

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**HERNANE FELIPE THOMAZ SOARES**

**ANÁLISE NUMÉRICA DAS TENSÕES NA DIAGONAL COMPRIMIDA DE UM  
PÓRTICO PREENCHIDO POR ALVENARIA**

**Alegrete  
2016**

**HERNANE FELIPE THOMAZ SOARES**

**ANÁLISE NUMÉRICA DAS TENSÕES NA DIAGONAL COMPRIMIDA DE UM  
PÓRTICO PREENCHIDO POR ALVENARIA**

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

Orientador: Prof. Dr. Telmo Egmar  
Camilo Deifeld

Coorientador: Prof. Me. Aldo Leonel  
Temp

**Alegrete  
2016**

HERNANE FELIPE THOMAZ SOARES

**ANÁLISE NUMÉRICA DAS TENSÕES NA DIAGONAL COMPRIMIDA DE UM  
PÓRTICO PREENCHIDO POR ALVENARIA**

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

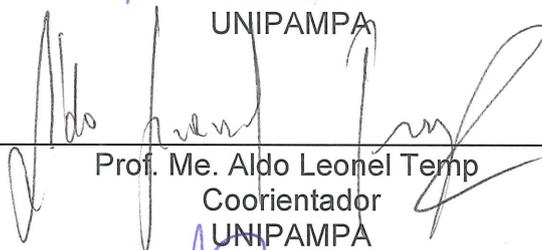
Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 01 de dezembro  
de 2016.

Banca examinadora:



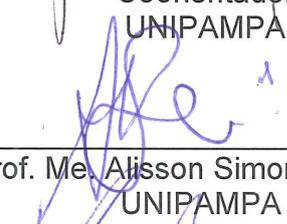
---

Prof. Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld  
Orientador  
UNIPAMPA



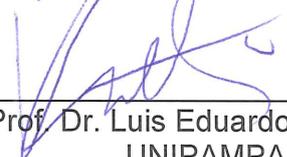
---

Prof. Me. Aldo Leonel Temp  
Coorientador  
UNIPAMPA



---

Prof. Me. Alisson Simonetti Milani  
UNIPAMPA



---

Prof. Dr. Luis Eduardo Kostascki  
UNIPAMPA

Dedico este trabalho aos meus pais, João Carlos Soares e Délia da Silva Thomaz Soares, que não mediram esforços para que este sonho se tornasse realidade.

## **AGRADECIMENTO**

A Deus, porque “Todas as coisas foram feitas por intermédio dEle, e sem Ele nada do que foi feito se fez”.

Aos meus pais, João Carlos Soares e Délia da Silva Thomaz Soares, por terem me apoiado e dado suporte todos anos até que chegasse este momento, me ensinando a viver e sempre buscando me guiar por um bom caminho.

À minha avó, Elia Albertina Thomaz, que também se dedicou e sonhou este sonho comigo e me ensinou a amar a vida, mesmo em face das maiores dificuldades.

À minha tia, Mariza Thomaz, por ter me ensinado uma profissão e por ter sido uma influência muito positiva na minha escolha pela engenharia civil.

Aos professores da Universidade Federal do Pampa que contribuíram para a minha formação.

A todos os amigos da universidade pelos momentos que passamos juntos, que, com certeza, ajudaram a tornar o período de graduação mais agradável.

Aos professores Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld e Me. Aldo Leonel Temp, por terem me orientado e guiado no desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais amigos que participaram, direta ou indiretamente, da minha formação e se fizeram presentes em momentos importantes da minha vida.

“Não procurem o sucesso. Quanto mais o procurarem e o transformarem num alvo, mais vocês vão sofrer. Porque o sucesso, como a felicidade, não pode ser perseguido; ele deve acontecer, e só tem lugar como efeito colateral de uma dedicação pessoal a uma causa maior que a pessoa, ou como subproduto da rendição pessoal a outro ser.”

