80:

(a) BVC04P60V80; (b) BVC14P60V80; (c) BVC24P60V80; (d) BCPV04P60V80; (e) BCPM10P60V80; (f) BCPM18P60V80



Fonte: Autor (2022).

Ainda com relação à força cortante atuante no pilar, cabe destacar que, diferente do que foi observado para os modelos preliminares (seção 5.1), em que se notou uma inversão no diagrama de força cortante do pilar (na região fora do contato pórtico-parede) nos modelos com duas e três diagonais calculados por meio do procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) para os

casos com alvenarias mais rígidas, nos modelos definitivos esse comportamento não foi observado. Assim, percebe-se que o aumento de rigidez dos elementos que compõem o pórtico de concreto armado (pilares e vigas dos modelos definitivos possuem maiores dimensões de seção transversal e maior módulo de elasticidade que nos modelos preliminares) influenciou no comportamento do diagrama de força cortante do pilar dos modelos citados anteriormente.

5.2.3 Momentos fletores no pilar

Em todos os pórticos preenchidos simulados, os modelos MEF forneceram maiores valores de momento fletor (em módulo) na seção de topo do pilar (em contato com a parede) em relação à seção de base. No modelo clássico (com uma diagonal) e no modelo com duas diagonais esse comportamento foi contrário, com maiores momentos na seção de base; destaca-se que o modelo com duas diagonais foi o que mais se distanciou do comportamento observado nos modelos MEF. Já para os modelos com três diagonais, foram observados pórticos preenchidos que forneceram o mesmo comportamento dos modelos MEF e outros que não; para os que utilizaram a expressão de Mainstone (1974), 29% dos pórticos preenchidos simulados apresentaram o mesmo comportamento dos modelos MEF, enquanto para a expressão de Durrani e Luo (1994) e para o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020), 50% e 94%, respectivamente. Destaca-se que a maior incidência de modelos com maiores momentos na seção de base do pilar ocorreu nos pórticos com viga de 80 cm de altura (V80).

Tomando-se como referência o máximo momento fletor em módulo (que é utilizado para o dimensionamento de pilares), notou-se que o modelo com três diagonais foi o que forneceu resultados mais próximos em relação ao MEF, com diferença de média de 8,2% dos resultados (considerando diferenças absolutas). Para os modelos com uma diagonal e duas diagonais, essas diferenças foram de 10,8% e 21,4%, respectivamente

O modelo com duas diagonais foi o que forneceu os maiores resultados de momentos máximos. Seus resultados foram maiores que os de referência em todos os casos analisados, com valores cerca de 21,4% maiores que os fornecidos pelo MEF. Já os modelos com uma e três diagonais forneceram resultados maiores e menores que o MEF: para o modelo com uma diagonal, a média dos momentos máximos maiores que o MEF foi de 7,8%, enquanto para os menores foi de -14,3%; de forma análoga, para o modelo com três diagonais, tais médias foram de 9,5% e -5,4%.

A expressão de Durrani e Luo (1994) aplicada ao modelo com três diagonais foi a que forneceu resultados mais próximos em relação ao MEF. Em geral, para os valores que foram maiores aos obtidos pelo MEF, a diferença foi, em média, de 6,3%; já para os valores que foram menores, -7,6%. De maneira análoga, analisando os pórticos preenchidos com alvenaria de maior módulo de elasticidade, as diferenças foram de 4,7% e -9,0%; para os pórticos preenchidos com alvenaria de menor módulo de elasticidade, 7,2% e -2,9%.

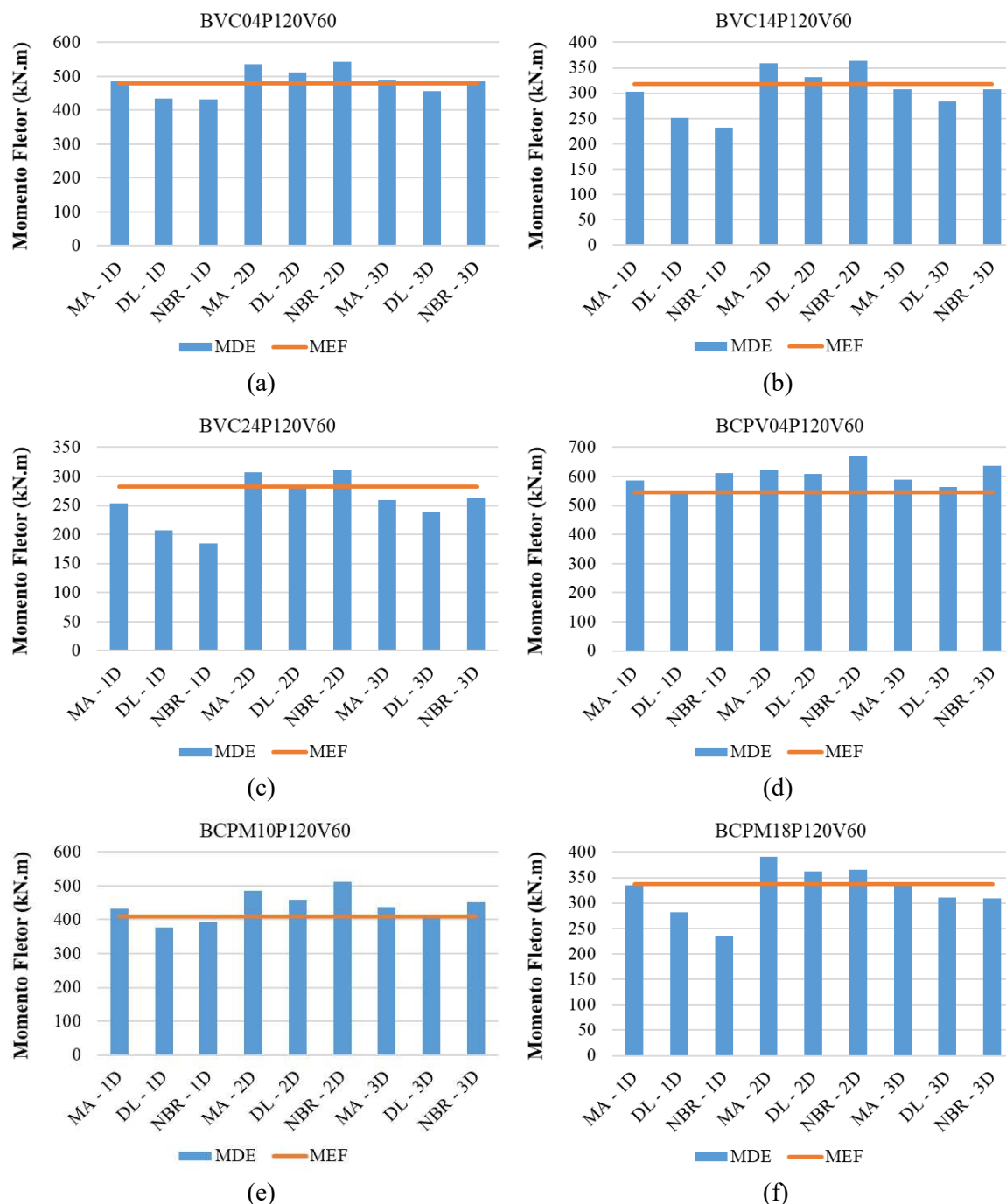
A expressão de Mainstone (1994) e o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020), aplicados no modelo com três diagonais, forneceram maiores momentos fletores em relação ao MEF nos pórticos com alvenarias de menor rigidez. As diferenças foram de 11,2% para a expressão de Mainstone (1994) e 12,1% para o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020).

Para os pórticos preenchidos com alvenaria de maior módulo de elasticidade, a expressão da ABNT NBR 16868-1 (2020), aplicada ao modelo com três diagonais, foi a que forneceu melhores resultados, de forma geral, em comparação ao MEF: para os valores que foram maiores que os obtidos pelo MEF, a diferença foi, em média, de 2,9%; já para os valores que foram menores, -4,0%.

Conforme mencionado, o modelo com duas diagonais forneceu momentos maiores que os resultados MEF em todos os casos analisados. As diferenças dos três métodos de cálculo avaliados foram importantes nesses modelos: 16,9% para Durrani e Luo (1994), 22,1% para Mainstone (1974) e 25,1% para ABNT NBR 16868-1 (2020).

A seguir, na Figura 42, estão apresentados gráficos com resultados de momento fletor máximo, em módulo, obtidos para modelos de pórtico preenchido P120V60, como exemplo. Destaca-se que esses gráficos foram elaborados a partir de resultados que estão dispostos nas Tabela B-3 e B-4 deste trabalho.

Figura 42 – Momento fletor máximo no pilar, em módulo, para os modelos definitivos com pórtico P120V60: (a) BVC04P120V60; (b) BVC14P120V60; (c) BVC24P120V60; (d) BCPV04P120V60; (e) BCPM10P120V60; (f) BCPM18P120V60



Fonte: Autor (2022).

Ainda com relação ao momento fletor atuante no pilar, diferente do que foi observado para os modelos preliminares (seção 5.1), em que se notou momentos fletores ao longo da altura livre do pilar maiores que os momentos na seção de base, nos modelos com duas e três diagonais calculados por meio da expressão da ABNT NBR 16868-1 (2020), para os casos com alvenarias

mais rígidas, nos modelos definitivos esse comportamento não foi observado. Assim, percebe-se que o aumento de rigidez dos elementos que compõem o pórtico de concreto armado influenciou também no comportamento do diagrama de momento fletor do pilar dos modelos citados anteriormente (de maneira similar ao que foi observado com relação ao diagrama de força cortante, citado na seção anterior).

5.2.4 Momento fletor negativo na viga

Analisando-se os resultados de forma geral, as diferenças entre os modelos MDE e MEF (referência), em termos absolutos, foram: 10,8% para o modelo com uma diagonal; 25,6% para o modelo com duas diagonais; 10,8% para o modelo com três diagonais. Assim, pode-se perceber que os modelos com uma e com três diagonais forneceram uma variação de momentos negativos bastante similar, em termos absolutos, em comparação ao MEF.

O modelo com duas diagonais foi o que forneceu os maiores resultados de momentos negativos. Seus resultados foram maiores que os de referência em todos os casos analisados, com valores cerca de 25,6% maiores que os fornecidos pelo MEF. Já os modelos com uma e três diagonais forneceram resultados maiores e menores que os de referência: para o modelo com uma diagonal, a média dos momentos máximos maiores que o MEF foi de 10,3%, enquanto para os menores foi de -12,6%; de forma análoga, para o modelo com três diagonais, tais médias foram de 11,1% e -9,6%. Assim, pode-se perceber que apesar das diferenças absolutas serem bastante próximas comparando os modelos com uma e com três diagonais, levando em consideração os resultados contrários à segurança (valores menores que o MEF), o modelo com três diagonais forneceu momentos negativos mais satisfatórios.

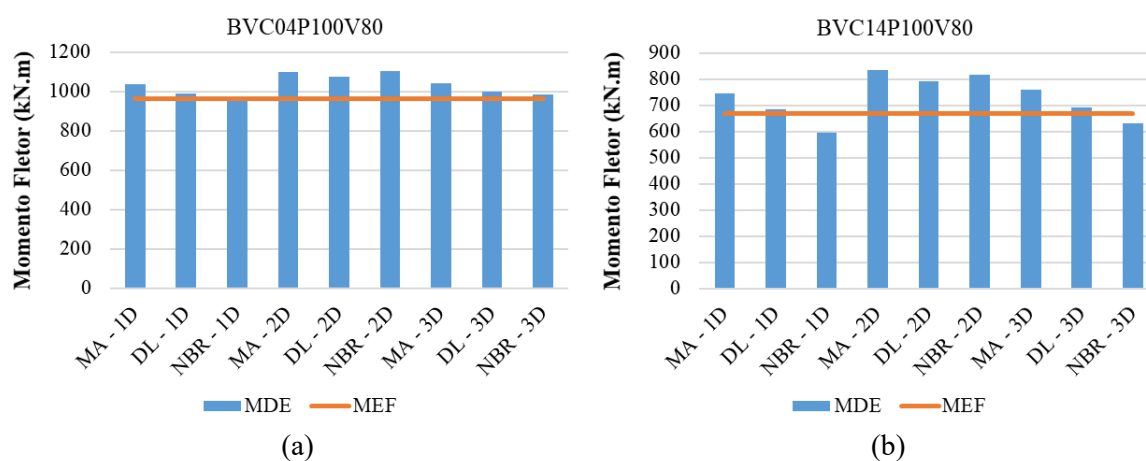
Para o modelo com três diagonais, a expressão de Durrani e Luo (1994) foi a que forneceu resultados mais próximos em relação ao MEF. Em geral, para os valores que foram maiores aos obtidos pelo MEF, a diferença foi, em média, de 5,6%; já para os valores que foram menores, -2,9%. De maneira análoga, analisando os pórticos preenchidos com alvenaria de maior módulo de elasticidade, as diferenças foram bem semelhantes aos valores gerais: 5,6% e -2,9%; para os pórticos preenchidos com alvenarias de menor módulo de elasticidade, todos os valores foram maiores que o MEF, com diferença média de 5,7%.

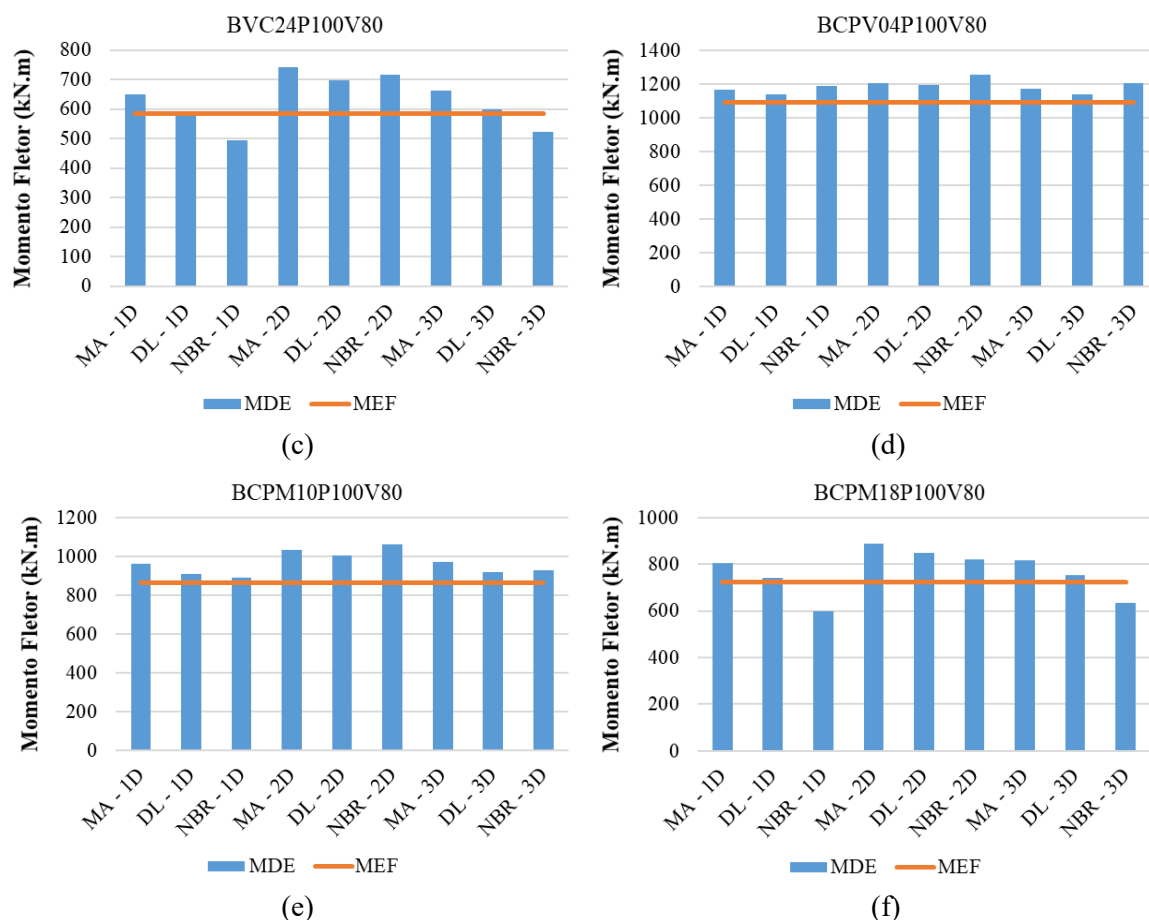
A expressão de Mainstone (1994) e o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020), aplicados no modelo com três diagonais, forneceram maiores momentos negativos em relação ao MEF nos pórticos preenchidos com alvenarias de menor módulo de elasticidade: as diferenças foram de 13,8% para a expressão de Mainstone (1994) e 10,3% para o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020). Para os pórticos preenchidos com alvenaria de maior módulo de elasticidade, a expressão de Mainstone (1994) também forneceu maiores momentos, com diferença média de 18,9%; já o procedimento da ABNT NBR 16868-1 forneceu resultados menores que o MEF, com diferença média de -11,7%.

Conforme mencionado, o modelo com duas diagonais forneceu momentos maiores que os resultados MEF em todos os casos analisados. As diferenças dos três procedimentos de cálculo avaliados foram importantes nesses modelos: 21,0% para Durrani e Luo (1994), 27,0% para ABNT NBR 16868-1 (2020) e 28,7% para Mainstone (1974).

A seguir, na Figura 43, estão apresentados gráficos com resultados de momento fletor negativo máximo obtidos para modelos de pórtico preenchido P100V80, como exemplo. Para facilitar a análise, optou-se por não considerar o sinal negativo nos valores obtidos. Destaca-se que esses gráficos foram elaborados a partir de resultados que estão dispostos na Tabela B-5 deste trabalho.

Figura 43 – Momento fletor negativo máximo na viga para os modelos definitivos com pórtico P100V80: (a) BVC04P100V80; (b) BVC14P100V80; (c) BVC24P100V80; (d) BCPV04P100V80; (e) BCPM10P100V80; (f) BCPM18P100V80





Fonte: Autor (2022).

5.2.5 Tensões de compressão na alvenaria

Para o modelo com duas diagonais, as tensões em ambas as diagonais foram praticamente as mesmas, com diferenças de 1,1% em média, com a diagonal superior fornecendo maiores resultados que a diagonal inferior na grande maioria dos pórticos preenchidos analisados (as exceções foram apenas os modelos do pórtico P60V60, preenchidos com alvenarias de maior módulo de elasticidade e calculados com o procedimento da norma brasileira).

Para o modelo com três diagonais, as tensões nas diagonais excêntricas também foram praticamente as mesmas, com a diagonal superior fornecendo resultados levemente maiores que a diagonal inferior. Comparando a tensão na diagonal superior com a diagonal central, foi possível notar que: para o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) a diagonal superior forneceu maiores tensões em todos os pórticos preenchidos analisados, com diferença média de 15,3% nos resultados; já para as expressões de Mainstone (1974) e Durrani e Luo (1994), para os pórticos preenchidos P60V80 e P80V80 o comportamento foi contrário, com a diagonal

superior fornecendo menores tensões que a diagonal central, com diferenças médias de -3,6% e -3,0% para as expressões de Mainstone (1974) e Durrani e Luo (1994), respectivamente; nos demais pórticos preenchidos o comportamento foi análogo ao do procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020), mas com diferenças médias menores, sendo 6,2% para a expressão de Mainstone (1974) e 7,3% para a expressão de Durrani e Luo (1994).

Comparando a maior tensão de compressão obtida em cada modelo MDE, notou-se que o modelo com três diagonais foi o que forneceu os maiores valores de tensão na alvenaria (entre os modelos MDE), com diferenças médias de 7,2% quando comparado ao modelo clássico, com uma diagonal, e de 12,4% quando comparado ao modelo com duas diagonais.

Analisando o desempenho dos três métodos de cálculo que foram utilizados para se obter as propriedades das diagonais equivalentes, observou-se que o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) foi o que forneceu as maiores tensões nos três modelos MDE estudados (com uma, duas e três diagonais). No modelo com uma diagonal, os resultados da expressão da norma brasileira foram cerca de 32,8% e 46,1% maiores que os fornecidos pelas expressões de Mainstone (1974) e de Durrani e Luo (1994), respectivamente; de forma análoga, para o modelo com duas diagonais as diferenças foram de 20,7% e 32,4%; para o modelo com três diagonais, 36,0% e 47,4%.

Destaca-se que as diferenças entre as tensões fornecidas pelo procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) em relação às outras expressões foram maiores nos pórticos preenchidos com alvenarias de menor módulo de elasticidade. Comparando com a expressão de Mainstone (1974), nos pórticos com alvenarias mais rígidas as diferenças foram de 15,6%, 12,8% e 21,3% (em relação ao modelo com uma, duas e três diagonais, respectivamente). Analogamente, nos pórticos com alvenarias menos rígidas, essas diferenças foram de 50,0%, 28,5% e 50,7%.

Também se optou por comparar a maior tensão de compressão obtida em cada modelo MDE com a máxima tensão principal de compressão obtida pelo MEF (evitando considerar resultados próximos à região de concentração de tensões). De forma geral, é de se esperar que as tensões principais, obtidas pelo MEF, sejam maiores que as tensões obtidas nos modelos MDE, visto que essas últimas podem ser tratadas como tensões médias. Entretanto, optou-se por comparar tensões principais com tensões médias para se avaliar os resultados dos modelos MDE em relação ao modelo de referência (MEF). Assim, foi possível notar que, de forma geral e em

termos absolutos, as diferenças entre os resultados MEF e MDE foram de 26,2% para o modelo com uma diagonal, 28,3% para o modelo com duas diagonais e 22,3% para o modelo com três diagonais.

Em todos os modelos calculados com as expressões de Mainstone (1994) e Durrani e Luo (1974) a tensão de compressão foi menor que a tensão principal máxima obtida pelo MEF. Para a expressão de Mainstone as diferenças médias foram: -29,6% para o modelo com uma diagonal; -30,3% para o modelo com duas diagonais; -25,5% para o modelo com três diagonais. Para a expressão de Durrani e Luo (1994), de forma análoga, as diferenças foram -36,6%, -36,8% e -32,0%, respectivamente.

Já para os modelos calculados com o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) foram obtidos resultados maiores e menores que a máxima tensão principal fornecida pelo MEF. Para o modelo com uma diagonal, a diferença média dos valores maiores foi de 12,3%, enquanto para os menores -12,4%; de maneira análoga, para o modelo com duas diagonais as diferenças foram 2,8% e -20,9%; para o modelo com três diagonais, 9,6% e -9,1%. Destaca-se que as tensões obtidas nos modelos MDE que foram maiores que a máxima fornecida pelo MEF foram observadas com maior frequência nos pórticos com alvenarias de menor módulo de elasticidade e nos pórticos com viga de 60 cm de altura (V60).

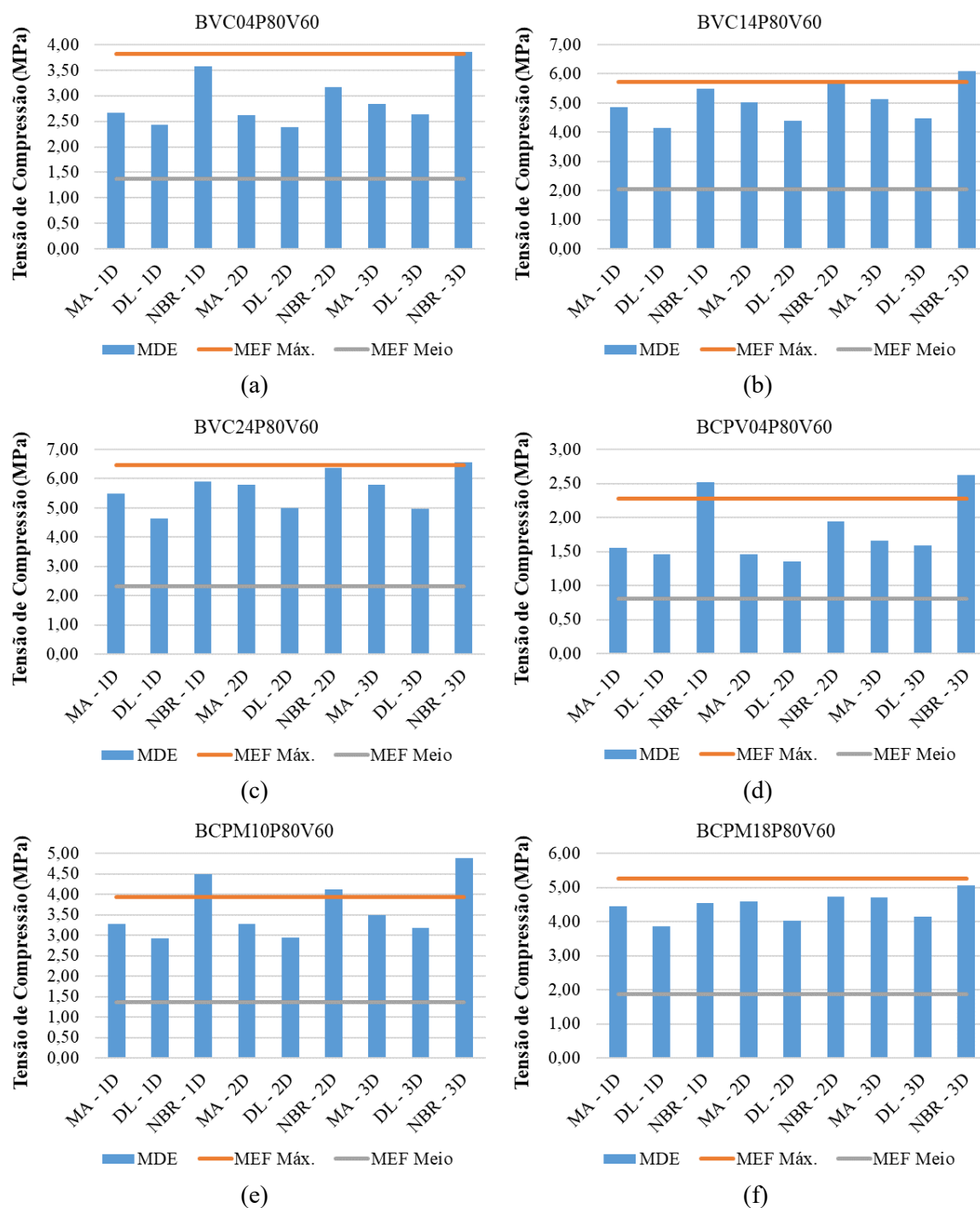
Para os modelos calculados com as expressões de Mainstone (1974) e Durrani e Luo (1994), foi possível perceber que as tensões obtidas nos modelos MDE foram mais próximas às máximas tensões principais fornecidas pelo MEF nos pórticos preenchidos com alvenarias de maior módulo de elasticidade.

Por fim, também foi realizada a comparação dos resultados obtidos nos modelos MDE com tensões principais de compressão medidas no meio da parede dos modelos MEF (local onde as tensões são menores na região da diagonal comprimida). Foi possível perceber que para todos os pórticos preenchidos analisados, os modelos MDE forneceram maiores valores que a tensão principal no meio da parede fornecida pelo MEF, com resultados cerca de 2,1 vezes maiores.

A seguir, na Figura 44, estão apresentados gráficos com resultados de tensão média de compressão (maior valor obtido em cada modelo MDE) e tensões principais máximas e no meio da parede (modelos MEF) obtidas para modelos de pórtico preenchido P80V60, como exemplo.

Destaca-se que esses gráficos foram elaborados a partir de resultados que estão dispostos nas Tabelas B-6 e B-7 deste trabalho.

Figura 44 – Tensões de compressão na alvenaria para os modelos definitivos com pórtico P80V60: (a) BVC04P80V60; (b) BVC14P80V60; (c) BVC24P80V60; (d) BCPV04P80V60; (e) BCPM10P80V60; (f) BCPM18P80V60



Fonte: Autor (2022).

5.3 CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DOS MODELOS ANALISADOS

As principais considerações obtidas por meio das análises realizadas neste capítulo estão dispostas a seguir.

O modelo clássico de diagonal única não é apropriado para obtenção dos esforços cortantes máximos no pilar na região de contato com a parede, fornecendo valores significativamente menores aos obtidos com os modelos MEF; destaca-se que a diferença é mais expressiva ao se analisar os pórticos preenchidos com alvenarias de maior módulo de elasticidade. Já o modelo com duas diagonais conseguiu capturar de forma satisfatória a força cortante máxima no pilar, independentemente do método de cálculo utilizado para determinar as propriedades das diagonais equivalentes. Embora o modelo com três diagonais tenha fornecido resultados menos satisfatórios que os de duas diagonais, mostrou-se melhor que o modelo clássico de uma diagonal para a obtenção da força cortante máxima no pilar.

Com relação aos deslocamentos horizontais, o modelo com três diagonais foi o que forneceu resultados mais próximos do modelo MEF, com deslocamentos ligeiramente superiores aos obtidos no modelo com uma diagonal na maioria dos pórticos preenchidos analisados. Notou-se que o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) aplicado ao modelo com três diagonais traz melhores resultados que quando aplicado ao modelo clássico de uma diagonal. Já o modelo com duas diagonais superestimou de forma relevante os deslocamentos horizontais; nesse modelo, a expressão de Durrani e Luo (1994) foi a que conduziu a resultados mais próximos dos obtidos pelo MEF.

Para o máximo momento fletor no pilar, notou-se que o modelo com três diagonais foi o que forneceu resultados que mais se aproximaram aos obtidos nos modelos de referência. Nesse modelo, a expressão de Durrani e Luo (1994) foi a que forneceu momentos fletores máximos mais próximos em relação ao MEF; entretanto, foram observados resultados contrários a segurança (menores que os fornecidos pelo MEF), principalmente nos pórticos com alvenarias mais rígidas. Para as alvenarias com menor módulo de elasticidade, a expressão de Mainstone (1974) forneceu resultados maiores e também próximos ao MEF; já para as alvenarias com maior módulo de elasticidade, a expressão da ABNT NBR 16868-1 (2020) forneceu os resultados que mais se aproximaram aos de referência. Destaca-se que, apesar de nos modelos

definitivos (seção 5.2) o formato do diagrama de momentos fletores ao longo do pilar ter se comportado de maneira adequada (em comparação ao MEF) em todos os pórticos analisados, isso não ocorreu nos modelos preliminares (seção 5.1) que continham alvenarias mais rígidas, calculados com o procedimento da norma brasileira (com duas e três diagonais). Dessa forma, recomenda-se uma melhor investigação para aplicação desses modelos em pórticos com pilares e vigas de menor rigidez.

Com relação ao máximo momento fletor negativo na viga, o modelo clássico com uma diagonal e o modelo com três diagonais, forneceram uma variação de resultados bastante similar em comparação ao MEF. Entretanto, ao priorizar resultados que estão a favor da segurança, o modelo com três diagonais forneceu valores mais satisfatórios. Novamente, a expressão de Durrani e Luo (1994) foi a que forneceu resultados mais próximos aos fornecidos pelo MEF: para os pórticos preenchidos com alvenarias de menor módulo de elasticidade, além de apresentar os resultados mais próximos, também foram todos a favor da segurança; já para os pórticos preenchidos com alvenarias de maior módulo de elasticidade, essa expressão forneceu alguns resultados contrários à segurança (menores que o MEF). Para os modelos com alvenarias mais rígidas, apesar da expressão de Mainstone (1994) fornecer resultados mais distantes em relação ao MEF, esses foram a favor da segurança; já o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) forneceu apenas resultados contrários à segurança para esse caso.

Para a máxima tensão de compressão obtida em cada modelo MDE, foi possível notar que o modelo com três diagonais foi o que forneceu maiores valores de tensão de compressão na alvenaria dentre os modelos MDE analisados. Da mesma forma, o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) foi o que apresentou os maiores resultados para os modelos com uma, duas e três diagonais. Comparando as tensões obtidas nos modelos MDE com as tensões principais fornecidas pelo MEF, observou-se que as expressões de Mainstone (1974) e Durrani e Luo (1994) forneceram valores menores que a máxima tensão principal de compressão obtida pelo MEF para todos os pórticos preenchidos analisados, conforme era esperado de forma geral. Apesar disso, essas expressões forneceram valores significativamente maiores quando comparadas às tensões principais no meio da parede fornecidas pelo MEF. O procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) foi o que forneceu resultados mais próximos em comparação à máxima tensão principal obtida pelo MEF, principalmente no modelo com três diagonais.

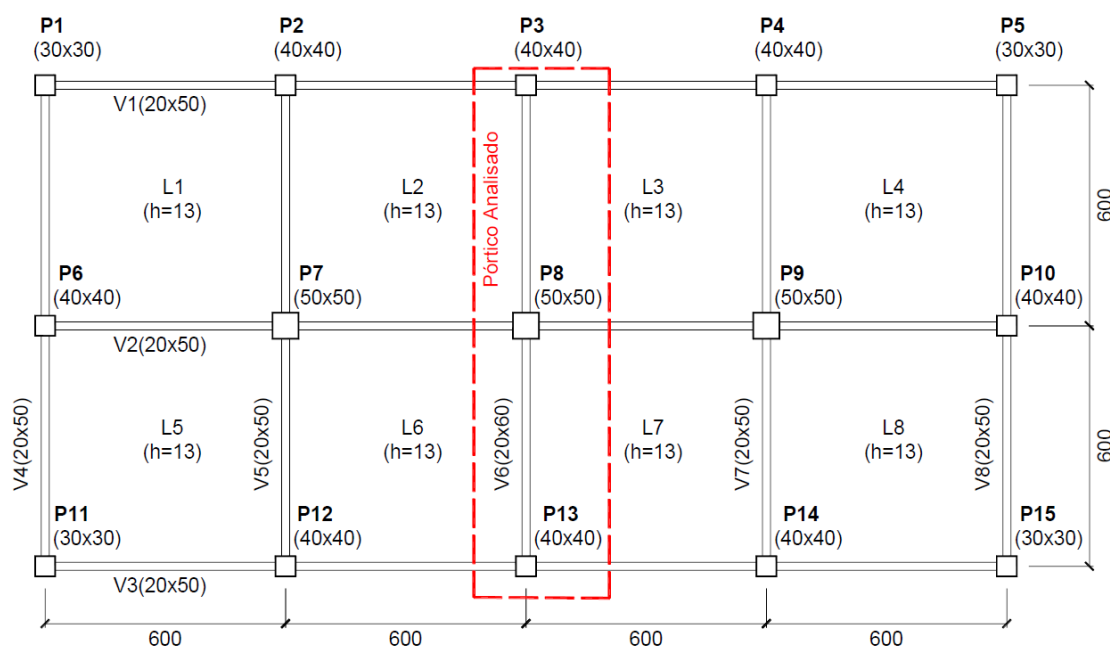
Por fim, percebeu-se que a rigidez das alvenarias influenciou os resultados dos modelos MDE. Tomando-se como referência uma análise a favor da segurança e mais próxima possível dos resultados MEF, recomenda-se a expressão de Mainstone (1974) com o modelo de três diagonais para obtenção do deslocamento horizontal do pórtico preenchido, dos máximos momentos fletores nos pilares e do máximo momento fletor negativo da viga; para a obtenção da máxima força cortante no pilar, recomenda-se o modelo com duas diagonais, independentemente do método de cálculo utilizado para determinar as propriedades das diagonais equivalentes; para análise da tensão de compressão na alvenaria, tendo como referência as máximas tensões principais de compressão obtida pelo MEF, recomenda-se o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) com o modelo de três diagonais.

6 ANÁLISE DE EDIFÍCIO DE MÚLTIPLOS ANDARES

O objetivo deste capítulo consiste em avaliar o comportamento estrutural de um pórtico preenchido com alvenaria participante, de um edifício de concreto armado de múltiplos andares, comparando os resultados obtidos por meio do MDE clássico e dos modelos com duas e três diagonais elaborados por meio dos procedimentos propostos no capítulo 5.

Optou-se por analisar o mesmo pórtico estudado por Galvão (2019) e Queiroz (2020) em suas respectivas pesquisas. O pórtico escolhido é de um edifício hipotético de 12 andares (incluindo a cobertura) e foi concebido de forma a apresentar uma estrutura com características geométricas e intensidade de ações usuais. A planta de fôrmas estruturais do edifício, com destaque para o pórtico analisado, está representada na Figura 45. Ressalta-se que as seções transversais de pilares e vigas são iguais para todos os andares.

Figura 45 – Planta de fôrmas estruturais do edifício



Fonte: Galvão (2019).

Foram admitidas as seguintes suposições para todos os modelos analisados: todos os pavimentos estão submetidos às mesmas ações verticais (para simplificar os modelos); inexistência de qualquer abertura nas paredes de alvenaria (para viabilizar a aplicação dos modelos MDE clássico e com duas e três diagonais); consideração de pilotis entre a base e o primeiro andar do edifício (ausência de alvenarias nessa região).

Os demais parâmetros considerados nos modelos foram obtidos conforme Galvão (2019) e estão descritos a seguir.

Com relação às propriedades geométricas e materiais empregados:

- Distância entre andares (H) = 2,8 m;
- Espessura da parede (t) = 19 cm;
- Concreto armado para os elementos do pórtico: C25;
- Alvenaria participante: bloco estrutural cerâmico vazado de parede maciça com $f_{bk} = 10,0$ MPa.

Para obtenção das ações verticais atuantes:

- Peso específico do concreto armado = 25 kN/m³;
- Peso próprio de revestimentos e pisos sobre as lajes = 1,0 kN/m² de laje;
- Carga variável nas lajes = 2,0 kN/m²;
- Peso próprio de alvenaria sobre todas as vigas = 2,5 kN/m² de alvenaria.

Para o cálculo das ações horizontais, efetuados conforme a ABNT NBR 6123 (1988):

- Velocidade básica do vento = 40 m/s;
- Fator topográfico: $S_t = 1,0$ (Terreno plano);
- Fator estatístico: $S_s = 1,0$ (Edifício comercial);
- Categoria do terreno: Categoria IV;
- Classe da edificação: Classe B.

Destaca-se que foi adotada uma combinação última normal de ações, baseada na ABNT NBR 6118 (2014), para se obter resultados referentes ao Estado Limite Último (ELU) da estrutura. Para isso, utilizou-se uma combinação em que a ação horizontal (provocada pelo vento) atua na direção do pórtico analisado e é considerada como a ação variável principal (combinação mais crítica para a alvenaria participante), descrita na Equação 29.

$$F_d = \gamma_g * F_{gk} + \gamma_q * (F_{q1k} + \psi_{0j} * F_{qjk}) \quad (29)$$

onde F_d é o valor de cálculo das ações para combinação última, F_{gk} representa as ações permanentes diretas (peso próprio), F_{q1k} representa a ação variável direta principal (para este caso, as ações horizontais provocadas pelo vento na direção do pórtico analisado), F_{qjk}

representa as demais ações variáveis diretas (carga variável nas lajes), γ_g é o coeficiente de ponderação para as ações permanentes (1,4), γ_q é o coeficiente de ponderação para as ações variáveis diretas (1,4) e ψ_{0j} é o fator de redução de combinação para ações variáveis diretas (0,7).

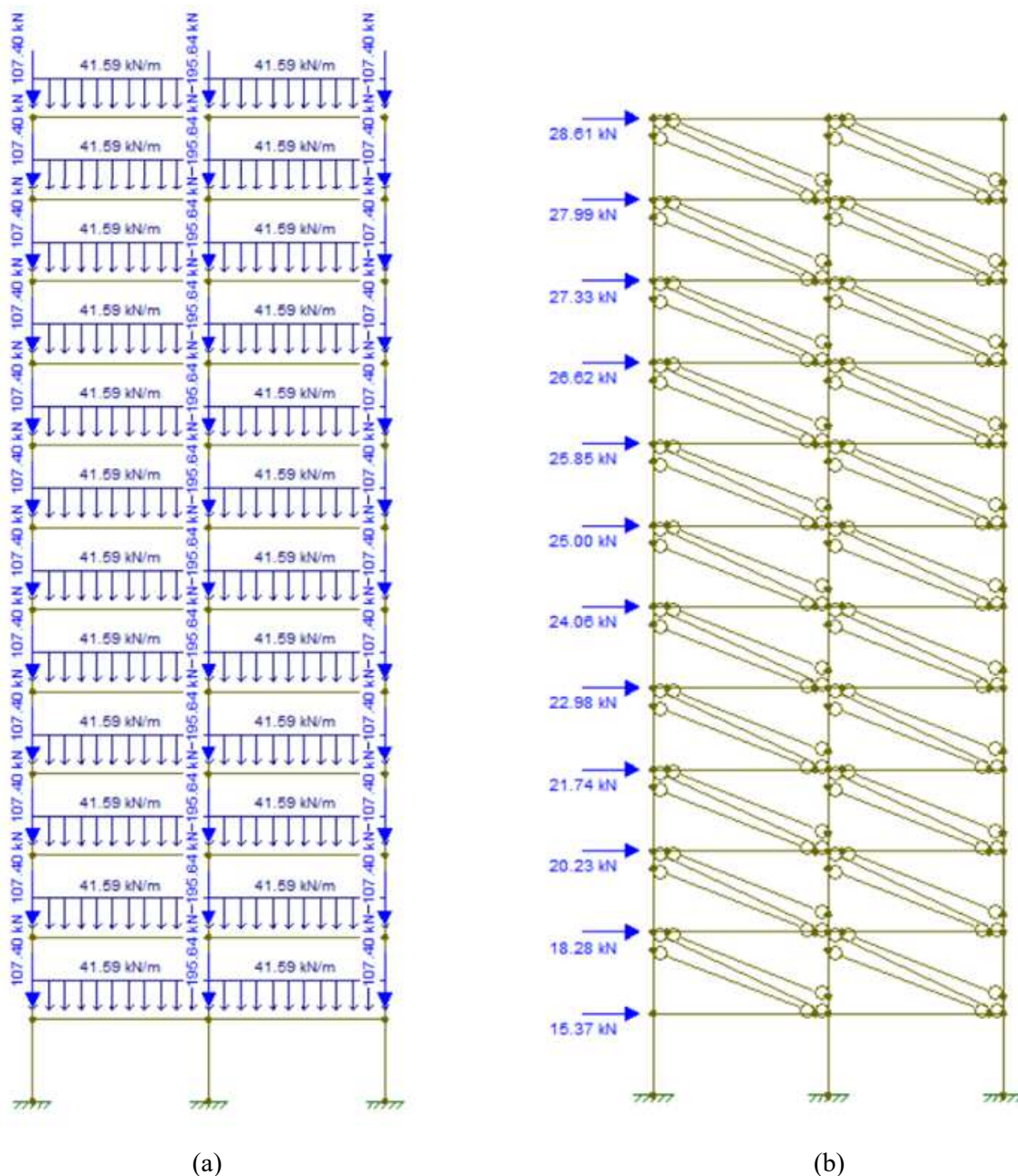
6.1 MODELOS NUMÉRICOS

Assim como nos trabalhos de Galvão (2019) e Queiroz (2020), com o intuito de se obter uma simulação mais realista, foram consideradas duas etapas construtivas para a modelagem do pórtico a ser analisado: Etapa 1, antes da fixação das alvenarias no pórtico, e Etapa 2, após a fixação das alvenarias.

Essa divisão foi baseada no fato de que, usualmente, a fixação das alvenarias no pórtico ocorre somente após a execução da estrutura de concreto armado e do levantamento das paredes de todos os pavimentos. Dessa forma, antes da fixação, todas as cargas verticais permanentes já estão instaladas, assim como parte da carga variável nas lajes (de construção). Com o intuito de simplificar as análises, considerou-se então que todas as cargas verticais (permanentes e variáveis) atuam na estrutura na Etapa 1, sem a consideração da alvenaria como elemento resistente no modelo estrutural, e que na Etapa 2 atuam apenas as ações horizontais (de vento), que solicitam a alvenaria participante. Assim, para se obter os esforços solicitantes e deslocamentos da estrutura, realiza-se a superposição de efeitos dessas etapas.

Para a consideração da alvenaria participante como elemento resistente, foram utilizados o MDE clássico e os modelos com duas e três diagonais descritos no capítulo 5. Com relação aos métodos de cálculo das propriedades das diagonais equivalentes, também foram escolhidos os mesmos do capítulo anterior: as expressões de Mainstone (1974) e Durrani e Luo (1994) e o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020). Dessa forma, a Etapa 1 é comum para todas as modelagens, variando a Etapa 2 de acordo com o método de cálculo e número de diagonais do modelo. Na Figura 46 estão representadas ambas as etapas citadas anteriormente, com a Etapa 2 sendo calculada por meio da expressão de Mainstone (1974) com três diagonais.

Figura 46 – Etapas consideradas para o modelo estrutural: (a) Etapa 1; (b) Etapa 2



Fonte: Autor (2022).

Para o desenvolvimento dos modelos analisados neste capítulo também foram admitidas algumas considerações contidas nos modelos de Galvão (2019) e Queiroz (2020): a alvenaria foi analisada como material de comportamento isotrópico; não foram considerados trechos rígidos nos elementos do pórtico (como o objetivo deste capítulo é apenas comparar os resultados de esforços solicitantes e deslocamentos horizontais entre os modelos MDE, optou-se por considerar essa simplificação em todos os modelos); adotaram-se reduções de rigidez

nos elementos do pórtico e na alvenaria, tendo em vista os efeitos da fissuração e da não linearidade física dos materiais no ELU.

Com relação às reduções de rigidez, para os elementos do pórtico seguiu-se a recomendação da ABNT NBR 6118 (2014), que indica que a não linearidade física pode ser considerada, de maneira aproximada, reduzindo-se a rigidez a flexão dos elementos: para o pilar, o fator de redução sugerido é igual a 0,8 e para a viga igual a 0,4. Já para a alvenaria, foi seguida a recomendação da ABNT NBR 16868-1 (2020) que indica um fator de redução de rigidez igual a 0,5, de forma análoga à norma canadense CSA S304 (2014). Esse fator de redução está disposto na Equação 11 (capítulo 2).

Os parâmetros a serem utilizados nos modelos com uma, duas e três diagonais foram obtidos por meios de procedimentos já comentados neste trabalho. Nas Tabelas 12, 13 e 14 estão dispostos os valores encontrados para tais parâmetros. Ressalta-se que, como os pilares do pórtico analisado possuem seções transversais de dimensões diferentes (nos pilares de extremidade h_p e b_p são iguais a 40 cm, no pilar interno h_p e b_p são iguais a 50 cm), para o cálculo da largura da diagonal equivalente se utilizou a média entre os momentos de inércia dos pilares, conforme Galvão (2019). Já para o cálculo das excentricidades nos modelos com duas e três diagonais, adotou-se o valor médio das dimensões h_p , baseado em conclusões obtidas por Montandon (2018).

Tabela 12 – Propriedades mecânicas dos materiais

Material	E (MPa)	ν
Concreto	28000	0,20
Alvenaria	3600	0,15

Fonte: Autor (2022).

Tabela 13 – Parâmetros para aplicação dos modelos MDE

Método de cálculo	Largura DE (cm)	Espessura DE (cm)	e_H (cm)	e_L (cm)
Mainstone (1974)	73,91	19	60,83	47,11
Durrani e Luo (1994)	81,87	19	65,12	57,90
ABNT NBR 16868-1 (2020)	149,25	8,8	101,36	149,33

Fonte: Autor (2022).

Tabela 14 – Coeficiente β

Método de cálculo	Nº de diagonais	Posição da diagonal	β
ABNT NBR 16868-1 (2020)	1	Central	1,479
	2	Excêntricas	1,258
	3	Central	1,267
	3	Excêntricas	1,418

Fonte: Autor (2022).

Por fim, ressalta-se que, conforme foi comentado na seção 2.4 deste trabalho, a ABNT NBR 16868-1 (2020) indica que elementos do pórtico em contato com a alvenaria participante devem ser dimensionados considerando que os esforços de força cortante e momento fletor obtidos do MDE sejam majorados por um coeficiente adicional igual a 1,1. Dessa forma, os esforços de força cortante e momento fletor provenientes da Etapa 2, ilustrada anteriormente na Figura 46, devem ser majorados para a realização da superposição de efeitos com a Etapa 1. Para efeitos comparativos, essa recomendação da norma brasileira foi adotada para todos os modelos deste capítulo, inclusive nos modelos com múltiplas diagonais e calculados pelas expressões de Mainstone (1974) e Durrani e Luo (1994).

6.2 RESULTADOS

Com o intuito de comparar os resultados obtidos nos modelos MDE com uma, duas e três diagonais, optou-se por analisar os seguintes resultados: coeficiente γ_z , calculado conforme a ABNT NBR 6118 (2014); deslocamentos horizontais dos andares; tensão média de compressão nas diagonais equivalentes; máximo valor absoluto de momento fletor de cálculo (M_A) e máxima força cortante de cálculo ($V_{sd,max}$) ao longo do pilar; momento fletor de cálculo no apoio de extremidade da viga (M_{sd}). A força cortante atuante na viga não foi analisada, podendo ser objeto de pesquisas futuras.

Para simplificar a nomenclatura de cada modelo, na ilustração dos resultados, adotou-se que: o modelo calculado pela expressão de Mainstone (1974) com duas diagonais, foi nomeado como Mainstone 2D, por exemplo; para os modelos que utilizaram a expressão de Durrani e Luo (1974) e o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) e que possuem uma, duas ou três diagonais, o processo foi análogo.

Primeiramente, foram analisados os resultados referentes à estabilidade global do pórtico (efeitos globais de segunda ordem), por meio do coeficiente γ_z , e os deslocamentos horizontais de cada modelo. Para essas análises também foram incluídos os resultados obtidos para o pórtico sem a consideração da alvenaria participante (modelo nomeado como “Pórtico sem AP”). Os resultados obtidos para o coeficiente γ_z estão dispostos na Tabela 15, enquanto os deslocamentos horizontais estão representados na Figura 47.