Viktor Emil Frankl

## RESUMO

O presente trabalho aborda um estudo sobre pórticos preenchidos, que é o nome que se dá a presença alvenaria no interior de um pórtico e esta é considerada como influente no comportamento da estrutura como um todo. Em um primeiro momento, discorre-se sobre o desenvolvimento histórico desse tema e como ele se desenvolveu, da sua relevância e dos principais aspectos teóricos relacionados a ele. Fato importante é que este tema relaciona-se com o conceito de diagonal equivalente, que consiste em substituir o painel de alvenaria existente no pórtico por uma diagonal de certa largura, dada por equações existentes na bibliografia, no intuito de simplificar as análises necessárias. Este estudo é realizado comparando-se os resultados obtidos de simulações numéricas de um pórtico de concreto armado preenchido por alvenaria, com pórticos semelhantes, mas preenchidos com diferentes diagonais equivalentes. São feitas, ainda, comparações entre métodos de aplicação, com o uso do software Ansys, que emprega o Método dos Elementos Finitos, e do software Ftool, que é gratuito e de mais simples aplicação, na intenção de determinar se o Ftool pode ser empregado com segurança. Por fim, apresenta-se um resumo total e comparativo dos diferentes resultados obtidos para cada simulação, acompanhado das considerações finais sobre estes. A contribuição do painel fica evidente nos resultados, porém há a necessidade de ampliação dos estudos para uma confiabilidade maior na definição da diagonal equivalente.

Palavras-Chave: Pórtico preenchido. Painel de alvenaria. Diagonal equivalente. Deslocamento horizontal. Método dos elementos finitos. Ansys.

## **ABSTRACT**

The present paper addresses a study in infilled frames, which is the name given to the existence of masonry within a frame and is considered influential in the behavior of the structure. At first, it is discussed the historical development of this theme and how it developed, its relevance and the main theoretical aspects related to it. An important fact is that this theme relates to the concept of equivalent diagonal, which consists of replacing the masonry panel in the frame with a diagonal of a certain width, given by equations existing in the bibliography, in order to simplify the necessary analyzes. This study develops by comparing the results obtained from numerical simulations of a reinforced concrete portal filled with masonry, with similar frames but filled with different equivalent diagonals. Also presents comparisons between application methods using the Ansys software, which uses the Finite Element Method, and Ftool software, which is free and simple to apply, in order to determine whether Ftool could be used with safety. Finally, it presents a total overview and comparison of the different results for each simulation, together with final comments on these. The panel's contribution is evident in the results, but there is the need to expand the study to achieve greater reliability in the definition of equivalent diagonal.

**Keywords:** Infilled frame. Masonry Panel. Equivalent diagonal. Horizontal Displacement. Finite Elements Method. Ansys.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de efeito desfavorável de um pórtico preenchido.....	15
Figura 2 - Términos dos estágios .....	21
Figura 3 – Muro das Lamentações.....	22
Figura 4 – Edificação em alvenaria estrutural .....	22
Figura 5 - Deformação do pórtico preenchido .....	24
Figura 6 - Modos de fissuração da alvenaria.....	24
Figura 7 - Formas de modelagem .....	25
Figura 8- Diagonal equivalente segundo Holmes (1961) .....	27
Figura 9 - Diagonal equivalente segundo Smith (1962) .....	27
Figura 10 - Parâmetros para cálculo da diagonal equivalente.....	29
Figura 11 - Diferentes geometrias dos elementos finitos .....	31
Figura 12 - Elemento plano PLANE182 .....	32
Figura 13 - Elemento de contato CONTA171.....	33
Figura 14 - Elemento alvo TARGE169 .....	33
Figura 15 - Pórtico preenchido de estudo .....	34
Figura 16 – Malha de elementos finitos do pórtico preenchido .....	36
Figura 17 – Malha de elementos finitos do pórtico com diagonal equivalente .....	37
Figura 18 – Modelo de pórtico preenchido com diagonal equivalente no Ftool.....	37
Figura 19 – Tensões principais máximas (kN/m <sup>2</sup> ) para E = 450MPa .....	38
Figura 20 – Tensões principais máximas (kN/m <sup>2</sup> ) na alvenaria para E = 450MPa .....	38
Figura 21 – Tensões principais Mínimas (kN/m <sup>2</sup> ) para E = 450MPa .....	39
Figura 22 – Tensões principais Mínimas (kN/m <sup>2</sup> ) na alvenaria para E = 450MPa.....	39
Figura 23 – Pressão de contato na interface pórtico/painel (kN/m <sup>2</sup> ) para E = 450MPa .....	40
Figura 24 – Tensões de cisalhamento (kN/m <sup>2</sup> ) para E = 450Mpa .....	40
Figura 25 – Tensões de cisalhamento (kN/m <sup>2</sup> ) na alvenaria para E = 450Mpa.....	41
Figura 26 – Deslocamento horizontal (m) para E = 450MPa.....	41
Figura 27 – Deslocamento horizontal (m) na alvenaria para E = 450MPa .....	42
Figura 28 – Tensões principais máximas (kN/m <sup>2</sup> ) para E = 900MPa .....	42
Figura 29 – Tensões principais máximas (kN/m <sup>2</sup> ) na alvenaria para E = 900MPa .....	43
Figura 30 – Tensões principais mínimas (kN/m <sup>2</sup> ) para E = 900MPa .....	43
Figura 31 – Tensões principais mínimas (kN/m <sup>2</sup> ) na alvenaria para E = 900MPa.....	43