Tabela 15 – Coeficiente γ_z

Modelo	γ_z
Mainstone 1D	1,049
Durrani e Luo 1D	1,047
NBR 16868-1 1D	1,042
Mainstone 2D	1,060
Durrani e Luo 2D	1,059
NBR 16868-1 2D	1,068
Mainstone 3D	1,052
Durrani e Luo 3D	1,049
NBR 16868-1 3D	1,048
Pórtico sem AP	1,165

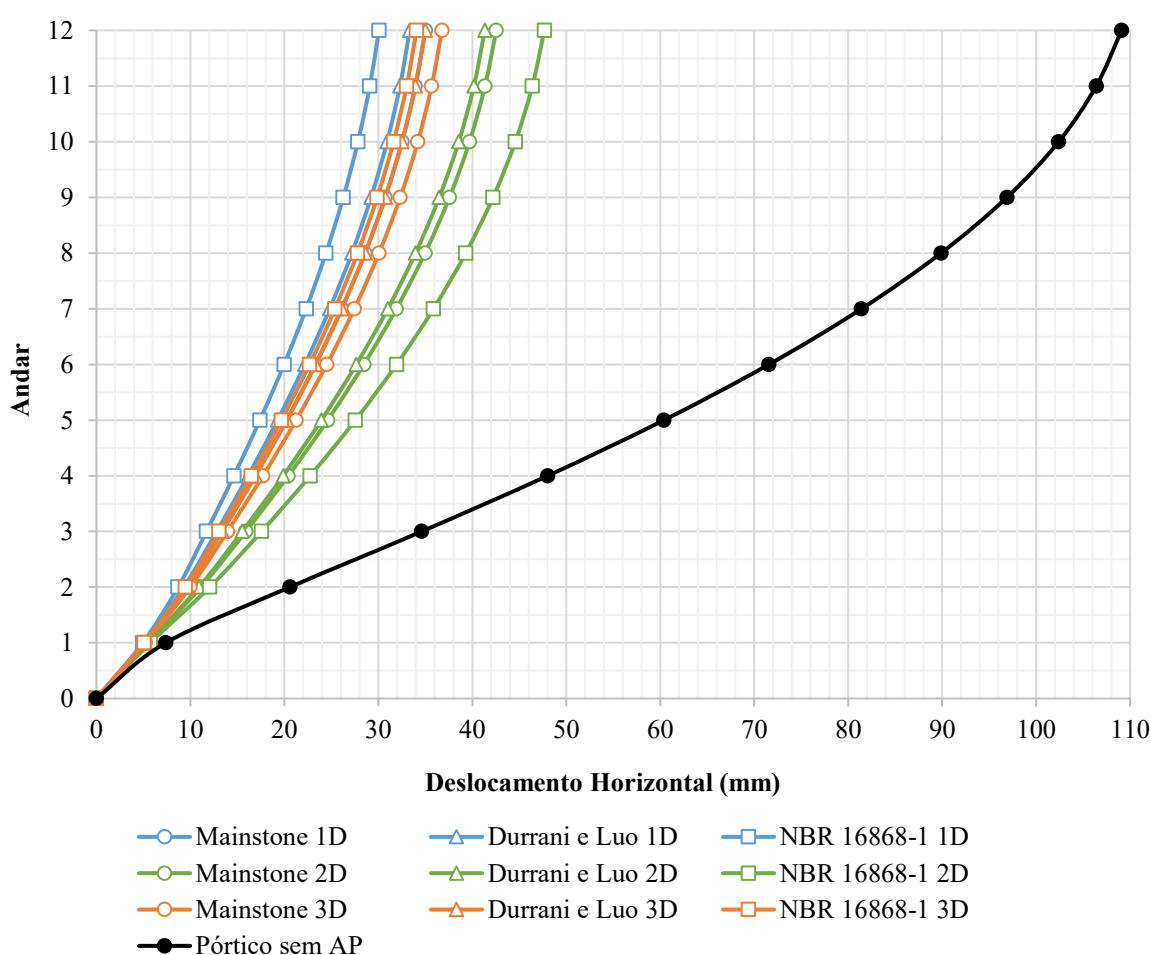
Fonte: Autor (2022).

Conforme é de se esperar intuitivamente, o modelo sem a consideração da alvenaria participante apresentou o maior valor de coeficiente γ_z , inclusive com a necessidade de consideração dos efeitos globais de segunda ordem, caso se desejasse realizar o dimensionamento da estrutura. Com relação aos modelos MDE, em todos não é necessária a consideração dos efeitos globais de segunda ordem (valores inferiores a 1,1). Notou-se que os valores do coeficiente γ_z foram maiores nos modelos com duas diagonais, com o modelo da ABNT NBR 16868-1 (2020) fornecendo o maior valor. Os resultados obtidos nos modelos com três diagonais foram ligeiramente superiores aos modelos com uma diagonal.

Com relação aos deslocamentos horizontais, primeiro destaca-se que, para o dimensionamento do pórtico sem a consideração da alvenaria participante, seria necessário a consideração dos efeitos globais de segunda ordem. Entretanto, como pretende-se apenas comparar os resultados obtidos em cada modelo, tal consideração não foi aplicada. Com isso, por meio dos resultados expostos na Figura 47, foi possível observar que: i) o modelo com duas diagonais forneceram os maiores deslocamentos, com diferença média de 33,2% em relação ao modelo clássico com

uma diagonal, e 24,0% em relação ao modelo com três diagonais; ii) o modelo com três diagonais forneceram deslocamentos cerca de 7,4% maiores que o modelo clássico; iii) o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) resultou nos maiores deslocamentos dentre os modelos com duas diagonais, enquanto que nos modelos com uma e três diagonais, foi o método que resultou nos menores deslocamentos; iv) a expressão de Durrani e Luo (1994) forneceu valores menores que a de Mainstone (1974) em todos os casos de diagonais, porém com diferenças não muito significativas; v) comparado com o modelo sem a consideração da alvenaria, o modelo MDE mais deslocável (NBR 16868-1 2D) promoveu um aumento da rigidez lateral em cerca de 2,1 vezes, enquanto que no modelo menos deslocável (NBR 16868-1 1D) esse aumento foi em cerca de 3,3 vezes.

Figura 47 – Deslocamentos horizontais dos andares

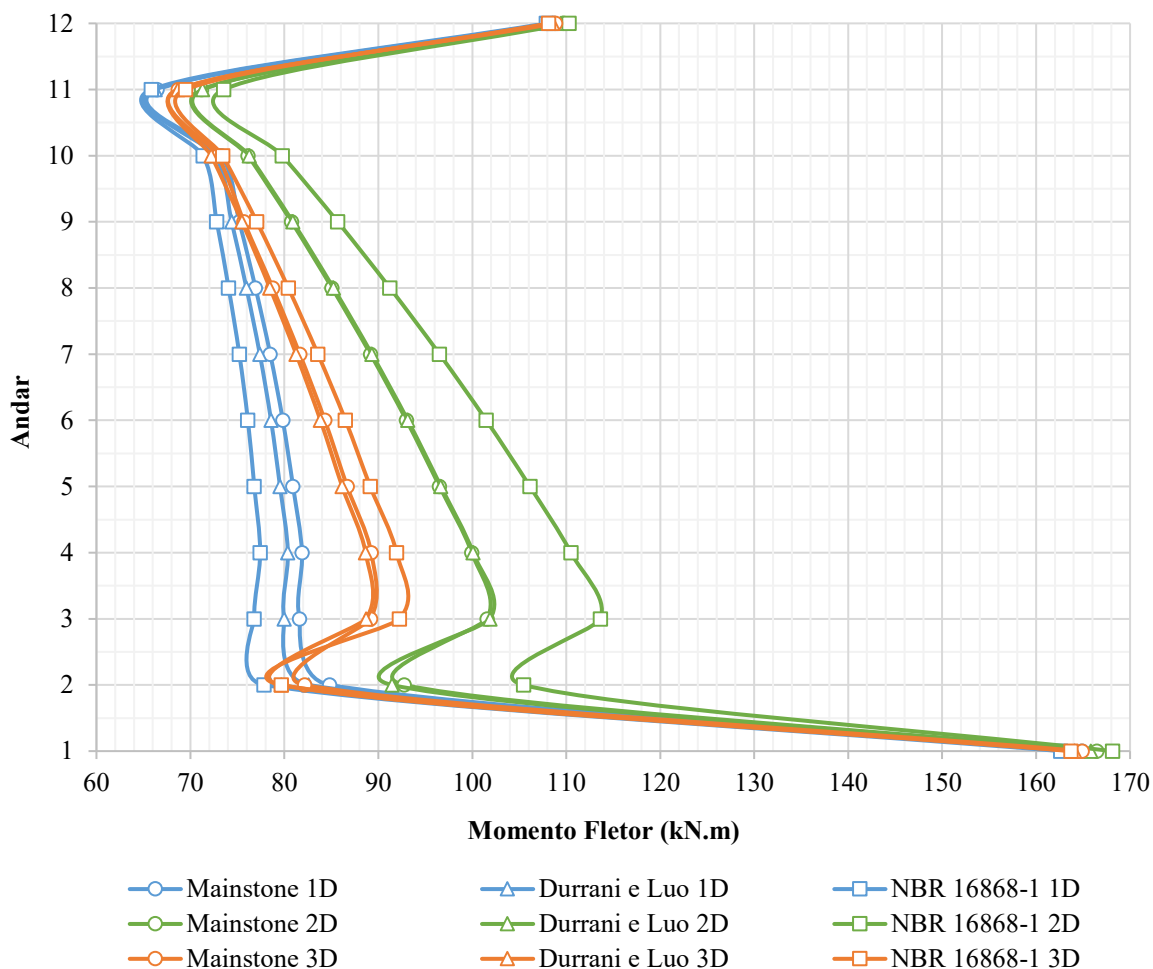


Fonte: Autor (2022).

Ressalta-se que, com a consideração dos efeitos globais de segunda ordem, o aumento da rigidez lateral do pórtico com a consideração da alvenaria participante é mais expressivo. Queiroz (2020), em seu trabalho, notou que a presença da alvenaria (utilizando MDE clássico com uma diagonal) ocasionou um aumento da rigidez lateral em torno de 7,5 vezes, quando comparado com a solução sem alvenaria participante. De forma similar, o autor também analisou as variações em esforços nos elementos do pórtico considerando o pórtico com e sem a alvenaria participante. Com relação aos máximos momentos fletores nos pilares, Queiroz (2020) constatou uma redução média em torno de 90% para o pilar interno e 43% para os pilares de extremidade, com a consideração da alvenaria participante (MDE clássico). Analogamente, para as vigas, a presença da alvenaria propiciou redução média em torno de 40% para os momentos negativos e diminuição de 20% para os momentos positivos.

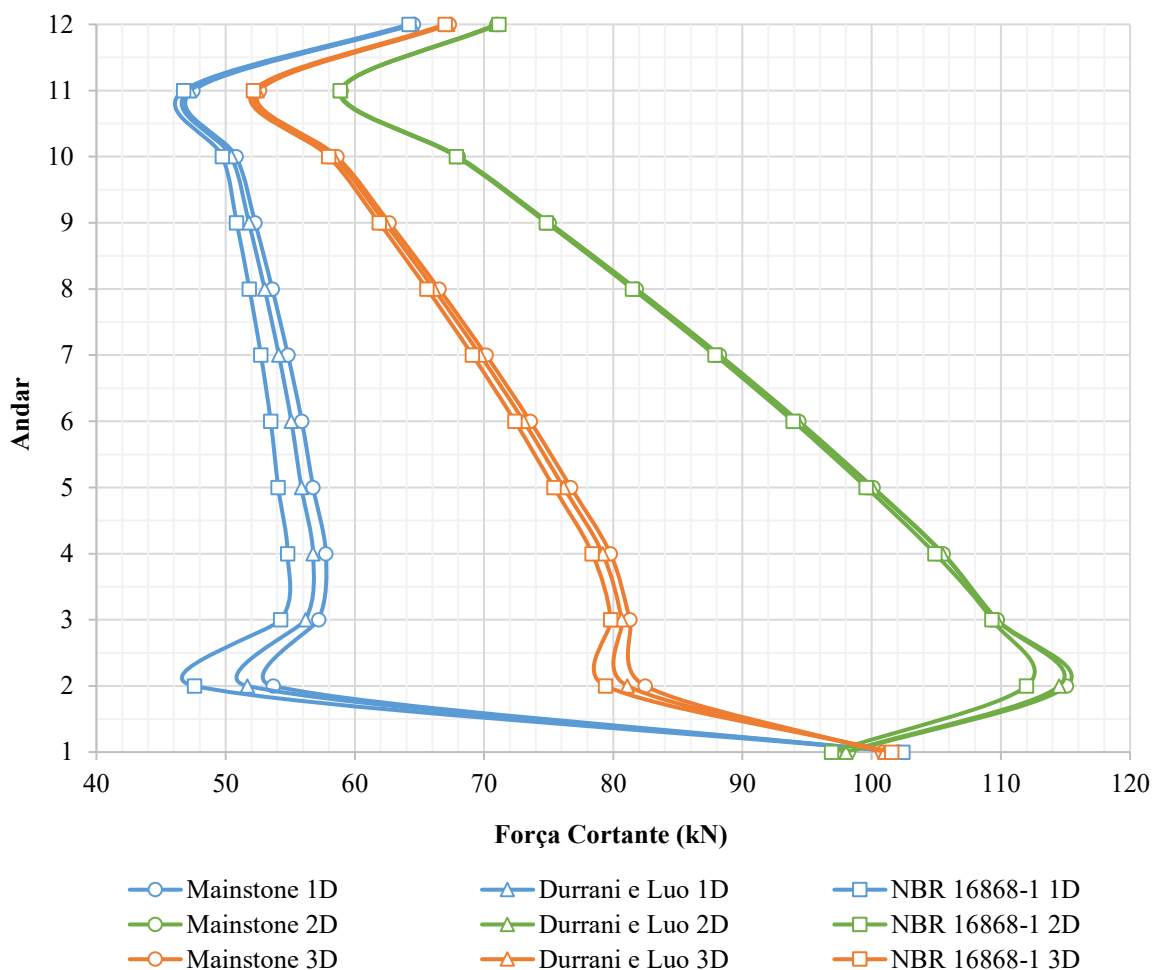
Para o presente trabalho, conforme já mencionado, não foram considerados os efeitos globais de segunda ordem no pórtico sem alvenaria participante. Assim, para as análises relacionadas aos esforços atuantes nos elementos do pórtico, optou-se por investigar somente os resultados dos modelos MDE com uma, duas e três diagonais. Para isso, admitiu-se que as ações horizontais podem atuar em dois sentidos opostos, gerando efeitos simétricos na estrutura. Dessa forma, os esforços solicitantes dos pilares de extremidade do pórtico foram considerados iguais; o mesmo foi adotado com relação aos momentos fletores das vigas nos apoios de extremidade.

Analisando os resultados de máximo valor absoluto de momento fletor de cálculo (M_A) que atua em cada andar do pilar de extremidade, dispostos na Figura 48, notou-se que: i) os modelos com duas diagonais, em todos os andares, foram os que apresentaram os maiores valores de momento fletor; ii) em geral, o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) forneceu os maiores resultados dentre os modelos com duas e três diagonais, com diferenças de até 13,7% em relação aos obtidos pela expressão de Mainstone (1974), e os menores resultados em relação aos modelos com uma diagonal, com diferenças de até 8,2%; iii) as expressões de Mainstone (1974) e Durrani e Luo (1994) forneceram resultados relativamente próximos entre si. Com relação ao pilar interno, o comportamento foi similar ao pilar de extremidade.

Figura 48 – M_A pilar de extremidade

Fonte: Autor (2022).

Com relação à máxima força cortante de cálculo ($V_{sd,max}$), os resultados obtidos para o pilar de extremidade estão representados na Figura 49. Foi possível perceber que: i) as forças cortantes máximas dos modelos com uma diagonal foram bem inferiores aos modelos com duas e três diagonais, estando de acordo com resultados obtidos no capítulo anterior; ii) os modelos com duas diagonais forneceram valores até 2,2 vezes maiores que os obtidos nos modelos com uma diagonal, e até 40% superiores aos modelos com três diagonais, no trecho do pilar situado entre o segundo e o primeiro andar; iii) as diferenças entre os resultados obtidos por cada expressão, com o mesmo número de diagonais, foram pequenas, especialmente nos modelos com duas diagonais.

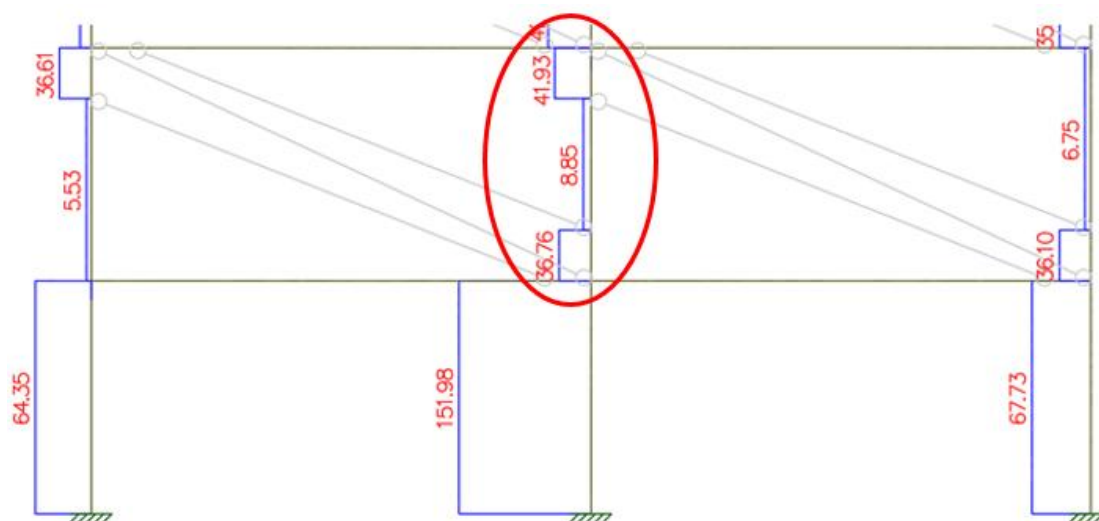
Figura 49 – $V_{sd,max}$ pilar de extremidade

Fonte: Autor (2022).

Para o pilar interno, o comportamento também foi semelhante. Entretanto, destaca-se que a diferença entre os valores fornecidos pelos modelos com duas diagonais foi maior quando se comparados aos obtidos nos modelos com uma diagonal, principalmente nos andares inferiores.

Ainda com relação às forças cortantes nos pilares, ressalta-se que os modelos com duas e três diagonais forneceram, para o pilar central, três trechos com diferentes valores de força cortante por andar, conforme ilustra a Figura 50. Na prática esse fato pode influenciar no cálculo e detalhamento das armaduras transversais dos pilares. Para o pilar de extremidade, considerando que as ações horizontais podem atuar em sentidos opostos do pórtico, esse comportamento também ocorre.

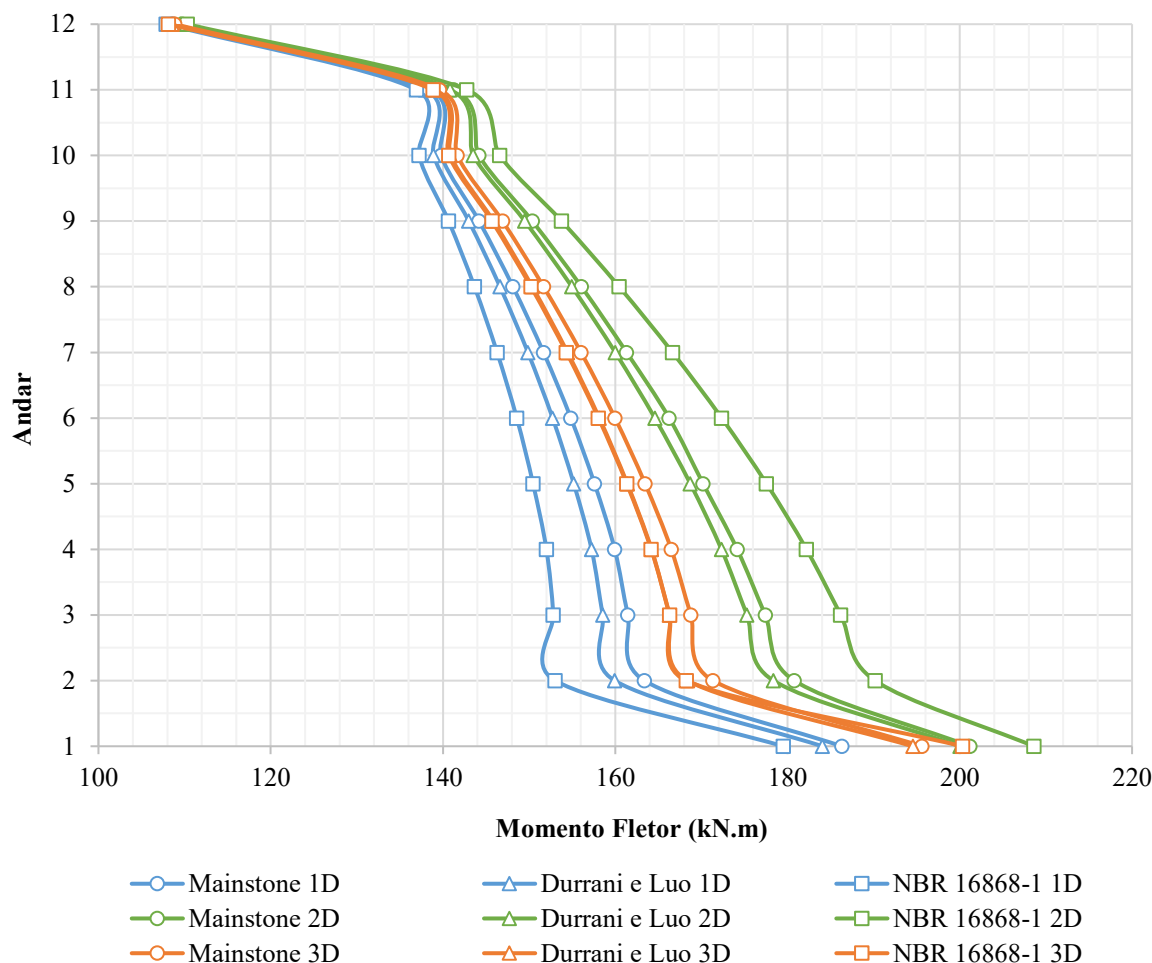
Figura 50 – Diagrama de força cortante nos pilares dos dois primeiros pavimentos para o modelo Mainstone 3D



Fonte: Autor (2022).

Já os resultados de momento fletor de cálculo no apoio de extremidade da viga (M_{sd}), estão representados na Figura 51. Ressalta-se que, os momentos fletores analisados consistem em momentos negativos, ou seja, que tracionam as fibras superiores das vigas. No entanto, para facilitar a análise gráfica, optou-se por não considerar o sinal negativo nos valores obtidos.

Por meio dos resultados obtidos, notou-se que: i) novamente, os modelos com duas diagonais foram os que forneceram maiores resultados, seguidos dos modelos com três diagonais; ii) as diferenças entre os resultados obtidos por cada expressão, com o mesmo número de diagonais, foram pequenas, com diferenças de até 6,5%; iii) os resultados da expressão de Durrani e Luo (1994) e do procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020), para o modelo com três diagonais, foram praticamente coincidentes, com exceção do momento obtido no primeiro andar (fato que fez com que a curva de Durrani e Luo 3D não ficasse clara na Figura 51) ; iv) a expressão de Durrani e Luo (1994) forneceu resultados ligeiramente inferiores em comparação com a de Mainstone (1974) em todos os modelos, com diferenças inferiores a 2,1%; v) o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) com duas diagonais forneceu os maiores valores, enquanto que com uma diagonal forneceu os menores valores, com diferenças de até 22,1% entre esses modelos (maiores diferenças nos andares inferiores).

Figura 51 – M_{sd} apoio de extremidade da viga

Fonte: Autor (2022).

Por fim, foram analisadas as tensões médias de compressão nas diagonais equivalentes. Para os modelos com duas diagonais, notou-se que, em todos os andares, as diagonais inferiores apresentaram valores maiores que as diagonais superiores, com diferenças mais significativas ocorrendo na alvenaria entre o segundo e o primeiro andar. Para as expressões de Mainstone (1974) e Durrani e Luo (1994) essa diferença foi de até 9,4% e 11,3%, respectivamente, enquanto para o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) foi de até 16,6%. Para ilustrar esse comportamento, na Figura 52 estão representados os esforços de compressão solicitantes nas diagonais dos primeiros quatro andares obtidos no modelo Durrani e Luo 2D. Ressalta-se que, nos modelos de duas diagonais, ambas possuem a mesma seção transversal.

Ainda com relação aos modelos de duas diagonais, observou-se que em todos os andares, para todos os casos analisados, as diagonais inferiores apresentaram maiores tensões de compressão

quando comparadas às diagonais dos modelos com apenas uma diagonal, com diferenças entre 7,8% e 22,2%. Também se observou que, comparando apenas os modelos com duas diagonais, o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) foi o que forneceu os maiores resultados, com valores até 22,1% superiores aos obtidos pela expressão de Mainstone (1974), por exemplo.

Figura 52 – Esforços de compressão nas diagonais dos primeiros andares para o modelo Durrani e Luo 2D



Fonte: Autor (2022).

Já para os modelos com três diagonais: i) para as expressões de Mainstone (1974) e Durrani e Luo (1994), em quase todos os andares a diagonal central apresentou maiores valores de tensão que as demais, com diferenças de até 12,5%, enquanto que no procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) o comportamento foi o oposto, com diferenças de até 18,6%; ii) em todos os andares, para os três modelos, a diagonal inferior apresentou maiores resultados que a diagonal superior, com diferenças de até 11,4% para a expressão de Mainstone (1974), 13,4% para Durrani e Luo (1994) e 19,5% para o procedimento da norma brasileira; iii) o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) forneceu os maiores valores, com diferenças de até 34,8% com os obtidos pela expressão de Mainstone (1974).

Portanto, as principais considerações obtidas com os resultados dos modelos deste capítulo estão dispostas a seguir.