Figura 32 – Pressão de contato na interface pórtico/painel (kN/m <sup>2</sup> ) para E = 900MPa .....	44
Figura 33 – Tensões de cisalhamento (kN/m <sup>2</sup> ) para E = 900MPa.....	44
Figura 34 – Tensões de cisalhamento (kN/m <sup>2</sup> ) para E = 900MPa.....	44
Figura 35 – Deslocamento horizontal (m) para E = 900MPa.....	45
Figura 36 – Deslocamento horizontal (m) na alvenaria para E = 900MPa .....	45
Figura 37 – Tensões principais mínimas (kN/m <sup>2</sup> ) na alvenaria para E= 450 MPa.....	46
Figura 38 – Tensões equivalentes de von Mises (kN/m <sup>2</sup> ) .....	46
Figura 39 – Tensões principais máximas (kN/m <sup>2</sup> ) para E = 450 MPa – Diagonal de Paulay e Priestley (1992) .....	49
Figura 40 – Tensões principais máximas (kN/m <sup>2</sup> ) na alvenaria para E = 450 MPa– Diagonal de Paulay e Priestley (1992) .....	49
Figura 41 – Tensões principais mínimas (kN/m <sup>2</sup> ) para E = 450 MPa – Diagonal de Paulay e Priestley (1992) .....	50
Figura 42 – Tensões principais mínimas (kN/m <sup>2</sup> ) na alvenaria para E = 450 MPa– Diagonal de Paulay e Priestley (1992) .....	50
Figura 43 – Pressão de contato na interface pórtico/diagonal(kN/m <sup>2</sup> ) para E=900MPa– Diagonal de Paulay e Priestley (1992) .....	50
Figura 44 – Tensões de cisalhamento (kN/m <sup>2</sup> ) para E = 450MPa – Diagonal de Paulay e Priestley (1992) .....	51
Figura 45 – Tensões de cisalhamento (kN/m <sup>2</sup> ) na alvenaria para E = 450MPa– Diagonal de Paulay e Priestley (1992) .....	51
Figura 46 – Deslocamento horizontal (m) para E = 450MPa – Diagonal de Paulay e Priestley (1992) .....	51
Figura 47 – Deslocamento horizontal (m) na alvenaria para E = 450MPa– Diagonal de Paulay e Priestley (1992) .....	52
Figura 48 – Malha de elementos finitos do pórtico sem o painel de alvenaria .....	55
Figura 49 – Modelo de pórtico sem o painel de preenchimento no Ftool .....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equações para determinação da diagonal equivalente.....	29
Tabela 2 - Propriedades dos materiais utilizados na modelagem .....	35
Tabela 3 – Largura das diagonais equivalentes estudadas .....	36
Tabela 4 – Deslocamento horizontal máximo do pórtico com o MEF para E= 450MPa .....	47
Tabela 5 – Deslocamento horizontal máximo do pórtico com o Ftool para E= 450MPa .....	48
Tabela 6 – Deslocamento horizontal máximo do pórtico com o MEF para E= 900MPa .....	52
Tabela 7 – Deslocamento horizontal máximo do pórtico com o Ftool para E= 900MPa .....	53

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CSA – Canadian Standards Association