Analisando os resultados dos modelos MDE, referentes à estabilidade global e aos deslocamentos horizontais do pórtico, notou-se que o modelo com duas diagonais faz com que o pórtico seja mais deslocável, fornecendo os maiores deslocamentos; já o modelo com três diagonais apresenta deslocamentos um pouco maiores que o modelo clássico com uma diagonal. Destaca-se que esse comportamento também foi verificado nos modelos do capítulo 5 deste trabalho, no qual foram simulados diversos pórticos preenchidos isolados (um vão e um andar).

Com relação aos esforços nos elementos do pórtico, verificou-se que para os três resultados analisados (máximo valor absoluto de momento fletor de cálculo e máxima força cortante de cálculo ao longo do pilar, e momento fletor de cálculo no apoio de extremidade da viga), o modelo com duas diagonais foi o que forneceu os maiores resultados, seguido do modelo com três diagonais. Nos modelos do capítulo 5 esse fato também foi observado. Outro fato em comum que foi notado é que, para o modelo com duas diagonais, o valor da força cortante máxima no pilar é praticamente o mesmo, independentemente do método de cálculo utilizado para determinar as propriedades das diagonais equivalentes.

Ainda com relação a força cortante que atua nos pilares, ressalta-se que os modelos com duas e três diagonais forneceram três trechos com diferentes valores de força cortante por andar, o que pode influenciar no cálculo e detalhamento das armaduras transversais desses elementos.

Para as tensões de compressão atuantes na alvenaria participante, notou-se que o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) foi o que forneceu as maiores tensões para os três modelos estudados (uma, duas e três diagonais), seguido da expressão de Mainstone (1974), o que também foi verificado nos modelos do capítulo 5.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram analisados diversos pórticos de concreto armado, preenchidos com alvenarias participantes, submetido a ações horizontais, modelados com o emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF) e com Modelos de Diagonal Equivalente (MDE). Primeiramente, analisou-se a influência da consideração da ortotropia nos modelos numéricos de pórticos preenchidos e, em seguida, foi proposto um procedimento para o posicionamento das diagonais equivalentes em modelos compostos por duas e três diagonais, em que as excentricidades das barras são calculadas em função da largura da diagonal equivalente do MDE clássico. Além disso, também foi proposto a inclusão de um coeficiente (denominado neste trabalho de β) para consideração da rigidez efetiva da diagonal equivalente, de acordo com recomendações da ABNT NBR 16868-1 (2020). Foram investigadas a influência da consideração das expressões de Mainstone (1974) e Durrani e Luo (1994) e do procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) para o cálculo da largura equivalente, e também a influência da rigidez das alvenarias na qualidade dos resultados fornecidos pelos MDE desenvolvidos, tendo como referência os valores obtidos com o MEF.

Com base nas simulações numéricas realizadas, destacam-se como as principais considerações:

- Sabe-se que a alvenaria é um material de comportamento complexo, devido a suas propriedades de anisotropia e heterogeneidade. Por essa razão, muitas vezes é conveniente admitir a alvenaria como material isotrópico em simulações numéricas, tendo como base estudos em que foi demonstrado que essa simplificação não afeta de forma significativa o comportamento do pórtico preenchido (em determinadas situações), como a pesquisa de Doudoumis (2007). Entretanto, no capítulo 4 deste trabalho, ao se considerar a alvenaria como material ortotrópico (de forma a aproximar do comportamento anisotrópico), utilizando considerações dispostas na literatura, notou-se diferenças significativas para o pórtico preenchido analisado: a consideração da ortotropia fez com que rigidez da alvenaria fosse menor do que com a consideração da isotropia, o que ocasionou diferenças de cerca de 13% no modelo MEF (deslocamento horizontal do pórtico e máxima tensão principal de compressão na alvenaria) e de 18% nos modelos MDE (deslocamento horizontal).

- Apesar do MDE clássico (com uma diagonal) ser o modelo mais difundido no meio técnico, principalmente devido à simplicidade de sua aplicação, alguns autores já destacaram que esse modelo não fornece resultados satisfatórios com relação aos esforços internos nos elementos do pórtico que estão em contato com a alvenaria. Nesse contexto, com os resultados obtidos no capítulo 5, foi possível observar claramente que o MDE clássico não é apropriado para obtenção da força cortante máxima no pilar na região de contato com a alvenaria, fornecendo valores, em média, 50% menores em relação aos resultados do MEF. Considerando-se as alvenarias de maior rigidez, a diferença foi ainda maior, com a cortante máxima obtida no modelo clássico sendo apenas 33% do valor máximo fornecido nos modelos de referência.
- Ainda com relação aos resultados obtidos no capítulo 5, tomando-se como referência uma análise a favor da segurança e mais próxima possível dos resultados MEF, recomenda-se a utilização do modelo com duas diagonais para a obtenção da máxima força cortante do pilar, independentemente do método de cálculo utilizado para determinar as propriedades das diagonais equivalentes, visto que tanto para as expressões de Mainstone (1974) e Durrani e Luo (1994), quanto para o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020), os valores foram praticamente os mesmos no modelo com duas diagonais.
- De forma análoga, para obtenção do deslocamento horizontal do pórtico preenchido, dos máximos momentos fletores nos pilares e do máximo momento fletor negativo da viga, recomenda-se a expressão de Mainstone (1974) com o modelo de três diagonais. Destaca-se que, de forma geral, a expressão de Durrani e Luo (1994) aplicada ao modelo com três diagonais foi a que forneceu os resultados mais próximos em relação ao MEF; entretanto, como essa expressão apresentou resultados contrários à segurança, especialmente em pórticos com alvenarias mais rígidas, optou-se por recomendar a expressão de Mainstone (1974), que forneceu resultados mais conservadores.
- Considerando-se a máxima tensão de compressão obtida em cada modelo MDE foi possível notar que o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) foi o que apresentou os maiores resultados para os todos os modelos estudados (uma, duas e três diagonais). Para análise da tensão de compressão na alvenaria, tendo como referência as máximas tensões

principais de compressão obtida pelo MEF, recomenda-se o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) com o modelo de três diagonais.

- Foi possível observar que a rigidez das alvenarias influenciou os resultados dos modelos MDE. Analisando os resultados de força cortante máxima no pilar, por exemplo, notou-se que os modelos com duas e três diagonais, modelados de acordo com o procedimento proposto neste trabalho, forneceram resultados menos satisfatórios para as alvenarias de elevada rigidez.
- Ressalta-se que, nos modelos preliminares (seção 5.1) com alvenarias mais rígidas, o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) aplicado aos modelos com duas e três diagonais forneceu diagramas de força cortante e momento fletor para o pilar com comportamentos diferentes do modelo MEF, fato que não foi observado nos modelos definitivos (seção 5.2). Assim, constatou-se que o aumento de rigidez dos elementos do pórtico de concreto armado (visto que os pilares e as vigas dos modelos definitivos possuem maiores dimensões de seção transversal e maior módulo de elasticidade que nos modelos preliminares) influenciou nesses resultados, indicando ser necessário mais investigações nesse sentido.
- Por meio dos resultados obtidos nos modelos de pórticos preenchidos de 12 andares (capítulo 6), foi possível observar comportamentos semelhantes aos modelos de pórticos isolados (capítulo 5): o modelo com duas diagonais equivalentes fornece os maiores deslocamentos horizontais dentre os modelos MDE estudados neste trabalho, enquanto o modelo com três diagonais apresenta deslocamentos ligeiramente maiores que o modelo clássico; com relação aos esforços no pórtico, notou-se que o modelo com duas diagonais também foi o que forneceu os maiores resultados, seguido do modelo com três diagonais; o procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) forneceu maiores tensões de compressão nas diagonais equivalentes, quando comparado às expressões de Mainstone (1974) e Durrani e Luo (1994).
- Destaca-se também que, no pórtico preenchido de 12 andares, notou-se que os modelos com duas e três diagonais apresentaram três trechos com diferentes valores de força

cortante que solicitam os pilares, fato que pode influenciar no cálculo e detalhamento das armaduras transversais desses elementos.

- Por último, sugere-se que os resultados obtidos para o pórtico preenchido de 12 andares sejam comparados com um modelo de pórtico preenchido de múltiplos andares simulado com análise mais refinada (utilizando o MEF, por exemplo), com o intuito de se obter resultados de referência para investigação dos modelos desenvolvidos.

Para o desenvolvimento de futuras pesquisas, sugerem-se os seguintes pontos:

- Investigar a aplicação do procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) nos modelos com duas e três diagonais, em pórticos preenchidos com alvenarias mais rígidas, com características semelhantes aos estudados nos modelos preliminares (seção 5.1) deste trabalho, a fim de verificar o comportamento dos diagramas de esforços dos elementos do pórtico.
- Verificar se os esforços adicionais produzidos na região do contato pórtico-alvenaria impactam de maneira significativa no dimensionamento e detalhamento dos pilares e das vigas em contato com a parede.
- Desenvolvimento de um modelo com análise mais refinada de pórtico preenchido de múltiplos andares, com o objetivo de se obter resultados de referência para investigação dos modelos com duas e três diagonais em pórticos com essa característica.
- Estudos experimentais para avaliação da qualidade dos resultados obtidos nos modelos numéricos MEF e MDE desenvolvidos neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2014.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, ABNT, 1988.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15812-1**: Alvenaria estrutural - Blocos cerâmicos - Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro, ABNT, 2010.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15961-1**: Alvenaria estrutural - Blocos de concreto - Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro, ABNT, 2011.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868-1**: Alvenaria estrutural - Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, ABNT, 2020.
- ALVA, G. M. S.; KAMINSKI JR, J.; MOHAMAD, G.; SILVA, L. R. Estado limite de serviço de deformações horizontais excessivas com a consideração das alvenarias de preenchimento no modelo estrutural. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**. v.8, nº 3, p.390-426, 2015. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952015000300008>
- ALVARENGA, R. C. S. S. **Análise teórico-experimental de estruturas compostas de pórticos de aço preenchidos com alvenaria de concreto celular autoclavado**. 2002. 342 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.
- ARAÚJO, J. M. **Projeto estrutural de edifícios de concreto armado**. 3. ed. Rio Grande: Editora DUNAS, 2014.
- ASTERIS, P. G.; KAKALETSIS, D. J.; CHRYSOSTOMOU, C. Z.; SMYROU, E. E. Failure Modes of In-filled Frames. **Electronic Journal of Structural Engineering**, v.11, n.1, p.11 20, 2011a.
- ASTERIS, P. G.; ANTONIOU, S. T.; SOPHIANOPOULOS, D. S. ASCE, M. CHRYSOSTOMOU, C. Z. Mathematical Macromodeling of Infilled Frames: State of the Art. **Electronic Journal of the Structural Engineering**, v.137, n.12, p.1508-1517, 2011b. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000384](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000384)
- BENJAMIN, J. R.; WILLIAMS, H. A. The behavior of one-storey brick shear walls. **ASCE Journal of the Structural Division**, Vol. 84, n. ST4, 1958. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000263>
- BRZEV, S.; ANDERSON, D. **Seismic design guide for masonry buildings**. Canadian Concrete Masonry Producers Association, 2018.
- CAVALERI, L.; PAPIA, M.; MACALUSO, G.; DI TRAPANI, F.; COLAJANNI, P. Definition of diagonal Poisson's ratio and elastic modulus for infill masonry walls. **Materials and Structures**, v. 47, p. 239-262, 2014. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0058-9>

CHRYSTOSTOMOU, C. Z.; ASTERIS, P. G. On the in-plane properties and capacities of infilled frames. **Engineering Structures**, v.41, Aug, p.385-402, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.057>

CRISAFULLI, F. J.; CARR, A. J. Proposed macro-model for the analysis of infilled frame structures. **Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering**, v.40, p.69-77, 2007. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.40.2.69-77>

CSA. CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA S304-14: Design of Masonry Structures**. Mississauga, CSA, 2014.

DAWE, J. L.; SEAH, C. K. Analysis of concrete masonry infilled steel frames subjected to in-plane loads. **Proceedings, 5th Canadian Masonry Symposium**. University of British Columbia, Vancouver, Canadá. p. 329-340, 1989.

DECANINI, L. D.; FANTIN, G. E. Modelos simplificados de la mampostería incluida en porticos. Características de stiffnessy resistencia lateral en estado limite. **Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural**, v.2, Buenos Aires, Argentina, p.817-836, 1987.

DOUDOUNIS, I.N. Finite element modelling and investigation of the behaviour of elastic infilled frames under monotonic loading. **Engineering Structures**, v.29, n.6, p.1004-1024, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.07.011>

DURRANI, A.J.; LUO, Y.H. Seismic retrofit of flat-slab buildings with masonry infills. **Proceedings from the NCEER Workshop on Seismic Response of Masonry Infills**, National Center for Engineering Earthquake, Buffalo, N.Y., 1994.

EL-DAKHAKHNI, W. W.; ELGAALY, M.; HAMID, A. A. Three-Strut Model for Concrete Masonry-Infilled Steel Frames. **ASCE Journal of Structural Engineering**, v.129, p.177-185, 2003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:2\(177\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:2(177))

FEMA. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. **FEMA 306: Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings – Basic Procedures Manual**. Redwood City, FEMA, 1998.

FLANAGAN, R. D.; BENNETT, R. M. In-plane behavior of structural clay tile infilled frames. **ASCE Journal of Structural Engineering**, v. 125(6), p.590-599, 1999. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1999\)125:6\(590\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:6(590))

FOROUSHANI, S. A. **Experimental investigation of the in-plane behaviour of concrete masonry infills bouded by masonry frames**. Halifax: Dalhousie University, 2019.

GALVÃO, L. F. **Projeto de edifícios de múltiplos andares de concreto armado com a consideração de alvenarias participantes**. 2019. 28 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

GRANDI, A. B. C. **Avaliação experimental por meio de ensaios cíclicos de pórticos de aço preenchido com alvenaria participante**. 2018. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

HENDRY, A. W. **Structural Brickwork**. MacMillan, London, 1981. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-81439-8>

HOLMES, M. Steel frames with brickwork and concrete infilling. **ICE Proceedings**. 19(4). p. 473-478, 1961. <https://doi.org/10.1680/icep.1961.11305>

LIAUW, T. C.; KWAN, K. H. Nonlinear behavior of non-integral infilled frames. **Computers and Structures**, v.18, n.3, p.551-560, 1984. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(84\)90070-1](https://doi.org/10.1016/0045-7949(84)90070-1)

LOURENÇO, P. J. B. B. **Computacional strategies for masonry structures**. Delft: Delft University of Technology, 1996.

MAINSTONE, R. J. Supplementary note on the stiffness and strengths of infilled frames. **Building Research Station**, Garston, UK, 1974.

MEDEIROS, W. A. **Pórticos em concreto pré-moldado preenchidos com alvenaria participante**. 2018. 163 f. Dissertação (Mestrado em estruturas e construção civil - Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2018. <https://doi.org/10.17648/tecsic-2017-72093>

MONTANDON, G. A. **Modelos estruturais para a análise de pórticos preenchidos com blocos cerâmicos em edifícios de concreto armado**. 2018. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

NZS. STANDARD ASSOCIATION OF NEW ZEALAND. **NZS 4320**: Design of reinforced concrete masonry structures. Wellington, NZS, 2004.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural**. 2. ed. EdUFSCar – Editora da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2013.

PAULAY, T.; PRIESTLEY, M. J. N. **Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings**. Wiley, New York, 1992. <https://doi.org/10.1002/9780470172841>

POLYAKOV, S. V. **Masonry in framed buildings** (Godsudarstvenoe Isdatel'stvo Literatury Po Stroitel'stvo i Arhitektura. Moscow, 1956). Traduzido por G. L. Cairns, 1963. **National Lending Library for Science and Technology**, Boston, 1956.

POLYAKOV, S. V. On the interaction between masonry filler walls and enclosing frame when loaded in the plane of the wall. **Earthquake Engineering**, Earthquake Engineering Research Institute, São Francisco, CA, p.36-42, 1960.

QUEIROZ, L. F. **Alvenarias participantes: consideração e efeitos em edifícios de concreto sob ações horizontais**. 2020. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

RATHBUN, J. C. Wind forces on a tall building. **American Society of Civil Engineers: Proceedings**, Reston, Virginia, v.64, p.1335-1375, 1938.

SANTOS, E. M. **Influência da alvenaria no comportamento estrutural de edifícios altos de concreto armado**. 2007. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2007.

SANTOS, F. A. **Efeito do não-preenchimento de juntas verticais no desempenho de edifícios em alvenaria estrutural**. 2001. 173 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SANTOS, R. F. **Avaliação numérica de pórticos de aço preenchidos com painéis de alvenaria estrutural de blocos de concreto submetidos à carregamentos cíclicos**. 2019. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

SILVA, G. H. **Escolha de parâmetros para análise de contato entre corpos elásticos usando elementos finitos e redes neurais**. 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

SILVA, L. R. **Modelagem de pórticos de concreto armado preenchidos com a consideração de aberturas nos painéis de alvenaria**. 2014. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

STAFFORD-SMITH, B. Behavior of square infilled frames. **ASCE Journal of Structural Division**, v. 92, n. ST1, p.381-403, 1966. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0001387>

STAFFORD-SMITH, B. Lateral stiffness of infilled frames. **ASCE Journal of Structural Division**, v. 88, n. ST6, p.183-199, 1962. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000849>

STAFFORD-SMITH, B. Methods of predicting the lateral stiffness and strength of multi storey infilled frames. **Building Science**, v.2, p.247-257, 1967a. [https://doi.org/10.1016/0007-3628\(67\)90027-8](https://doi.org/10.1016/0007-3628(67)90027-8)

STAFFORD-SMITH, B. The composite behaviour of infilled frames. **Tall Buildings**, Pergamon Press, Londres, p.481-493, 1967b. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-011692-1.50027-4>

STAFFORD-SMITH, B.; CARTER, C. A method of analysis for infilled frames. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, v.44, p.31-48, 1969. <https://doi.org/10.1680/iicep.1969.7290>

THOMAS, F. G. The strength of brickwork. **The Structural Engineer, Part 2**, v.36, p. 35-41, 1953.

TMS. THE MASONRY SOCIETY. **TMS 402/602**: Building Code Requirements and Specifications for Masonry Structures. Masonry Standards Joint Committee, Detroit, 2016.

WOOD, R. H. The stability of tall buildings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, v.11, p.60-101, 1958. <https://doi.org/10.1680/iicep.1958.2424>

YEKRANGNIA, M.; MOHAMMADI, M. A new strut model for solid masonry infills in steel frames. **Engineering Structures**, v.135, p.222-235, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.10.048>

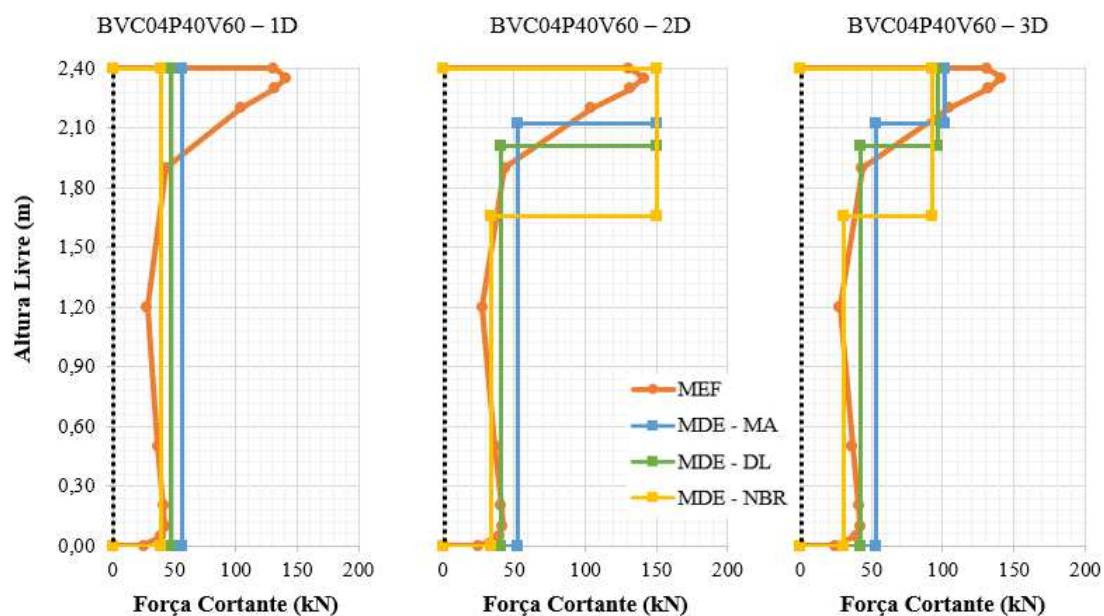
APÊNDICE A – DIAGRAMAS DE FORÇA CORTANTE E MOMENTO FLETOR NOS ELEMENTOS DO PÓRTICO DOS MODELOS PRELIMINARES

Nas Figuras A-1 a A-24, a seguir, estão dispostos todos os diagramas de força cortante e momento fletor no pilar e na viga obtidos para os modelos preliminares (seção 5.1) deste trabalho. Destaca-se que, com o intuito de simplificar a exibição dos resultados, foram adotadas as seguintes abreviaturas para cada modelo:

- Expressão de Mainstone (1974) – MA;
- Expressão de Durrani e Luo (1994) – DL;
- Procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) – NBR;
- MDE clássico (uma diagonal) – 1D;
- MDE com duas diagonais – 2D;
- MDE com três diagonais – 3D.

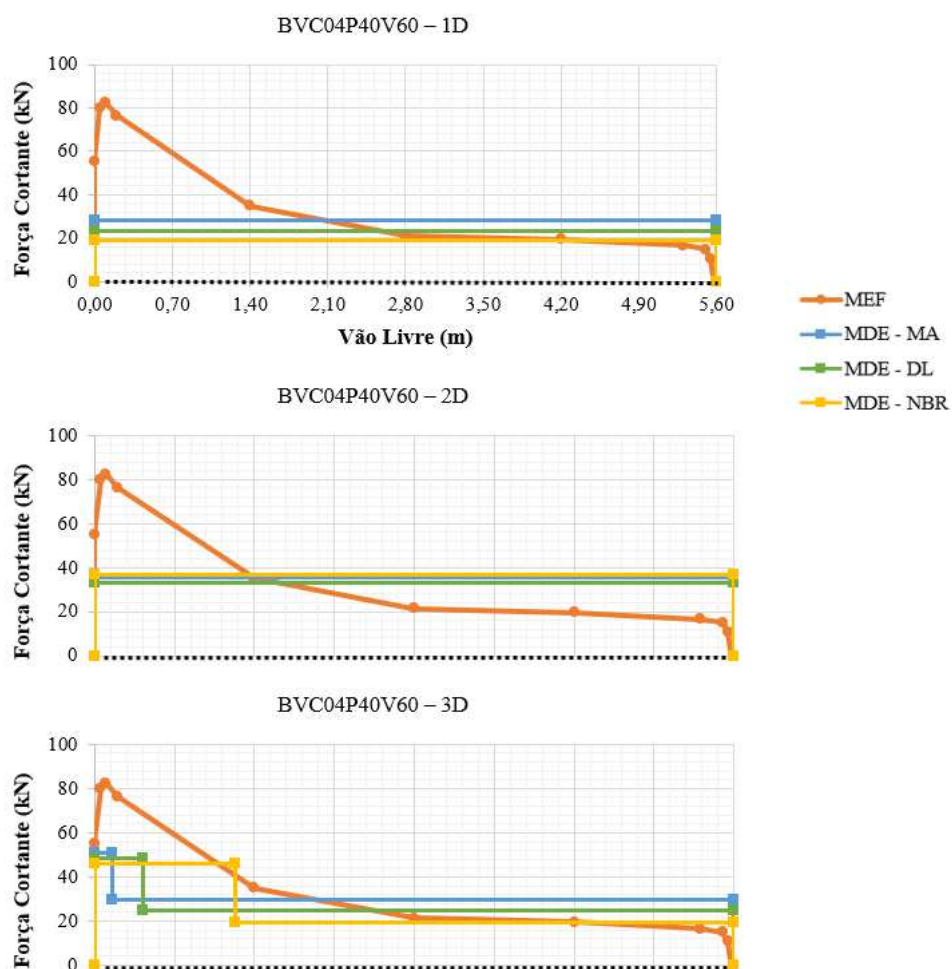
Destaca-se ainda que, nas Figuras A-1 a A-12 estão apresentados os diagramas de força cortante no pilar e na viga; enquanto nas Figuras A-13 a A-24, os diagramas de momento fletor nesses mesmos elementos.

Figura A-1 – Diagramas de força cortante no pilar para o modelo BVC04P40V60



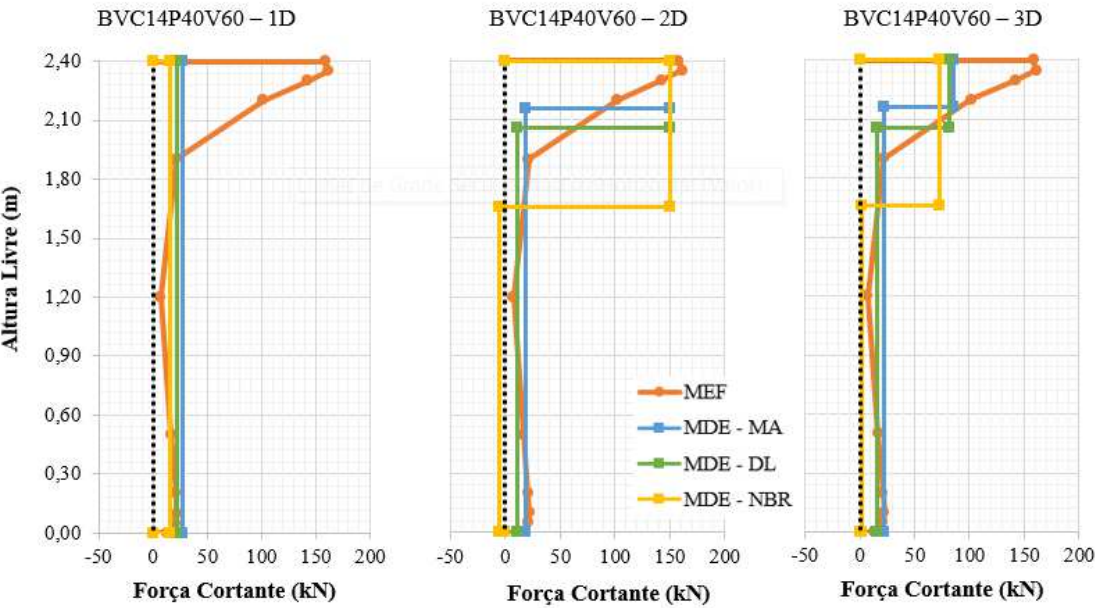
Fonte: Autor (2022).

Figura A-2 – Diagramas de força cortante na viga para o modelo BVC04P40V60



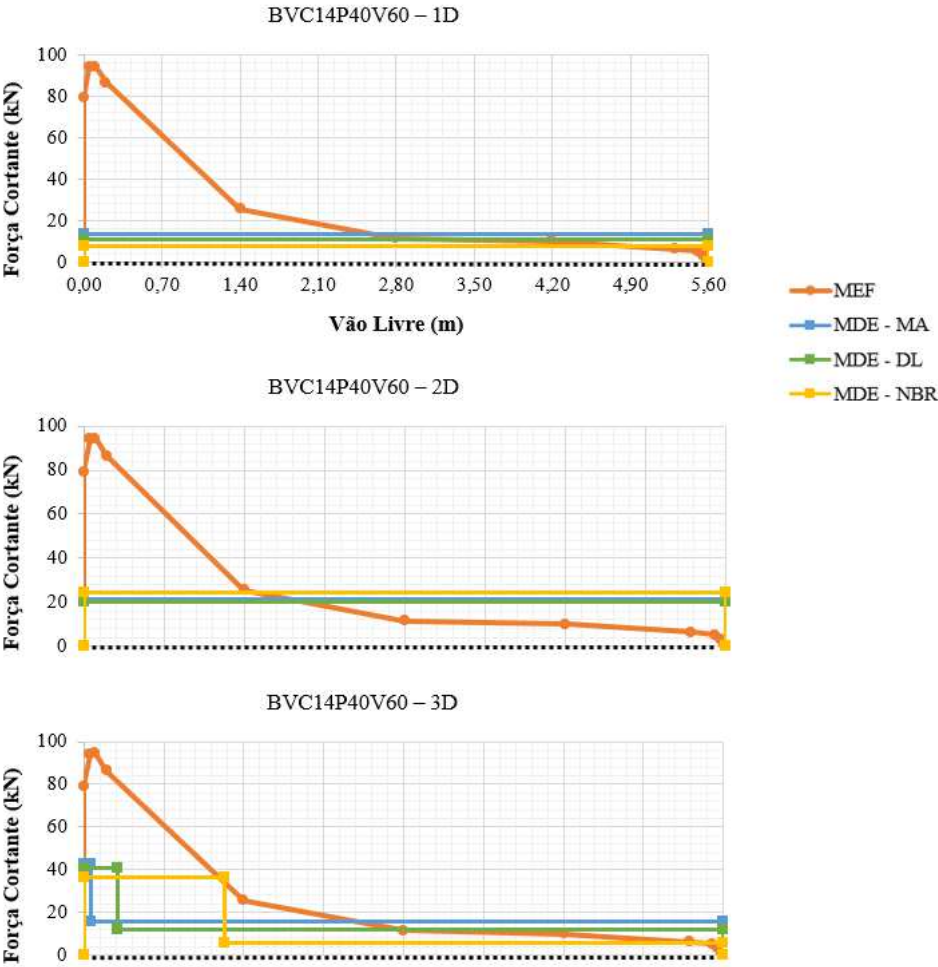
Fonte: Autor (2022).

Figura A-3 – Diagramas de força cortante no pilar para o modelo BVC14P40V60



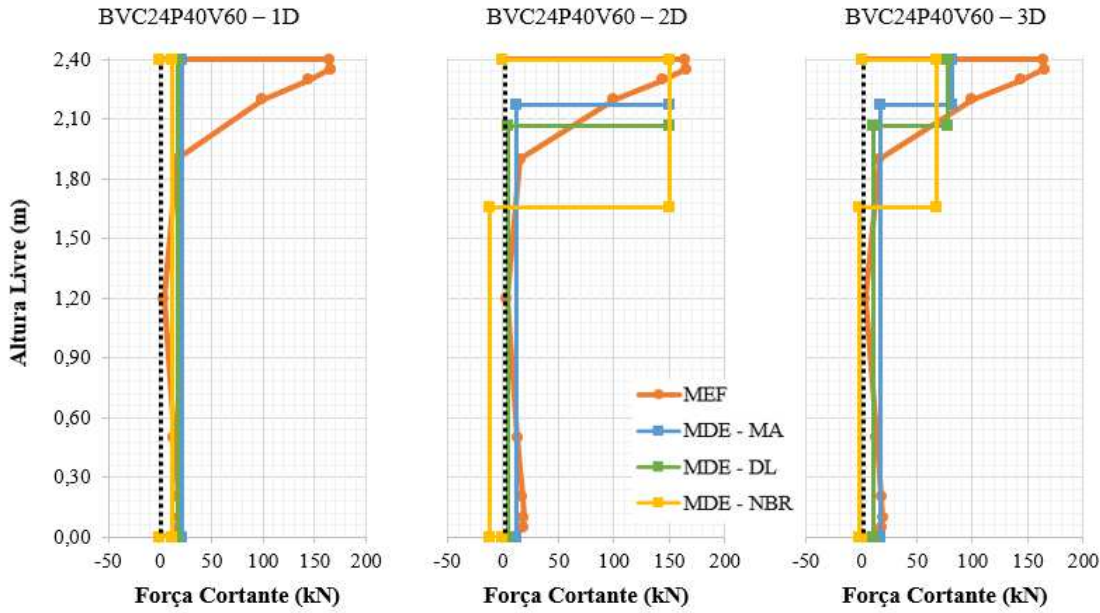
Fonte: Autor (2022).

Figura A-4 – Diagramas de força cortante na viga para o modelo BVC14P40V60



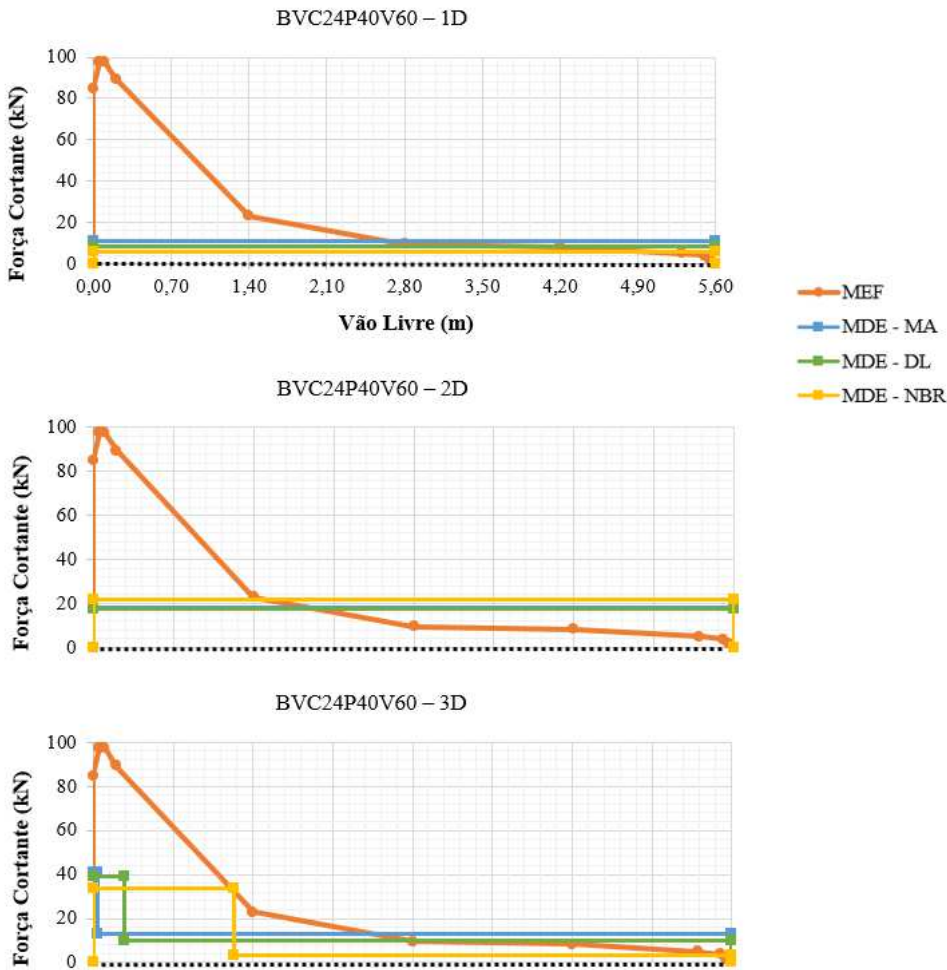
Fonte: Autor (2022).

Figura A-5 – Diagramas de força cortante no pilar para o modelo BVC24P40V60



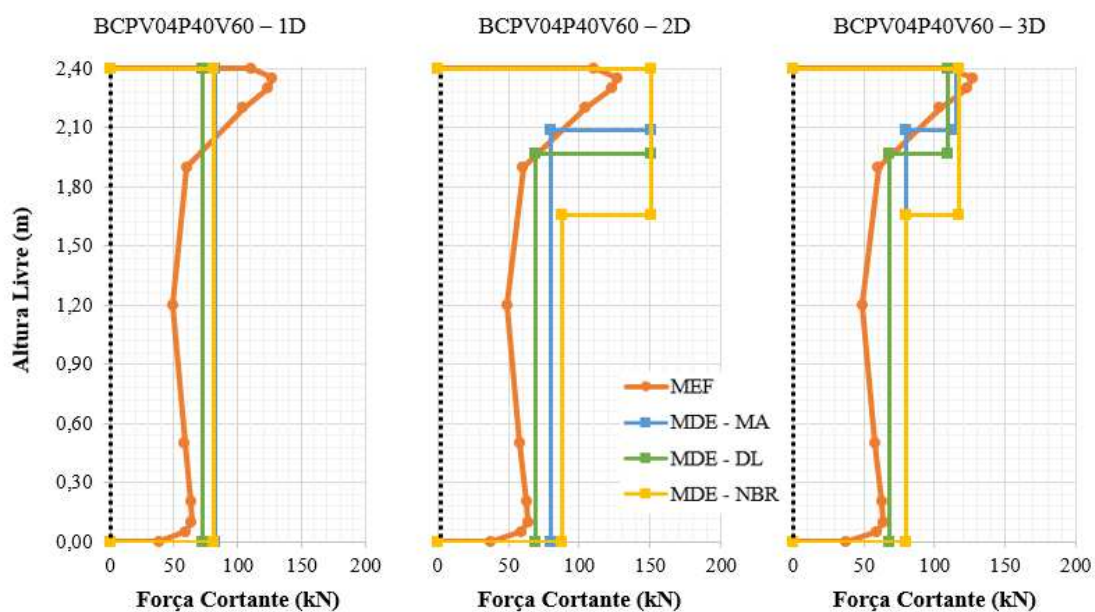
Fonte: Autor (2022).

Figura A-6 – Diagramas de força cortante na viga para o modelo BVC24P40V60



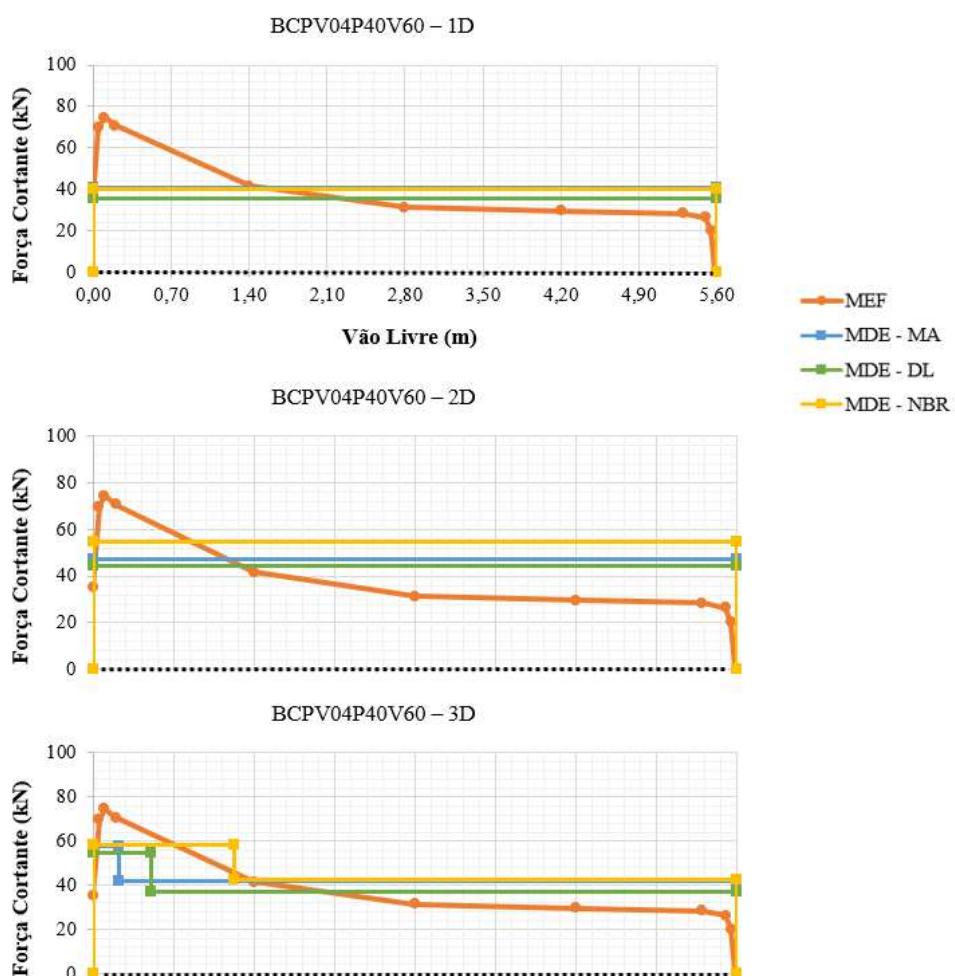
Fonte: Autor (2022).

Figura A-7 – Diagramas de força cortante no pilar para o modelo BCPV04P40V60



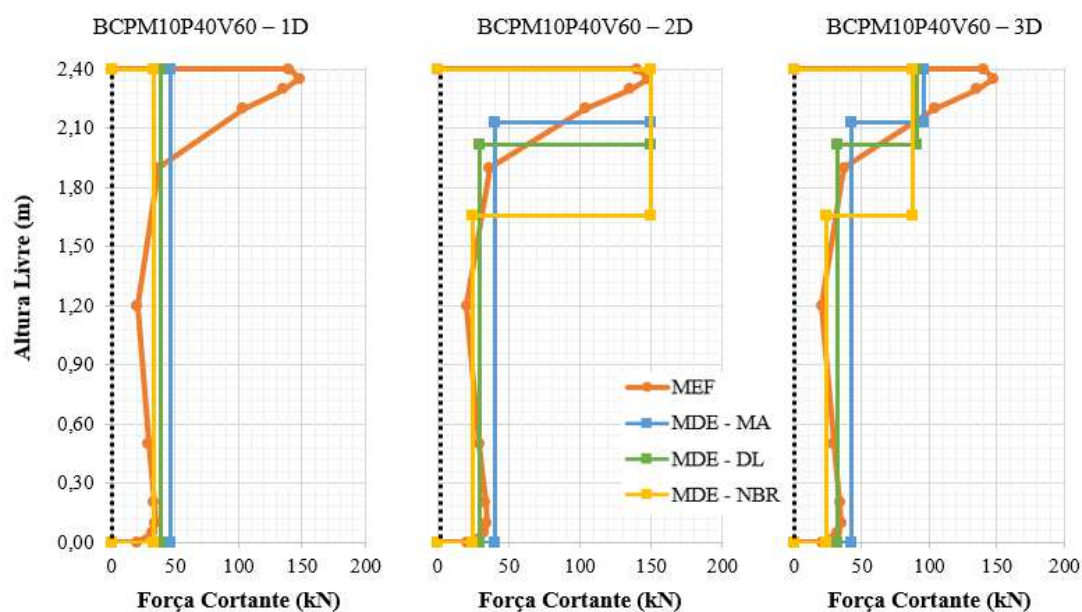
Fonte: Autor (2022).

Figura A-8 – Diagramas de força cortante na viga para o modelo BCPV04P40V60



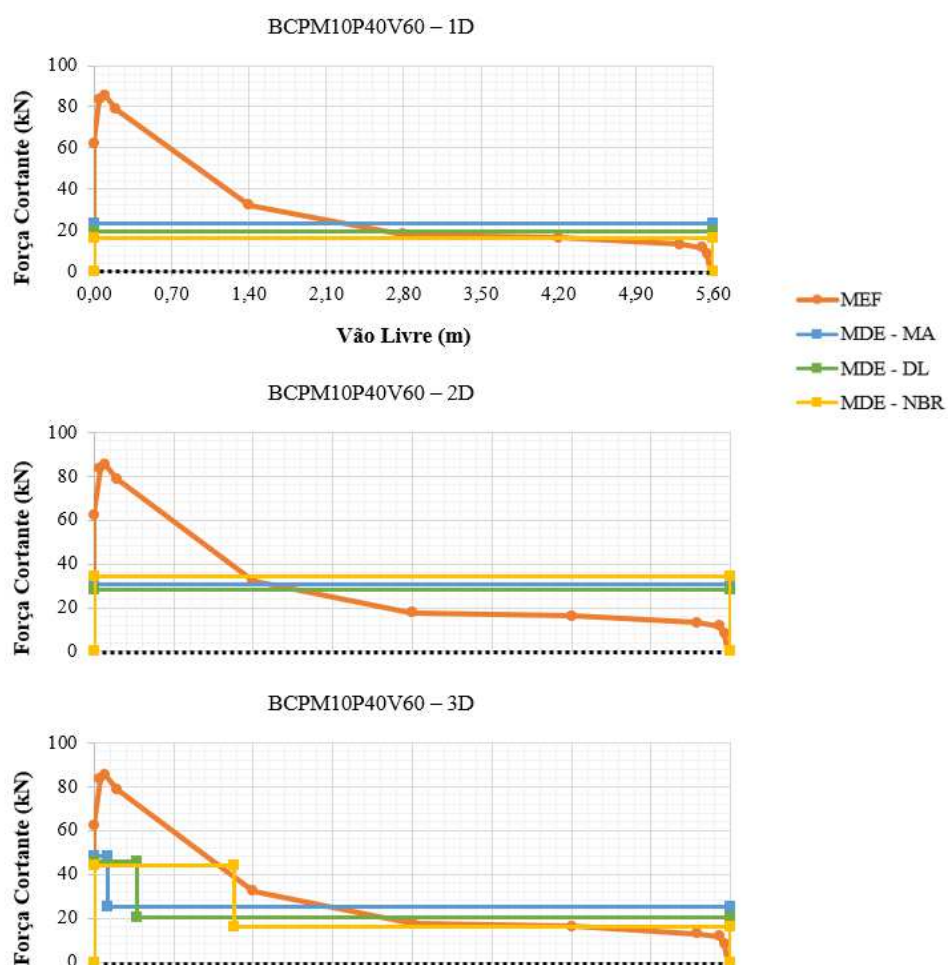
Fonte: Autor (2022).

Figura A-9 – Diagramas de força cortante no pilar para o modelo BCPM10P40V60



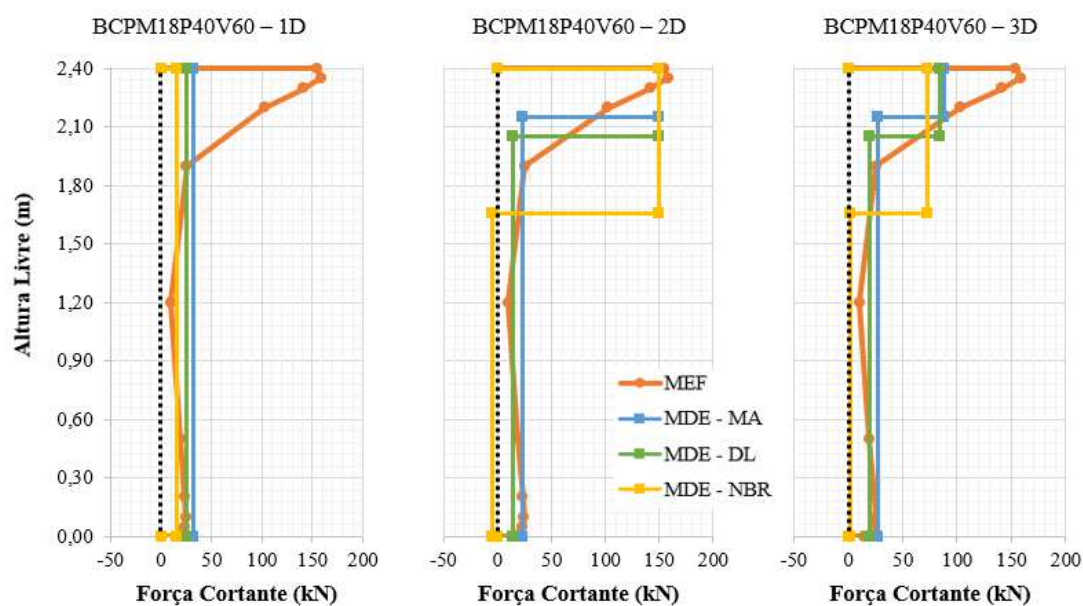
Fonte: Autor (2022).

Figura A-10 – Diagramas de força cortante na viga para o modelo BCPM10P40V60



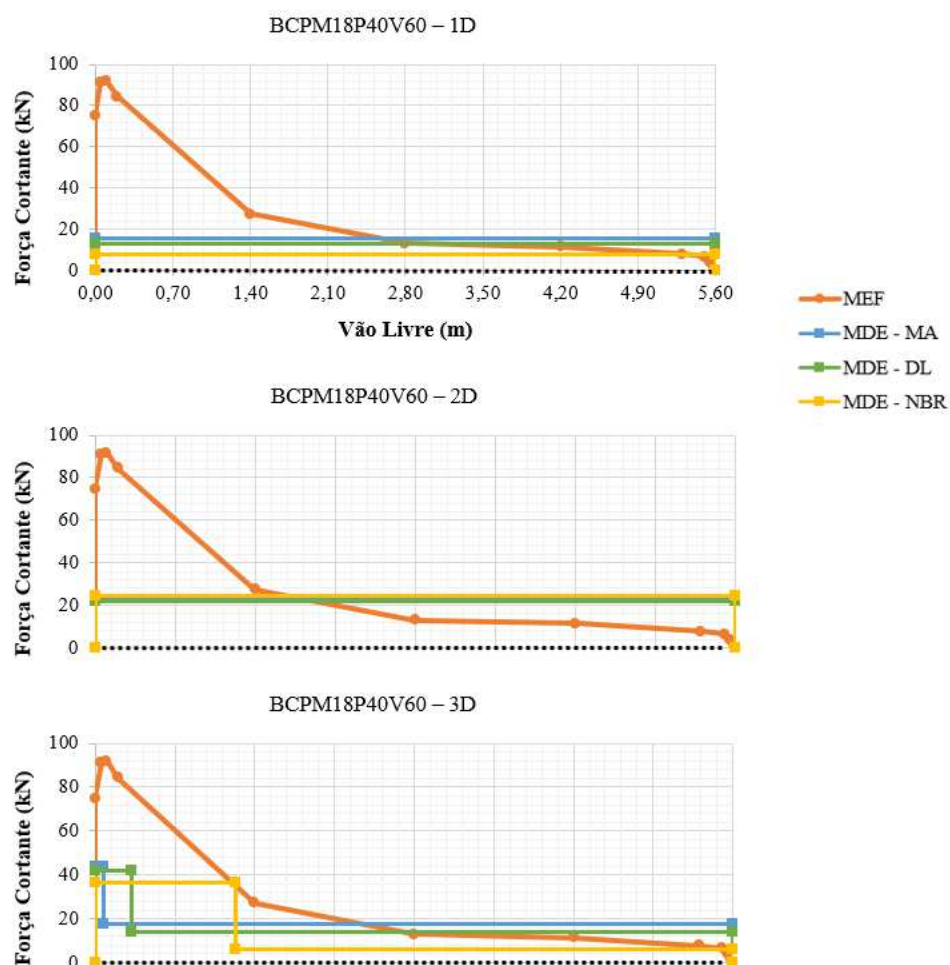
Fonte: Autor (2022).

Figura A-11 – Diagramas de força cortante no pilar para o modelo BCPM18P40V60



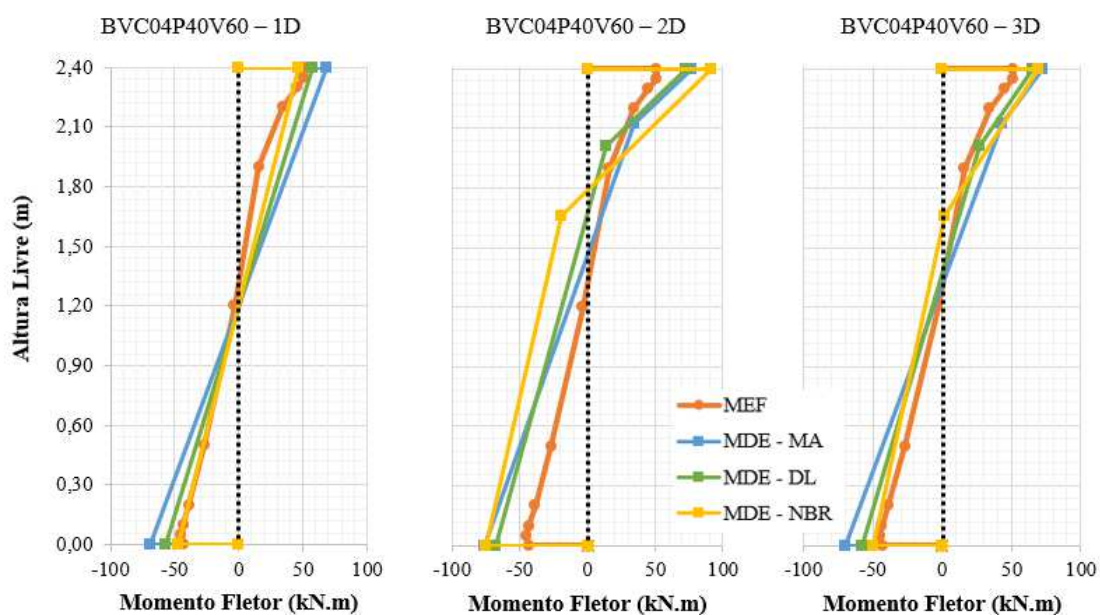
Fonte: Autor (2022).

Figura A-12 – Diagramas de força cortante na viga para o modelo BCPM18P40V60



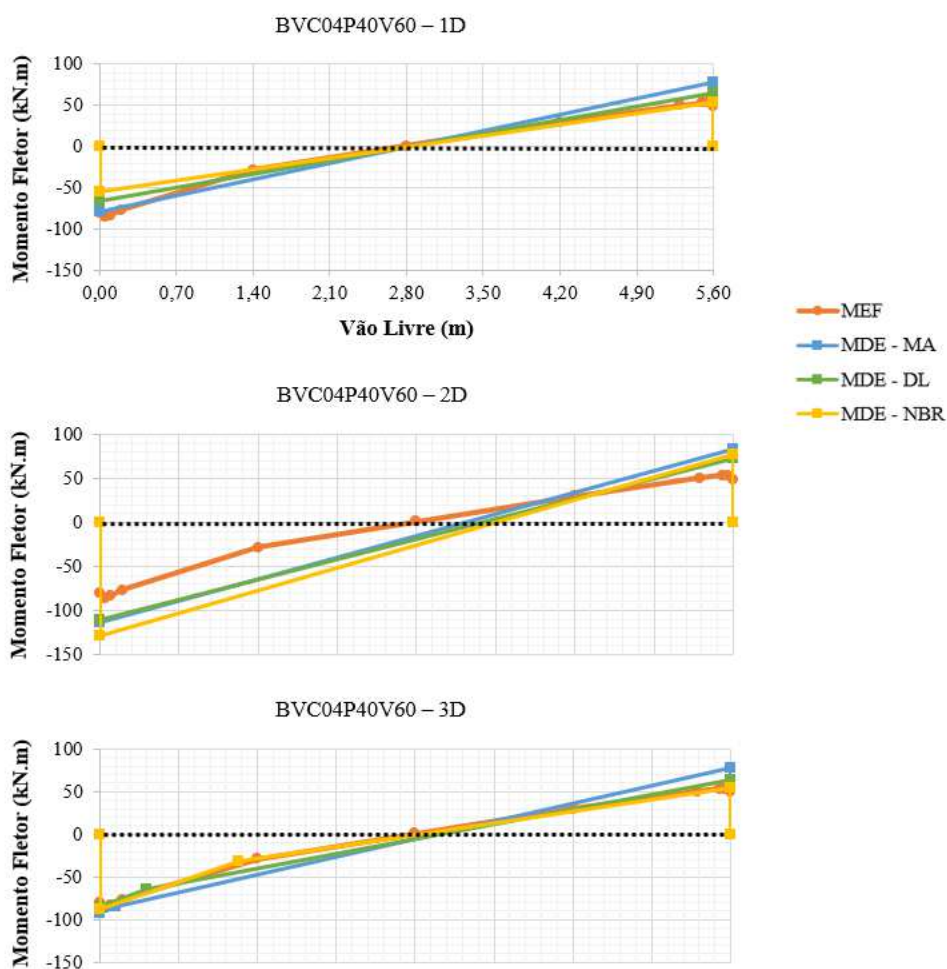
Fonte: Autor (2022).

Figura A-13 – Diagramas de momento fletor no pilar para o modelo BVC04P40V60



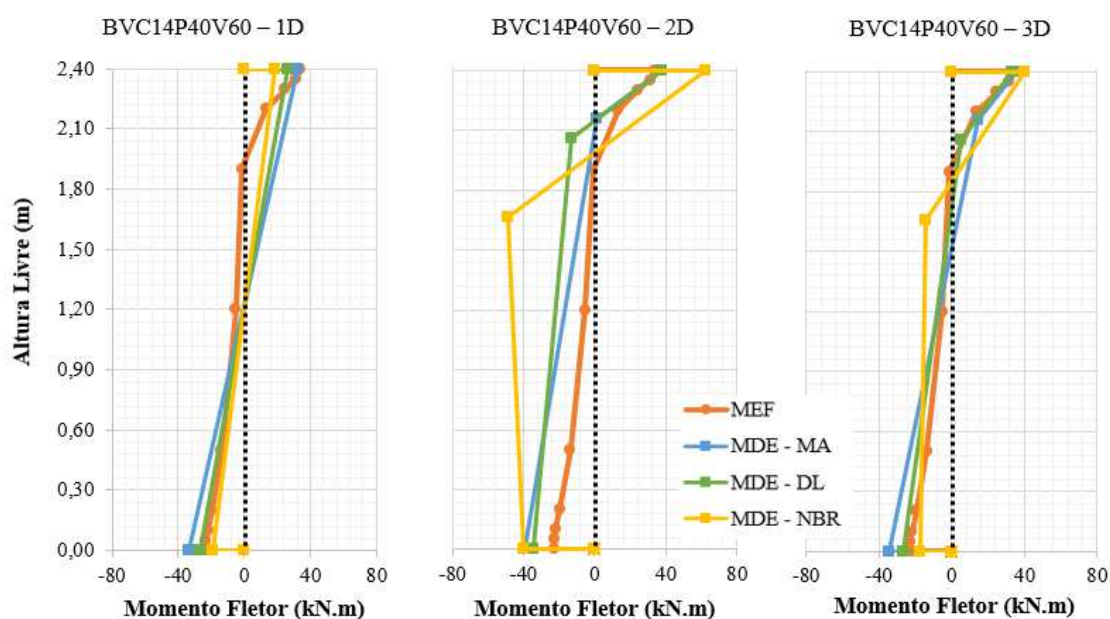
Fonte: Autor (2022).

Figura A-14 – Diagramas de momento fletor na viga para o modelo BVC04P40V60



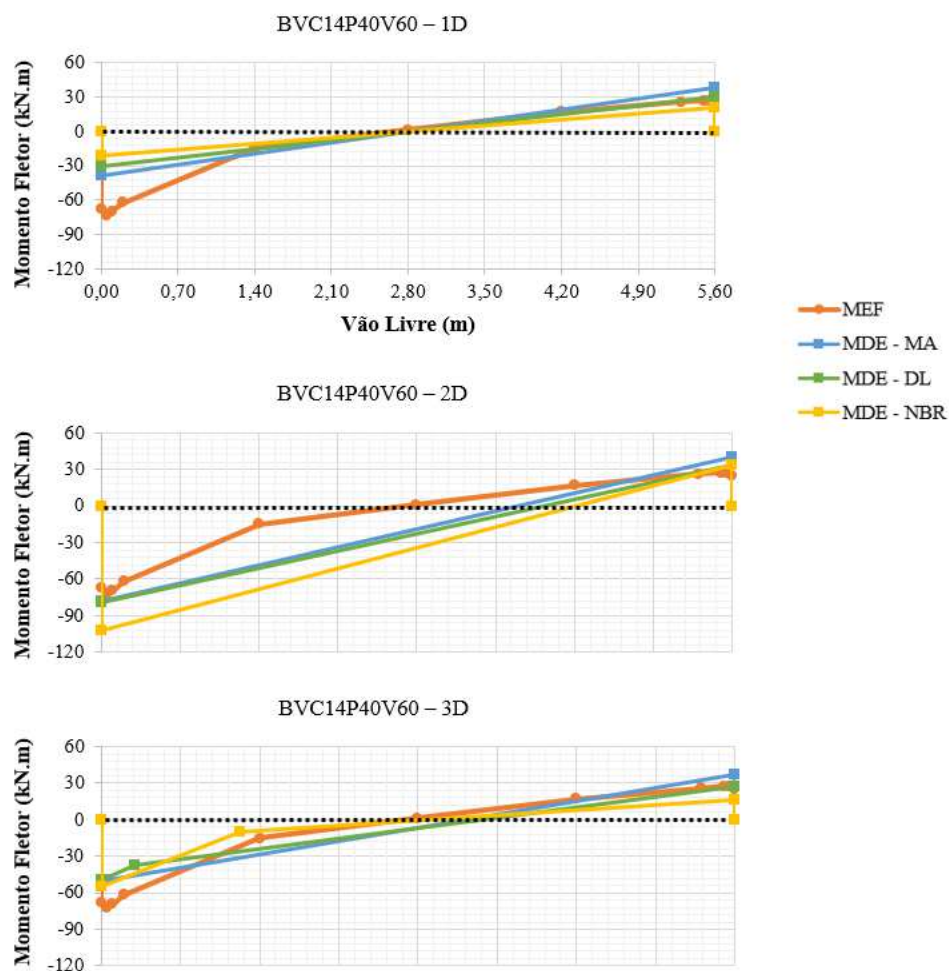
Fonte: Autor (2022).

Figura A-15 – Diagramas de momento fletor no pilar para o modelo BVC14P40V60



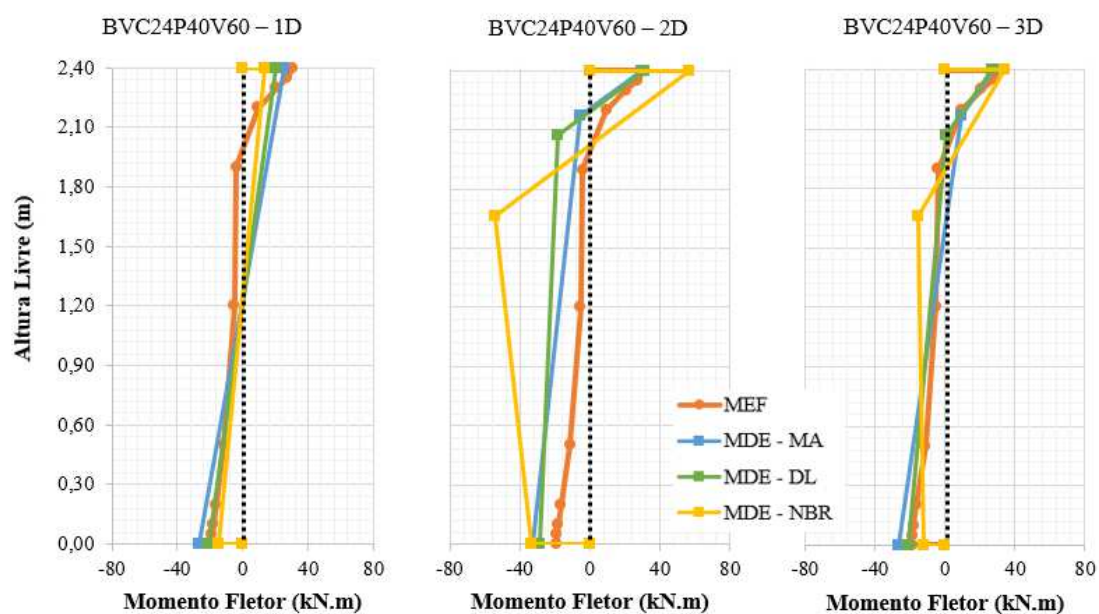
Fonte: Autor (2022).

Figura A-16 – Diagramas de momento fletor na viga para o modelo BVC14P40V60



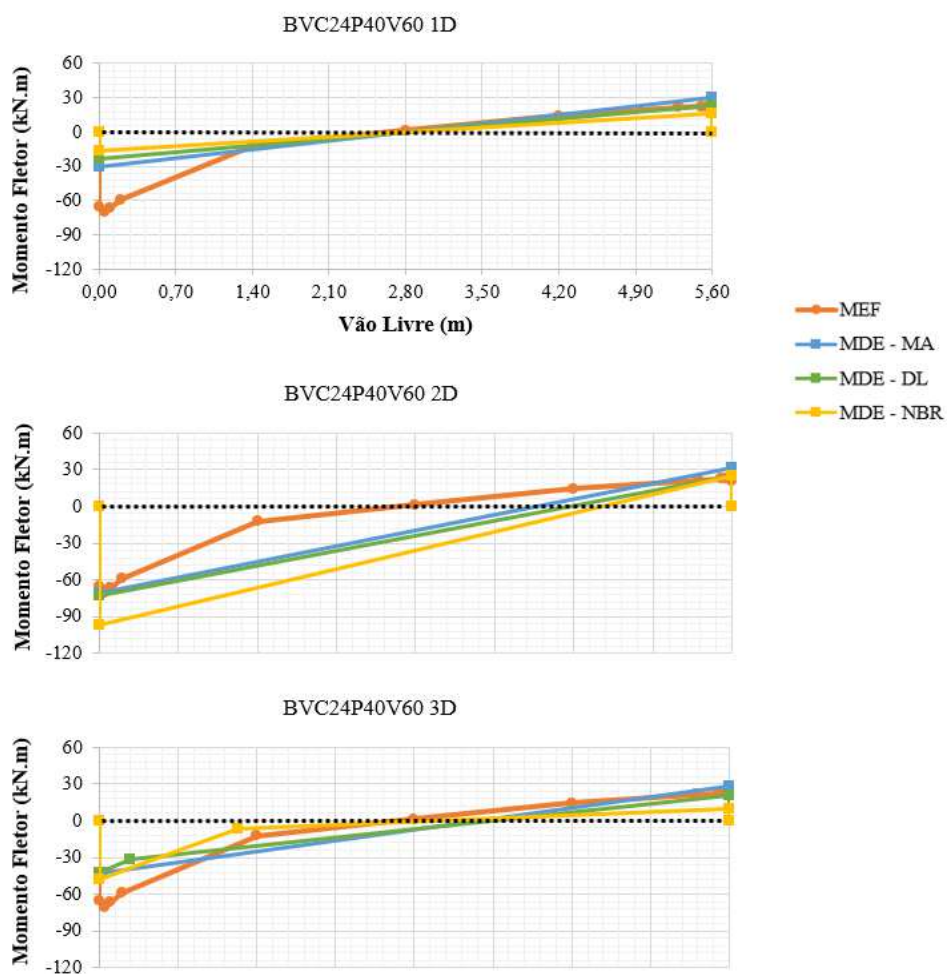
Fonte: Autor (2022).

Figura A-17 – Diagramas de momento fletor no pilar para o modelo BVC24P40V60



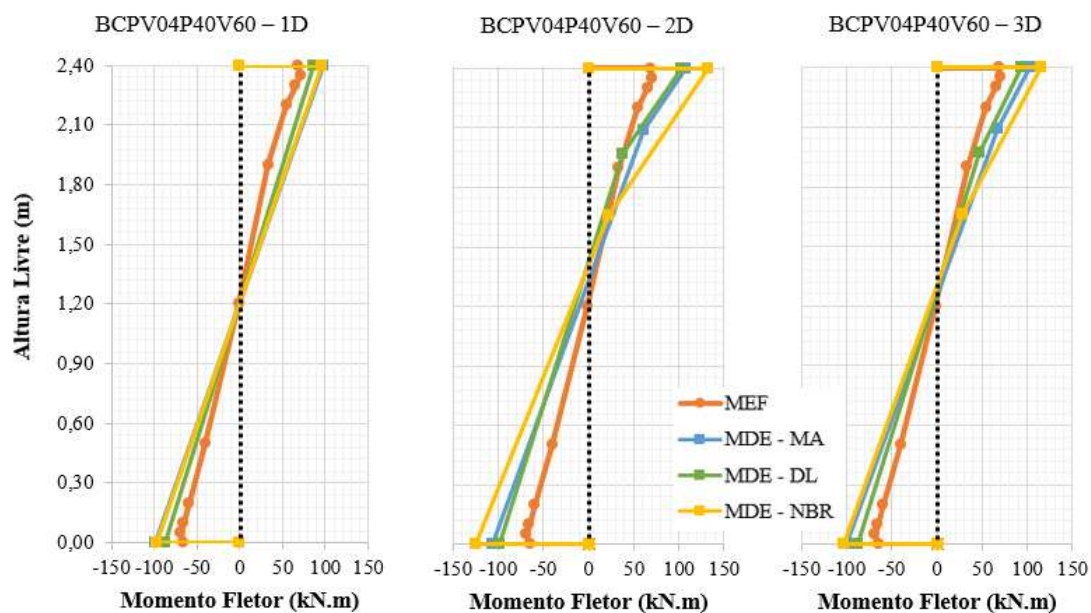
Fonte: Autor (2022).

Figura A-18 – Diagramas de momento fletor na viga para o modelo BVC24P40V60



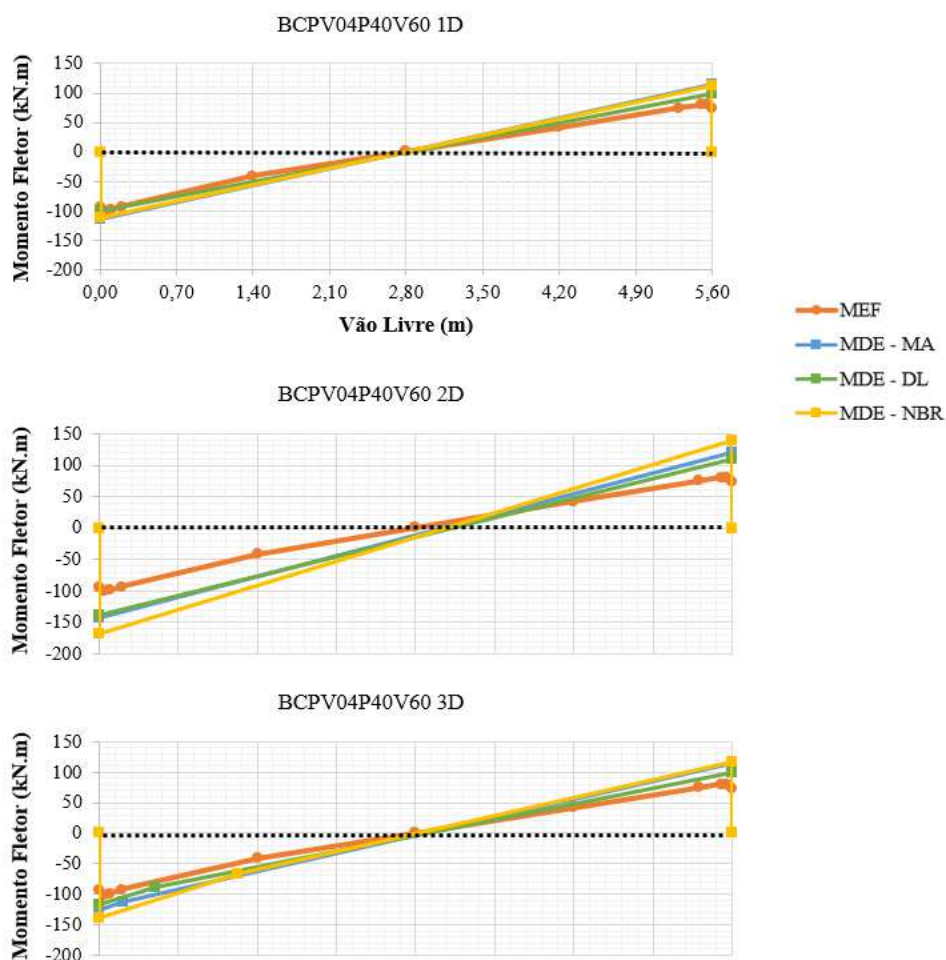
Fonte: Autor (2022).

Figura A-19 – Diagramas de momento fletor no pilar para o modelo BCPV04P40V60



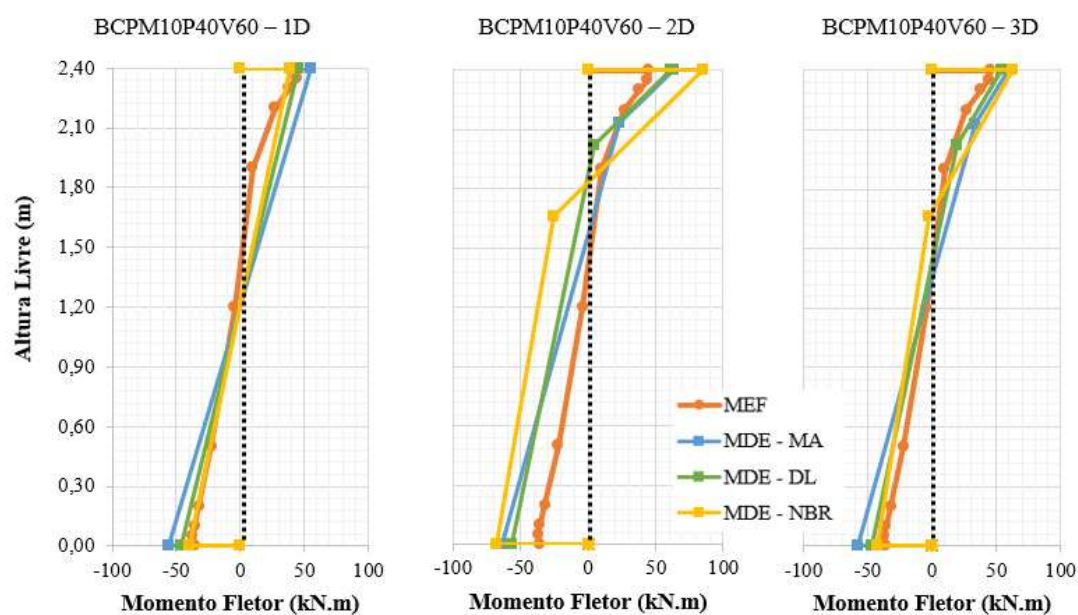
Fonte: Autor (2022).

Figura A-20 – Diagramas de momento fletor na viga para o modelo BCPV04P40V60



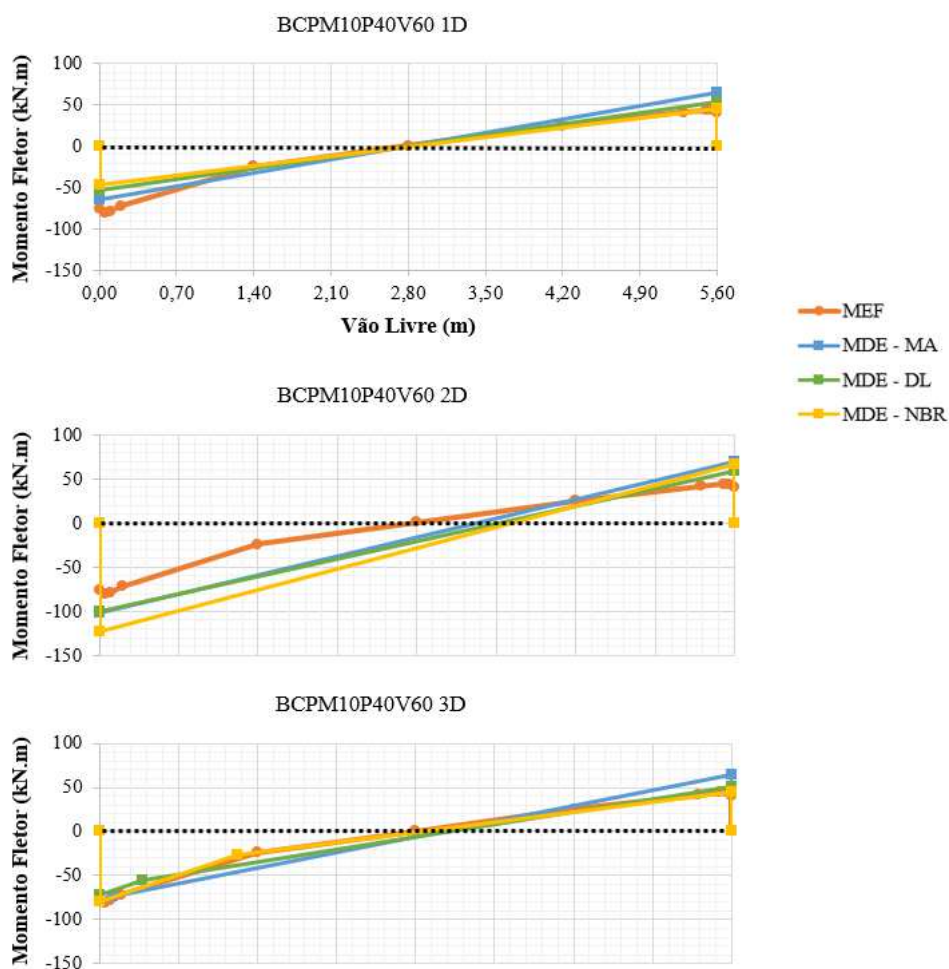
Fonte: Autor (2022).

Figura A-21 – Diagramas de momento fletor no pilar para o modelo BCPM10P40V60



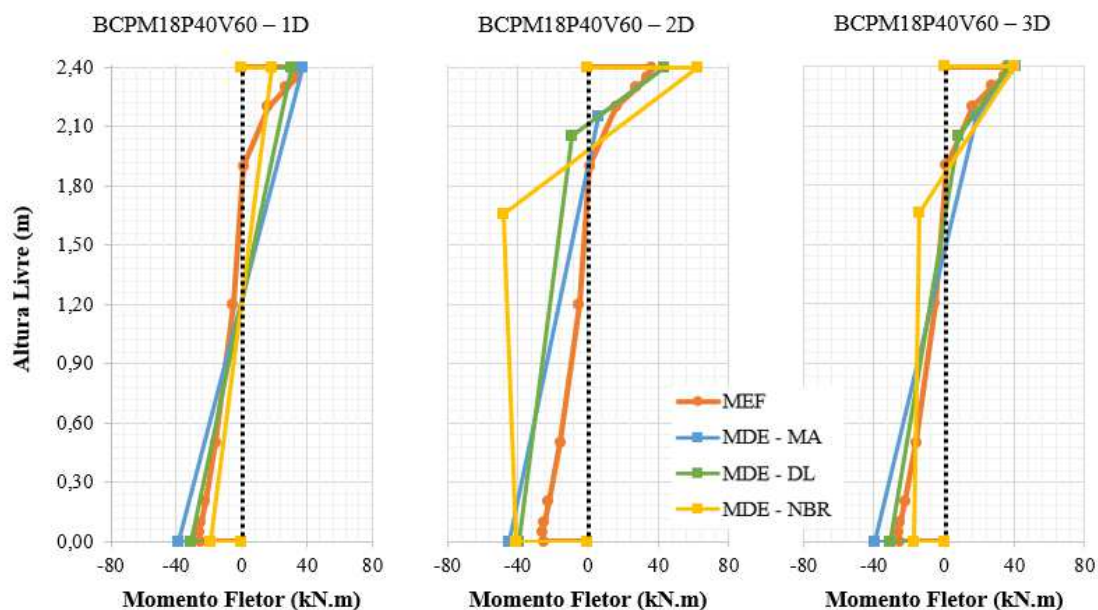
Fonte: Autor (2022).

Figura A-22 – Diagramas de momento fletor na viga para o modelo BCPM10P40V60



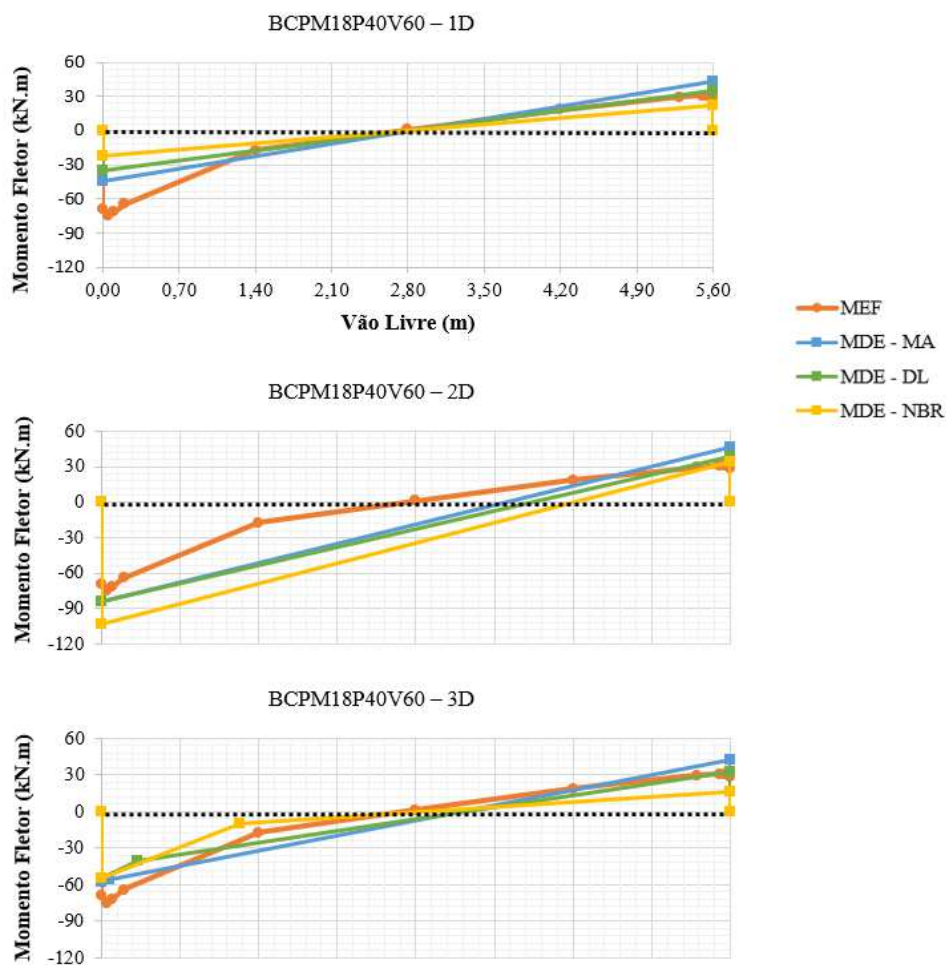
Fonte: Autor (2022).

Figura A-23 – Diagramas de momento fletor no pilar para o modelo BCPM18P40V60



Fonte: Autor (2022).

Figura A-24 – Diagramas de momento fletor na viga para o modelo BCPM18P40V60



Fonte: Autor (2022).

APÊNDICE B – RESULTADOS DOS MODELOS DEFINITIVOS

Nas Tabelas B-1 a B-7, a seguir, estão dispostos todos os resultados obtidos para os modelos definitivos (seção 5.2) deste trabalho. Destaca-se que, com o intuito de simplificar a exibição dos resultados, foram adotadas as seguintes abreviaturas para cada modelo:

- Expressão de Mainstone (1974) – MA;
- Expressão de Durrani e Luo (1994) – DL;
- Procedimento da ABNT NBR 16868-1 (2020) – NBR;
- MDE clássico (uma diagonal) – 1D;
- MDE com duas diagonais – 2D;
- MDE com três diagonais – 3D.

Tabela B-1 – Deslocamento horizontal

Deslocamento Horizontal (mm)										
Modelo	MEF	MA 1D	DL 1D	NBR 1D	MA 2D	DL 2D	NBR 2D	MA 3D	DL 3D	NBR 3D
BVC04P60V60	8,57	9,38	8,50	7,72	10,48	9,93	10,68	9,56	8,70	8,61
BVC14P60V60	4,68	5,39	4,64	3,72	6,42	5,90	6,59	5,55	4,81	4,44
BVC24P60V60	4,00	4,41	3,76	2,89	5,37	4,92	5,56	4,57	3,91	3,52
BCPV04P60V60	10,77	11,92	11,18	12,29	12,81	12,41	14,10	12,06	11,36	12,91
BCPM10P60V60	6,73	8,15	7,27	6,88	9,26	8,45	9,92	8,32	7,47	7,77
BCPM18P60V60	5,18	6,04	5,24	3,75	7,12	6,57	6,63	6,22	5,42	4,48
BVC04P80V60	9,17	9,98	9,06	8,55	11,04	10,49	11,18	10,05	9,17	9,31
BVC14P80V60	5,27	5,94	5,11	4,32	6,97	6,38	6,92	6,02	5,20	4,99
BVC24P80V60	4,49	4,91	4,16	3,40	5,85	5,30	5,78	4,98	4,24	3,99
BCPV04P80V60	11,32	12,40	11,66	12,89	13,25	12,85	14,40	12,47	11,76	13,37
BCPM10P80V60	7,44	8,77	7,82	7,70	9,86	9,27	10,43	8,84	7,93	8,47
BCPM18P80V60	5,80	6,62	5,74	4,37	7,69	7,08	6,97	6,70	5,84	5,03
BVC04P100V60	9,43	10,37	9,35	9,10	11,35	10,74	11,44	10,33	9,36	9,73
BVC14P100V60	5,54	6,33	5,36	4,76	7,29	6,60	7,13	6,28	5,36	5,35
BVC24P100V60	4,72	5,26	4,39	3,73	6,14	5,48	5,93	5,23	4,39	4,30
BCPV04P100V60	11,54	12,71	11,90	13,25	13,47	13,06	14,54	12,68	11,93	13,63
BCPM10P100V60	7,79	9,18	8,12	8,25	10,21	9,53	10,70	9,14	8,12	8,90
BCPM18P100V60	6,08	7,03	6,01	4,80	8,02	7,32	7,18	6,98	6,01	5,40
BVC04P120V60	9,60	10,71	9,57	9,54	11,59	10,91	11,60	10,56	9,48	10,04
BVC14P120V60	5,73	6,68	5,56	5,13	7,54	6,74	7,27	6,51	5,46	5,63
BVC24P120V60	4,90	5,58	4,56	4,08	6,37	5,60	6,04	5,43	4,48	4,55
BCPV04P120V60	11,68	12,96	12,08	13,53	13,63	13,18	14,63	12,85	12,03	13,81
BCPM10P120V60	8,01	9,55	8,35	8,70	10,46	9,71	10,87	9,37	8,25	9,22
BCPM18P120V60	6,29	7,39	6,22	5,18	8,28	7,47	7,33	7,21	6,12	5,68

BVC04P60V80	11,18	11,69	11,12	10,15	12,60	12,29	12,79	11,98	11,46	11,02
BVC14P60V80	7,43	7,80	7,14	5,71	8,97	8,56	9,12	8,18	7,54	6,65
BVC24P60V80	6,59	6,64	6,02	4,60	7,83	7,40	8,00	7,03	6,39	5,48
BCPV04P60V80	12,79	13,65	13,25	13,88	14,30	14,10	15,13	13,86	13,50	14,33
BCPM10P60V80	9,57	10,61	9,98	9,32	11,64	11,26	12,19	10,94	10,34	10,24
BCPM18P60V80	7,98	8,51	7,85	5,75	9,68	9,24	9,16	8,89	8,23	6,69
BVC04P80V80	12,02	12,42	11,91	11,19	13,29	13,01	13,41	12,64	12,15	11,90
BVC14P80V80	8,50	8,72	8,06	6,77	9,90	9,46	9,89	9,03	8,37	7,63
BVC24P80V80	7,58	7,55	6,90	5,56	8,75	8,31	8,70	7,86	7,21	6,38
BCPV04P80V80	13,49	14,15	13,80	14,43	14,73	14,56	15,40	14,29	13,97	14,77
BCPM10P80V80	10,66	11,43	10,85	10,42	12,43	12,08	12,87	11,69	11,12	11,18
BCPM18P80V80	9,08	9,43	8,78	6,82	10,58	10,16	9,93	9,73	9,08	7,68
BVC04P100V80	12,36	12,82	12,27	11,76	13,62	13,31	13,67	12,96	12,43	12,34
BVC14P100V80	8,97	9,27	8,52	7,43	10,39	9,89	10,24	9,47	8,73	8,19
BVC24P100V80	8,04	8,10	7,35	6,17	9,25	8,73	9,02	8,31	7,57	6,91
BCPV04P100V80	13,74	14,40	14,04	14,71	14,92	14,75	15,51	14,49	14,15	14,97
BCPM10P100V80	11,12	11,89	11,26	11,04	12,80	12,44	13,17	12,05	11,44	11,67
BCPM18P100V80	9,56	9,97	9,24	7,48	11,06	10,58	10,28	10,17	9,44	8,24
BVC04P120V80	12,53	13,10	12,48	12,15	13,80	13,47	13,80	13,15	12,56	12,61
BVC14P120V80	9,23	9,67	8,80	7,91	10,68	10,13	10,41	9,75	8,90	8,55
BVC24P120V80	8,30	8,51	7,63	6,63	9,55	8,94	9,18	8,60	7,72	7,27
BCPV04P120V80	13,86	14,58	14,18	14,89	15,04	14,85	15,57	14,61	14,24	15,09
BCPM10P120V80	11,37	12,22	11,50	11,46	13,04	12,63	13,31	12,28	11,59	11,97
BCPM18P120V80	9,80	10,36	9,51	7,97	11,34	10,81	10,48	10,44	9,61	8,61

Fonte: Autor (2022).

Tabela B-2 – Força cortante máxima no pilar

Força Cortante Máxima no Pilar - região de contato (kN)										
Modelo	MEF	MA 1D	DL 1D	NBR 1D	MA 2D	DL 2D	NBR 2D	MA 3D	DL 3D	NBR 3D
BVC04P60V60	419,7	219,7	199,0	180,6	385,1	384,9	385,3	300,8	289,6	287,3
BVC14P60V60	425,2	125,8	108,3	86,5	384,4	384,2	385,3	251,0	241,1	231,5
BVC24P60V60	447,6	102,8	87,4	67,1	384,3	384,2	385,6	238,3	229,3	217,9
BCPV04P60V60	377,1	279,5	262,0	288,2	385,6	385,4	386,0	332,0	322,7	342,0
BCPM10P60V60	384,4	190,9	169,9	160,8	384,9	384,6	385,2	285,7	274,3	276,4
BCPM18P60V60	414,3	141,1	122,4	87,3	384,5	384,3	385,3	259,1	248,8	232,1
BVC04P80V60	535,9	289,0	262,2	247,5	476,0	475,7	475,5	381,9	367,7	369,3
BVC14P80V60	555,5	171,7	147,3	124,6	475,1	474,8	474,6	321,4	307,9	301,1
BVC24P80V60	583,2	141,6	119,8	97,6	474,9	474,7	474,8	305,6	293,5	284,1
BCPV04P80V60	472,6	359,6	337,9	373,8	476,7	476,4	476,9	417,8	406,6	431,1
BCPM10P80V60	490,0	253,8	226,3	222,7	475,7	475,4	475,3	363,9	349,1	356,3
BCPM18P80V60	540,2	191,4	165,8	125,8	475,2	474,9	474,6	331,7	317,6	301,8
BVC04P100V60	619,1	346,3	312,0	303,6	548,6	548,1	548,1	448,0	430,1	436,2

BVC14P100V60	657,7	210,9	178,3	158,1	547,4	547,0	546,8	380,4	362,6	359,1
BVC24P100V60	692,4	175,0	145,7	124,8	547,2	547,0	546,9	362,3	346,2	339,5
BCPV04P100V60	547,5	424,6	397,6	442,9	549,4	549,0	549,6	487,1	473,2	502,7
BCPM10P100V60	579,5	306,4	270,8	275,1	548,2	547,7	547,8	427,9	409,3	421,8
BCPM18P100V60	638,4	234,2	200,2	159,6	547,6	547,2	546,8	391,9	373,7	360,0
BVC04P120V60	699,0	402,9	359,8	358,5	617,8	617,1	617,2	511,9	489,8	500,7
BVC14P120V60	754,0	250,7	208,4	192,2	616,4	615,8	615,5	438,4	415,8	416,3
BVC24P120V60	796,4	209,3	170,8	152,7	616,1	615,7	615,5	418,2	397,5	394,2
BCPV04P120V60	620,0	487,7	454,5	509,1	618,6	618,1	618,9	553,8	536,8	570,9
BCPM10P120V60	664,3	358,8	313,6	326,8	617,3	616,6	616,8	490,4	467,1	485,3
BCPM18P120V60	732,4	277,5	233,5	194,0	616,6	615,9	615,6	451,2	428,0	417,2
BVC04P60V80	724,4	490,7	466,7	425,5	690,1	689,7	689,3	587,9	574,9	566,5
BVC14P60V80	769,1	326,2	298,5	237,9	687,9	687,4	686,5	497,9	481,8	461,7
BVC24P60V80	809,0	277,5	251,1	191,1	687,3	686,9	686,0	470,0	454,9	431,9
BCPV04P60V80	653,0	573,7	556,9	583,2	691,3	691,0	691,5	631,6	622,7	643,6
BCPM10P60V80	678,6	445,0	418,6	390,6	689,5	689,1	688,8	563,3	548,9	548,3
BCPM18P60V80	746,7	356,4	328,4	239,8	688,3	687,8	686,5	514,7	499,0	462,8
BVC04P80V80	962,5	694,9	665,9	625,5	919,3	918,7	918,3	805,2	789,8	785,0
BVC14P80V80	1053,9	486,8	449,4	376,7	916,1	915,3	914,0	693,8	673,2	653,9
BVC24P80V80	1108,2	420,7	384,0	308,4	915,1	914,4	913,0	657,4	636,9	614,3
BCPV04P80V80	882,1	792,0	772,6	807,9	920,8	920,5	921,2	855,8	845,7	871,6
BCPM10P80V80	932,7	639,2	606,4	582,0	918,4	917,8	917,5	775,7	758,2	763,3
BCPM18P80V80	1022,9	526,7	489,8	379,5	916,7	915,9	914,0	715,4	695,3	655,5
BVC04P100V80	1144,6	853,7	816,9	783,0	1094,2	1093,4	1093,1	972,7	953,4	954,0
BVC14P100V80	1268,3	616,0	565,9	492,8	1090,3	1089,2	1087,7	847,9	821,2	806,8
BVC24P100V80	1336,3	537,5	487,4	408,5	1089,0	1087,9	1086,4	805,8	778,7	760,5
BCPV04P100V80	1054,1	959,8	935,9	980,3	1096,0	1095,5	1096,5	1027,5	1015,1	1045,9
BCPM10P100V80	1123,9	791,6	749,2	734,2	1093,2	1092,2	1092,2	940,4	918,1	930,3
BCPM18P100V80	1230,6	662,8	613,7	496,3	1091,0	1089,9	1087,8	872,7	846,6	808,6
BVC04P120V80	1297,4	990,8	943,8	918,9	1242,9	1241,8	1241,7	1116,4	1092,0	1098,5
BVC14P120V80	1447,6	730,4	664,0	596,5	1238,5	1236,8	1235,5	982,4	947,2	939,9
BVC24P120V80	1528,2	641,9	574,6	498,9	1237,0	1235,4	1233,8	936,3	900,8	888,6
BCPV04P120V80	1199,0	1103,5	1073,5	1127,0	1244,9	1244,2	1245,4	1174,0	1158,6	1194,1
BCPM10P120V80	1284,0	923,9	869,3	866,2	1241,8	1240,5	1240,7	1082,0	1053,7	1073,5
BCPM18P120V80	1402,8	782,7	718,1	600,6	1239,4	1237,7	1235,6	1009,4	975,4	941,9

Fonte: Autor (2022).

Tabela B-3 – Momento fletor máximo na seção de topo do pilar

Momento Fletor Máximo na Seção de Topo do Pilar (kN,m)										
Modelo	MEF	MA 1D	DL 1D	NBR 1D	MA 2D	DL 2D	NBR 2D	MA 3D	DL 3D	NBR 3D
BVC04P60V60	249,2	262,6	237,7	215,7	269,4	254,1	282,4	268,6	250,8	261,4
BVC14P60V60	147,8	149,9	128,9	102,7	136,5	123,1	154,6	151,8	139,6	153,6
BVC24P60V60	130,2	122,3	103,9	79,5	101,8	91,0	122,5	122,4	113,1	129,6
BCPV04P60V60	299,4	334,4	313,4	344,8	345,2	333,7	389,1	340,3	325,0	371,7
BCPM10P60V60	197,5	227,8	202,9	192,0	229,7	206,3	258,7	232,9	215,8	239,7
BCPM18P60V60	159,5	168,3	145,9	103,8	159,5	144,6	155,9	171,2	157,4	154,6
BVC04P80V60	336,0	345,4	313,2	295,6	346,0	325,0	355,6	351,4	329,4	346,1
BVC14P80V60	209,8	204,6	175,4	148,1	175,1	153,5	181,5	207,4	191,1	209,2
BVC24P80V60	183,8	168,5	142,4	115,7	128,1	107,9	134,6	169,5	156,6	177,1
BCPV04P80V60	397,4	430,1	404,0	447,2	438,5	422,9	487,3	435,8	417,3	474,4
BCPM10P80V60	277,0	303,1	270,2	265,9	296,4	274,1	324,9	308,4	286,7	319,6
BCPM18P80V60	225,2	228,3	197,5	149,5	205,6	182,9	183,5	232,2	213,7	210,6
BVC04P100V60	407,5	413,9	372,7	362,6	408,8	380,5	416,2	420,2	392,9	416,6
BVC14P100V60	262,6	251,3	212,3	188,0	209,3	178,3	207,7	257,0	236,4	258,2
BVC24P100V60	230,4	208,3	173,1	148,0	152,8	123,4	149,6	213,2	196,7	219,9
BCPV04P100V60	473,4	507,8	475,4	529,8	512,9	493,8	566,1	513,3	491,1	557,0
BCPM10P100V60	343,4	366,0	323,3	328,4	353,2	321,5	380,3	372,7	345,1	386,6
BCPM18P100V60	280,3	279,3	238,5	189,8	245,6	213,6	210,2	285,3	262,2	259,9
BVC04P120V60	478,2	481,6	429,8	428,3	471,4	434,7	473,9	488,5	455,4	484,9
BVC14P120V60	317,4	299,0	248,2	228,7	245,3	203,2	235,3	308,2	282,7	307,8
BVC24P120V60	281,7	249,2	203,0	181,3	180,2	139,9	167,3	258,9	238,7	263,8
BCPV04P120V60	545,2	583,4	543,5	609,0	584,6	560,9	640,6	588,5	562,3	635,9
BCPM10P120V60	408,5	428,6	374,4	390,2	408,2	368,2	433,4	436,3	403,0	452,0
BCPM18P120V60	337,8	331,1	278,2	230,9	286,8	243,8	238,3	340,1	311,3	309,8
BVC04P60V80	489,0	537,3	510,9	465,6	553,3	540,3	574,7	544,0	524,0	522,0
BVC14P60V80	324,9	356,3	325,9	259,2	356,7	340,3	390,2	356,1	333,6	330,9
BVC24P60V80	290,0	302,7	273,7	207,7	294,1	270,0	333,7	298,4	277,1	279,4
BCPV04P60V80	554,7	628,6	610,0	639,0	644,6	635,8	692,2	635,4	621,3	666,5
BCPM10P60V80	413,4	487,0	457,9	427,2	501,4	485,1	544,6	493,0	470,4	488,1
BCPM18P60V80	346,6	389,6	358,8	261,3	395,3	376,0	392,4	391,7	367,5	333,0
BVC04P80V80	705,0	760,2	728,3	683,8	768,2	749,3	784,7	763,9	739,2	742,0
BVC14P80V80	494,1	531,3	490,2	410,2	506,4	477,4	524,0	523,5	492,2	490,8
BVC24P80V80	439,1	458,6	418,3	335,1	417,1	388,7	435,9	444,9	415,6	417,0
BCPV04P80V80	785,0	867,0	845,7	884,6	878,9	867,1	932,1	871,9	855,5	910,7
BCPM10P80V80	619,1	699,0	662,9	636,0	702,5	678,4	744,8	701,2	672,5	700,0
BCPM18P80V80	525,3	575,2	534,6	413,3	559,7	531,2	527,4	570,6	539,2	493,8
BVC04P100V80	872,0	933,4	892,9	855,6	933,7	907,2	944,3	934,5	903,1	913,2
BVC14P100V80	628,0	671,9	616,8	536,4	627,5	584,2	626,5	660,1	618,5	622,0
BVC24P100V80	559,7	585,6	530,4	443,6	519,0	474,7	513,9	567,4	527,3	532,3
BCPV04P100V80	956,6	1050,1	1023,8	1072,6	1056,9	1042,0	1114,2	1052,9	1033,1	1097,2

BCPM10P100V80	778,1	865,0	818,5	802,0	856,6	824,8	897,2	863,5	827,6	866,0
BCPM18P100V80	665,4	723,4	669,4	540,2	691,4	649,6	630,9	715,3	673,7	625,6
BVC04P120V80	1012,6	1083,0	1031,3	1003,9	1073,6	1040,3	1078,1	1080,9	1042,5	1059,9
BVC14P120V80	744,6	796,6	723,5	649,3	731,3	675,0	713,0	780,8	728,6	738,0
BVC24P120V80	669,2	699,2	625,2	541,9	607,0	545,1	580,3	677,2	625,9	635,8
BCPV04P120V80	1098,1	1207,0	1174,0	1232,8	1209,2	1189,6	1268,0	1208,2	1183,7	1255,8
BCPM10P120V80	912,1	1009,4	949,4	946,0	990,6	948,3	1025,0	1005,2	960,0	1008,8
BCPM18P120V80	785,7	854,1	783,0	653,7	803,6	750,0	718,3	841,9	790,4	742,2

Fonte: Autor (2022).

Tabela B-4 – Momento fletor máximo na seção de base do pilar

Momento Fletor Máximo na Seção de Base do Pilar (kN,m)										
Modelo	MEF	MA 1D	DL 1D	NBR 1D	MA 2D	DL 2D	NBR 2D	MA 3D	DL 3D	NBR 3D
BVC04P60V60	217,4	264,6	239,7	217,7	301,1	287,0	309,6	269,8	244,3	235,5
BVC14P60V60	116,4	151,9	130,9	104,7	189,6	176,5	199,5	157,6	134,9	114,0
BVC24P60V60	98,3	124,3	105,9	81,5	160,6	149,5	171,9	130,1	110,0	87,5
BCPV04P60V60	280,3	336,4	315,4	346,8	365,1	354,6	401,4	340,3	319,3	361,0
BCPM10P60V60	172,7	229,8	204,9	194,0	267,7	246,6	289,2	235,2	209,4	210,9
BCPM18P60V60	130,4	170,3	147,9	105,8	208,8	194,8	200,7	176,3	152,0	115,2
BVC04P80V60	288,2	348,3	316,1	298,4	394,2	378,2	404,7	350,7	317,7	316,8
BVC14P80V60	167,9	207,4	178,2	150,9	257,1	241,0	267,8	210,7	179,6	161,4
BVC24P80V60	144,4	171,3	145,2	118,5	219,5	204,3	231,0	174,9	146,6	125,4
BCPV04P80V60	361,4	432,9	406,9	450,0	468,2	456,3	508,2	434,7	408,2	463,2
BCPM10P80V60	237,0	306,0	273,0	268,7	354,4	337,5	380,5	308,5	274,4	286,6
BCPM18P80V60	185,6	231,1	200,3	152,3	281,6	264,5	269,3	234,3	201,8	163,0
BVC04P100V60	338,5	417,3	376,1	366,0	466,7	446,9	477,4	413,8	371,2	381,7
BVC14P100V60	204,8	254,7	215,7	191,4	309,5	288,8	318,8	251,3	210,2	199,4
BVC24P100V60	177,9	211,6	176,5	151,4	265,0	245,4	274,6	209,0	171,2	155,7
BCPV04P100V60	420,1	511,2	478,8	533,2	548,5	535,1	591,6	508,5	475,6	544,2
BCPM10P100V60	283,2	369,3	326,7	331,8	423,0	400,8	450,1	365,9	321,2	347,1
BCPM18P100V60	224,8	282,7	241,9	193,2	338,2	316,4	320,7	279,5	236,3	201,4
BVC04P120V60	382,2	485,3	433,6	432,1	535,7	510,9	543,1	474,5	420,2	442,6
BVC14P120V60	235,5	302,8	252,0	232,5	358,4	331,2	363,0	290,0	235,9	234,8
BVC24P120V60	206,8	253,0	206,8	185,1	307,4	281,6	311,7	241,3	191,3	183,7
BCPV04P120V60	472,9	587,2	547,3	612,8	624,0	608,1	669,1	578,9	537,7	620,5
BCPM10P120V60	322,5	432,4	378,2	394,0	486,3	459,5	512,5	420,3	363,5	403,9
BCPM18P120V60	258,5	334,9	282,0	234,7	391,1	362,7	365,2	321,9	265,9	237,2
BVC04P60V80	469,3	542,3	515,9	470,6	589,5	575,9	599,3	557,2	531,9	505,3
BVC14P60V80	296,5	361,3	330,8	264,2	425,1	407,0	434,3	382,2	351,3	297,6
BVC24P60V80	257,2	307,7	278,7	212,7	373,1	345,4	383,7	329,3	298,7	242,0
BCPV04P60V80	551,6	633,6	615,0	644,0	666,3	657,5	704,3	643,7	626,3	663,0
BCPM10P60V80	401,0	491,9	462,9	432,2	545,9	529,3	572,4	509,2	480,6	468,4

BCPM18P60V80	323,9	394,6	363,8	266,3	457,1	437,4	436,2	415,0	383,4	299,9
BVC04P80V80	677,9	768,6	736,7	692,2	834,6	820,1	848,5	785,2	754,6	733,3
BVC14P80V80	466,5	539,6	498,6	418,6	635,5	613,1	651,7	565,3	523,9	466,7
BVC24P80V80	411,9	466,9	426,6	343,5	567,7	545,7	585,3	494,6	453,3	388,5
BCPV04P80V80	776,2	875,3	854,1	892,9	918,7	909,8	959,8	885,9	865,6	912,7
BCPM10P80V80	601,6	707,3	671,2	644,4	784,6	766,1	818,4	727,6	691,7	688,7
BCPM18P80V80	503,9	583,6	542,9	421,6	676,0	654,1	654,3	608,5	567,4	469,8
BVC04P100V80	826,0	944,7	904,2	867,0	1019,9	1002,3	1033,1	958,2	918,3	906,9
BVC14P100V80	590,5	683,3	628,1	547,8	797,5	768,7	810,8	705,9	649,3	598,2
BVC24P100V80	528,1	597,0	541,8	455,0	718,6	689,5	732,1	622,0	565,4	503,2
BCPV04P100V80	936,0	1061,5	1035,2	1084,0	1109,0	1099,3	1152,0	1069,3	1043,9	1102,2
BCPM10P100V80	744,3	876,4	829,8	813,4	963,8	942,8	1000,1	892,0	846,1	856,8
BCPM18P100V80	634,4	734,8	680,8	551,6	844,0	816,1	813,9	756,0	701,0	602,0
BVC04P120V80	943,2	1096,7	1045,1	1017,7	1173,3	1153,1	1183,6	1102,6	1051,4	1051,7
BVC14P120V80	686,7	810,3	737,2	663,0	929,5	895,7	935,4	821,8	748,2	707,1
BVC24P120V80	619,6	713,0	639,0	555,7	840,8	803,4	845,3	726,7	650,1	597,9
BCPV04P120V80	1066,4	1220,7	1187,7	1246,6	1269,4	1257,6	1312,8	1224,2	1191,5	1261,7
BCPM10P120V80	856,2	1023,2	963,2	959,7	1114,4	1088,5	1147,5	1030,8	970,4	997,0
BCPM18P120V80	735,0	867,9	796,8	667,5	981,1	948,7	939,0	878,3	806,4	711,6

Fonte: Autor (2022).

Tabela B-5 – Momento fletor negativo máximo na viga

Momento Fletor Negativo Máximo na Viga (kN,m)										
Modelo	MEF	MA 1D	DL 1D	NBR 1D	MA 2D	DL 2D	NBR 2D	MA 3D	DL 3D	NBR 3D
BVC04P60V60	251,3	291,8	264,2	239,7	322,8	303,9	323,5	294,5	265,5	254,4
BVC14P60V60	129,4	166,7	143,3	114,3	194,2	175,7	188,7	168,4	142,5	116,9
BVC24P60V60	106,9	136,1	115,6	88,4	160,8	144,4	155,0	137,4	114,5	87,0
BCPV04P60V60	327,2	371,6	348,3	383,1	397,2	383,2	436,2	373,8	350,0	396,6
BCPM10P60V60	198,6	253,2	225,6	213,4	284,3	256,7	298,6	255,6	226,3	226,6
BCPM18P60V60	146,1	187,1	162,2	115,4	216,2	196,7	190,2	189,3	161,8	118,2
BVC04P80V60	322,6	369,3	334,9	316,0	407,8	386,4	410,7	369,3	333,3	331,6
BVC14P80V60	178,0	218,8	187,6	158,4	255,4	232,5	249,4	218,2	184,3	163,2
BVC24P80V60	148,7	180,2	152,4	123,9	213,7	192,0	206,2	179,6	148,8	124,3
BCPV04P80V60	408,8	459,7	431,9	477,9	490,6	475,1	532,8	459,9	431,1	490,3
BCPM10P80V60	262,7	324,1	288,9	284,3	363,6	340,7	382,2	323,7	286,6	298,8
BCPM18P80V60	199,0	244,2	211,3	160,0	282,5	258,8	251,3	243,7	208,2	164,9
BVC04P100V60	368,4	425,1	382,9	372,4	465,5	440,0	468,7	419,9	375,7	386,1
BVC14P100V60	210,5	258,3	218,2	193,3	298,0	269,5	290,4	252,3	209,4	197,4
BVC24P100V60	177,2	214,1	178,0	152,3	250,7	223,4	240,8	208,6	169,2	152,2
BCPV04P100V60	461,2	521,5	488,2	544,1	553,1	535,9	597,1	517,7	483,5	554,3
BCPM10P100V60	305,0	375,9	332,1	337,4	418,6	390,1	438,0	370,5	324,1	350,2
BCPM18P100V60	233,9	287,0	245,1	195,2	328,4	299,1	292,6	281,3	236,4	199,4

BVC04P120V60	404,3	474,5	423,5	422,0	514,3	483,9	514,7	463,4	409,8	431,7
BVC14P120V60	235,5	294,7	244,7	225,5	334,1	298,7	322,6	281,8	228,3	226,8
BVC24P120V60	199,8	245,7	200,2	178,9	282,3	248,3	267,9	233,7	184,3	176,4
BCPV04P120V60	503,5	574,7	535,5	599,9	604,8	585,1	649,1	566,4	525,7	607,3
BCPM10P120V60	338,0	422,3	369,0	384,5	463,9	430,6	482,1	410,1	353,9	393,6
BCPM18P120V60	261,5	326,3	274,3	227,7	367,2	331,1	325,0	313,2	257,9	229,1
BVC04P60V80	589,7	646,6	614,9	560,4	687,4	666,8	685,7	657,6	625,8	589,5
BVC14P60V80	364,3	429,1	392,4	312,3	477,2	449,3	458,2	441,9	402,9	330,1
BVC24P60V80	310,1	364,6	329,8	250,4	411,1	382,6	388,7	376,7	338,4	260,9
BCPV04P60V80	694,0	756,3	734,0	768,8	785,9	772,7	830,5	764,2	742,4	786,6
BCPM10P60V80	501,2	586,0	551,2	514,2	631,3	606,7	648,6	598,3	562,5	543,3
BCPM18P60V80	399,6	469,0	432,0	314,8	517,7	488,8	460,9	482,2	442,7	332,9
BVC04P80V80	817,8	878,6	841,8	790,4	935,7	913,9	938,4	890,4	853,5	825,4
BVC14P80V80	546,2	614,3	566,9	474,6	689,4	655,6	674,2	630,3	580,4	506,3
BVC24P80V80	473,2	530,5	483,9	387,9	605,9	571,6	585,2	546,5	496,8	412,9
BCPV04P80V80	939,0	1001,8	977,3	1022,1	1040,6	1027,3	1087,9	1009,6	985,3	1040,2
BCPM10P80V80	721,1	807,9	766,2	735,3	873,3	846,3	898,0	822,0	779,0	771,9
BCPM18P80V80	593,2	665,1	618,1	478,1	739,2	706,5	677,7	681,2	631,9	510,0
BVC04P100V80	964,6	1035,6	990,7	949,5	1099,2	1073,6	1101,5	1043,8	998,1	983,1
BVC14P100V80	668,4	746,0	684,8	595,8	834,7	792,6	816,1	758,2	693,5	630,7
BVC24P100V80	586,1	650,3	589,2	493,0	741,2	697,5	715,1	663,2	598,2	522,4
BCPV04P100V80	1093,7	1164,9	1135,7	1189,9	1206,2	1191,7	1254,3	1169,7	1140,6	1206,1
BCPM10P100V80	863,4	959,9	908,3	890,0	1032,5	1001,8	1059,2	969,1	916,3	926,0
BCPM18P100V80	722,0	803,0	743,2	600,0	889,6	849,3	820,0	814,9	752,0	635,1
BVC04P120V80	1067,4	1152,0	1097,1	1068,0	1214,7	1185,5	1214,4	1153,2	1097,3	1096,5
BVC14P120V80	754,0	847,8	770,2	691,4	938,2	888,6	912,9	850,3	769,6	722,6
BVC24P120V80	665,7	744,4	665,8	577,3	837,9	783,6	803,4	747,5	664,0	604,0
BCPV04P120V80	1204,0	1283,7	1248,6	1311,1	1324,6	1307,5	1371,4	1284,4	1248,8	1324,4
BCPM10P120V80	963,1	1073,8	1010,1	1006,5	1147,4	1110,6	1170,5	1075,7	1009,8	1037,1
BCPM18P120V80	811,6	908,9	833,4	696,1	996,4	949,5	917,2	911,2	832,6	727,4

Fonte: Autor (2022).

Tabela B-6 – Tensão de compressão na alvenaria, modelos MEF, 1D e 2D

Tensão de Compressão na Alvenaria (MPa) - MEF, MDE 1D e 2D											
Modelo	MEF		MA 1D	DL 1D	NBR 1D	MA 2D		DL 2D		NBR 2D	
	Máx,	Meio	Cent,	Cent,	Cent,	Sup,	Inf,	Sup,	Inf,	Sup,	Inf,
BVC04P60V60	3,29	1,18	2,49	2,26	3,10	2,45	2,44	2,23	2,23	2,76	2,75
BVC14P60V60	4,79	1,71	4,36	3,74	4,51	4,52	4,50	3,95	3,93	4,70	4,71
BVC24P60V60	5,40	1,93	4,89	4,16	4,81	5,14	5,12	4,44	4,43	5,18	5,21
BCPV04P60V60	1,99	0,71	1,48	1,39	2,31	1,40	1,39	1,31	1,30	1,77	1,75
BCPM10P60V60	3,29	1,18	3,03	2,70	3,86	3,03	3,02	2,81	2,79	3,55	3,53
BCPM18P60V60	4,39	1,57	4,02	3,49	3,75	4,14	4,13	3,64	3,63	3,90	3,91

BVC04P80V60	3,83	1,37	2,67	2,42	3,57	2,62	2,60	2,39	2,37	3,17	3,13
BVC14P80V60	5,71	2,04	4,85	4,16	5,48	5,04	5,01	4,40	4,38	5,70	5,67
BVC24P80V60	6,48	2,31	5,50	4,65	5,90	5,79	5,77	5,00	4,98	6,37	6,36
BCPV04P80V60	2,27	0,81	1,55	1,46	2,52	1,46	1,45	1,36	1,35	1,94	1,91
BCPM10P80V60	3,92	1,40	3,28	2,93	4,50	3,28	3,25	2,95	2,93	4,11	4,07
BCPM18P80V60	5,25	1,88	4,45	3,85	4,55	4,58	4,56	4,03	4,01	4,73	4,70
BVC04P100V60	4,25	1,52	2,80	2,52	3,96	2,74	2,72	2,48	2,46	3,50	3,46
BVC14P100V60	6,45	2,31	5,21	4,40	6,29	5,39	5,36	4,66	4,64	6,49	6,45
BVC24P100V60	7,32	2,62	5,95	4,95	6,82	6,24	6,21	5,32	5,30	7,34	7,29
BCPV04P100V60	2,52	0,90	1,60	1,50	2,70	1,50	1,49	1,39	1,38	2,10	2,07
BCPM10P100V60	4,41	1,57	3,47	3,06	5,09	3,45	3,42	3,08	3,06	4,57	4,51
BCPM18P100V60	5,93	2,12	4,76	4,07	5,22	4,88	4,85	4,26	4,23	5,38	5,34
BVC04P120V60	4,63	1,66	2,92	2,61	4,33	2,85	2,83	2,56	2,53	3,84	3,79
BVC14P120V60	7,15	2,55	5,55	4,61	7,08	5,72	5,68	4,87	4,84	7,23	7,18
BVC24P120V60	8,07	2,88	6,38	5,20	7,74	6,65	6,62	5,57	5,55	8,19	8,15
BCPV04P120V60	2,76	0,99	1,65	1,54	2,87	1,55	1,54	1,43	1,41	2,27	2,24
BCPM10P120V60	4,88	1,74	3,63	3,18	5,52	3,61	3,58	3,19	3,16	5,02	4,96
BCPM18P120V60	6,57	2,35	5,05	4,25	5,88	5,16	5,13	4,44	4,41	5,99	5,94
BVC04P60V80	4,82	1,72	3,06	2,91	4,06	2,91	2,88	2,75	2,71	3,27	3,21
BVC14P60V80	8,22	2,94	6,20	5,67	6,91	6,21	6,15	5,70	5,65	6,51	6,42
BVC24P60V80	9,56	3,41	7,25	6,56	7,62	7,36	7,31	6,70	6,64	7,49	7,41
BCPV04P60V80	2,77	0,99	1,67	1,62	2,60	1,54	1,52	1,47	1,45	1,86	1,83
BCPM10P60V80	5,26	1,88	3,88	3,65	5,22	3,74	3,71	3,51	3,48	4,31	4,24
BCPM18P60V80	7,43	2,65	5,58	5,14	5,73	5,54	5,49	5,12	5,07	5,39	5,32
BVC04P80V80	5,66	2,02	3,27	3,13	4,66	3,07	3,03	2,92	2,88	3,70	3,61
BVC14P80V80	10,29	3,67	7,00	6,46	8,56	6,96	6,89	6,46	6,39	7,93	7,79
BVC24P80V80	12,09	4,32	8,32	7,59	9,63	8,42	8,33	7,74	7,66	9,35	9,22
BCPV04P80V80	3,21	1,15	1,74	1,70	2,81	1,58	1,55	1,52	1,49	2,02	1,97
BCPM10P80V80	6,40	2,29	4,21	3,99	6,07	4,01	3,96	3,80	3,75	4,94	4,83
BCPM18P80V80	9,21	3,29	6,24	5,80	7,10	6,14	6,07	5,73	5,66	6,56	6,45
BVC04P100V80	6,27	2,24	3,40	3,25	5,10	3,18	3,13	3,02	2,97	4,07	3,97
BVC14P100V80	11,70	4,18	7,50	6,88	9,80	7,43	7,34	6,87	6,78	9,04	8,87
BVC24P100V80	13,80	4,93	9,00	8,15	11,17	9,08	8,98	8,31	8,21	10,79	10,61
BCPV04P100V80	3,55	1,27	1,79	1,74	2,99	1,62	1,59	1,55	1,52	2,18	2,12
BCPM10P100V80	7,19	2,57	4,41	4,17	6,70	4,19	4,13	3,96	3,89	5,46	5,33
BCPM18P100V80	10,44	3,73	6,64	6,15	8,12	6,51	6,43	6,06	5,97	7,48	7,33
BVC04P120V80	6,81	2,43	3,50	3,33	5,50	3,28	3,23	3,09	3,03	4,43	4,32
BVC14P120V80	12,86	4,59	7,89	7,17	10,90	7,81	7,71	7,15	7,04	10,04	9,84
BVC24P120V80	15,17	5,42	9,54	8,53	12,53	9,60	9,49	8,69	8,58	12,06	11,85
BCPV04P120V80	3,87	1,38	1,82	1,77	3,15	1,65	1,63	1,58	1,54	2,35	2,29
BCPM10P120V80	7,89	2,82	4,57	4,30	7,25	4,34	4,28	4,07	3,99	5,97	5,82
BCPM18P120V80	11,50	4,11	6,96	6,38	9,02	6,82	6,73	6,28	6,18	8,30	8,13

Fonte: Autor (2022).

Tabela B-7 – Tensão de compressão na alvenaria, modelos MEF e 3D

Tensão de Compressão na Alvenaria (MPa) - MEF, MDE 3D											
Modelo	MEF		MA 3D			DL 3D			NBR 3D		
	Máx,	Meio	Sup,	Cent,	Inf,	Sup,	Cent,	Inf,	Sup,	Cent,	Inf,
BVC04P60V60	3,29	1,18	2,59	2,54	2,57	2,39	2,31	2,37	3,32	2,97	3,30
BVC14P60V60	4,79	1,71	4,51	4,49	4,48	3,94	3,88	3,91	4,96	4,64	4,93
BVC24P60V60	5,40	1,93	5,05	5,08	5,02	4,35	4,34	4,32	5,27	5,05	5,24
BCPV04P60V60	1,99	0,71	1,54	1,50	1,53	1,47	1,41	1,46	2,37	2,08	2,35
BCPM10P60V60	3,29	1,18	3,14	3,09	3,12	2,85	2,77	2,83	4,17	3,74	4,14
BCPM18P60V60	4,39	1,57	4,16	4,15	4,14	3,67	3,61	3,65	4,12	3,85	4,10
BVC04P80V60	3,83	1,37	2,85	2,69	2,83	2,63	2,46	2,61	3,86	3,34	3,82
BVC14P80V60	5,71	2,04	5,13	4,91	5,09	4,47	4,24	4,44	6,08	5,44	6,02
BVC24P80V60	6,48	2,31	5,80	5,59	5,76	4,98	4,75	4,94	6,55	5,96	6,48
BCPV04P80V60	2,27	0,81	1,66	1,56	1,65	1,59	1,47	1,58	2,62	2,24	2,59
BCPM10P80V60	3,92	1,40	3,49	3,31	3,47	3,17	2,97	3,15	4,89	4,25	4,84
BCPM18P80V60	5,25	1,88	4,71	4,50	4,68	4,15	3,92	4,12	5,05	4,51	5,00
BVC04P100V60	4,25	1,52	3,07	2,79	3,04	2,82	2,53	2,79	4,30	3,63	4,25
BVC14P100V60	6,45	2,31	5,62	5,17	5,58	4,83	4,41	4,79	7,00	6,08	6,92
BVC24P100V60	7,32	2,62	6,39	5,91	6,34	5,39	4,95	5,35	7,60	6,70	7,51
BCPV04P100V60	2,52	0,90	1,77	1,60	1,76	1,69	1,50	1,67	2,85	2,38	2,81
BCPM10P100V60	4,41	1,57	3,78	3,45	3,75	3,40	3,06	3,37	5,48	4,64	5,42
BCPM18P100V60	5,93	2,12	5,15	4,73	5,11	4,48	4,07	4,44	5,81	5,04	5,74
BVC04P120V60	4,63	1,66	3,28	2,88	3,25	2,98	2,58	2,95	4,75	3,91	4,69
BVC14P120V60	7,15	2,55	6,11	5,41	6,06	5,15	4,51	5,10	7,90	6,67	7,80
BVC24P120V60	8,07	2,88	6,96	6,21	6,91	5,76	5,10	5,70	8,63	7,40	8,52
BCPV04P120V60	2,76	0,99	1,88	1,63	1,86	1,78	1,53	1,76	3,08	2,51	3,04
BCPM10P120V60	4,88	1,74	4,06	3,57	4,03	3,61	3,14	3,57	6,07	5,01	6,00
BCPM18P120V60	6,57	2,35	5,58	4,93	5,54	4,77	4,18	4,72	6,56	5,54	6,47
BVC04P60V80	4,82	1,72	3,00	3,14	2,97	2,89	2,99	2,86	4,28	3,79	4,22
BVC14P60V80	8,22	2,94	6,09	6,51	6,04	5,65	5,99	5,59	7,56	6,93	7,45
BVC24P60V80	9,56	3,41	7,12	7,69	7,06	6,53	6,98	6,47	8,37	7,83	8,25
BCPV04P60V80	2,77	0,99	1,63	1,70	1,62	1,61	1,65	1,59	2,64	2,31	2,60
BCPM10P60V80	5,26	1,88	3,81	4,00	3,77	3,63	3,78	3,60	5,54	4,92	5,46
BCPM18P60V80	7,43	2,65	5,48	5,84	5,43	5,13	5,40	5,08	6,27	5,75	6,18
BVC04P80V80	5,66	2,02	3,29	3,33	3,24	3,20	3,20	3,15	4,93	4,25	4,84
BVC14P80V80	10,29	3,67	7,05	7,25	6,97	6,60	6,71	6,52	9,42	8,30	9,25
BVC24P80V80	12,09	4,32	8,38	8,67	8,29	7,76	7,94	7,67	10,68	9,53	10,50
BCPV04P80V80	3,21	1,15	1,75	1,76	1,73	1,74	1,72	1,71	2,88	2,47	2,83
BCPM10P80V80	6,40	2,29	4,22	4,31	4,17	4,08	4,10	4,03	6,47	5,59	6,35
BCPM18P80V80	9,21	3,29	6,27	6,44	6,19	5,93	6,00	5,85	7,80	6,88	7,67
BVC04P100V80	6,27	2,24	3,52	3,44	3,47	3,43	3,30	3,37	5,45	4,59	5,34
BVC14P100V80	11,70	4,18	7,73	7,67	7,63	7,24	7,05	7,13	10,84	9,28	10,63
BVC24P100V80	13,80	4,93	9,28	9,25	9,16	8,55	8,40	8,43	12,45	10,76	12,22

BCPV04P100V80	3,55	1,27	1,85	1,80	1,83	1,84	1,75	1,81	3,11	2,60	3,04
BCPM10P100V80	7,19	2,57	4,56	4,47	4,50	4,40	4,24	4,33	7,19	6,08	7,05
BCPM18P100V80	10,44	3,73	6,85	6,78	6,76	6,46	6,29	6,37	8,98	7,68	8,80
BVC04P120V80	6,81	2,43	3,74	3,52	3,69	3,63	3,36	3,57	5,93	4,90	5,81
BVC14P120V80	12,86	4,59	8,36	7,96	8,24	7,73	7,25	7,61	12,10	10,11	11,86
BVC24P120V80	15,17	5,42	10,08	9,65	9,94	9,19	8,65	9,05	14,02	11,80	13,74
BCPV04P120V80	3,87	1,38	1,96	1,82	1,93	1,94	1,78	1,90	3,33	2,74	3,26
BCPM10P120V80	7,89	2,82	4,87	4,59	4,79	4,67	4,33	4,59	7,86	6,50	7,70
BCPM18P120V80	11,50	4,11	7,38	7,01	7,28	6,90	6,45	6,79	10,02	8,37	9,82

Fonte: Autor (2022).