E – Módulo de elasticidade

FEMA – Federal Emergency Management Agency

MEF – Método dos Elementos Finitos

NBR – Norma Brasileira

NZS – New Zealand Standards

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Considerações Iniciais.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 Justificativa.....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 Objetivos .....</b>	<b>17</b>
<b>2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Desenvolvimento histórico.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 Pórtico preenchido.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3 Painéis de alvenaria .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.1 Ligação dos painéis aos pórticos .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.2 Fissuração dos painéis de alvenaria .....</b>	<b>24</b>
<b>2.4 Modelagem.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.1 Macromodelagem .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.1.1 Barra diagonal equivalente.....</b>	<b>26</b>
<b>2.5.2 Micromodelagem .....</b>	<b>30</b>
<b>2.5.3 Método dos Elementos Finitos .....</b>	<b>30</b>
<b>2.5.3.1 O Software Ansys e os elementos finitos .....</b>	<b>31</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>34</b>
<b>3.1 Análise numérica através do MEF de um pórtico preenchido .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2 Estudo da barra diagonal equivalente pelo MEF .....</b>	<b>36</b>
<b>3.3 Análise do pórtico preenchido no software Ftool .....</b>	<b>37</b>
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>38</b>
<b>4.1 Análise do comportamento do pórtico preenchido através do MEF .....</b>	<b>38</b>
<b>4.2 Análise do comportamento das diagonais equivalentes.....</b>	<b>47</b>
<b>4.3 Análise dos modelos sem o painel de alvenaria .....</b>	<b>55</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>58</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

A construção civil é um dos maiores setores da economia mundial e é essencial no desenvolvimento de um país. Com o aumento crescente da população mundial, sempre haverá a necessidade de se construírem habitações para todos, além disso, os setores do comércio e da indústria também geram demanda na construção.

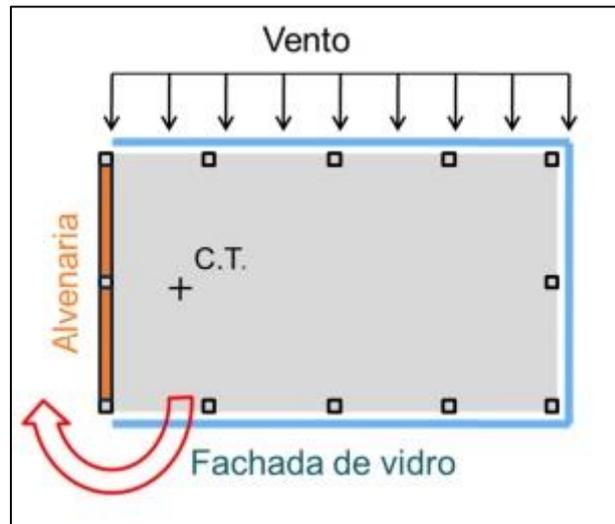
Esse aumento no número de edificações conduz à uma diminuição no espaço, especialmente o urbano, o que já acontece em grandes centros como a cidade de São Paulo. No intuito de se aproveitar melhor o espaço disponível, as construções mais atuais tendem a ter menores dimensões horizontais, porém com uma altura mais elevada, o que leva a estruturas mais esbeltas.

Nessas estruturas costuma-se considerar como elementos de sustentação somente as lajes, as vigas e os pilares, e as paredes são apenas elementos de vedação, não tendo contribuição estrutural. A alvenaria de preenchimento tem a função principal de proteger e dividir ambientes, devendo garantir a estanqueidade e isolamento térmico e acústico em uma edificação.

Porém, segundo Medeiros (2007, p. 17), “[...] as paredes, mesmo sem a contribuição dos revestimentos, possuem uma rigidez aproximadamente 1,8 vezes a da viga”. A tendência, então, é a de que a alvenaria contida em um pórtico tenha contribuição para a rigidez do conjunto, ao qual é dado o nome de pórtico preenchido. Essa condição pode ter influência para que a edificação não sofra deformações indesejadas.

Desprezar esse enrijecimento pode ser favorável à segurança, pois resulta em uma margem adicional de segurança em relação à indeslocabilidade horizontal da estrutura. Entretanto, como afirma Madia (2012), podem haver casos em que ignorar este efeito leva a situações estruturais não regulares. Para exemplificar, o autor cita a hipótese de uma edificação retangular em que três faces possuem fechamento de painel de vidro e a face restante de painel de alvenaria sem abertura, como ilustra a Figura 1. Neste caso, o pórtico preenchido por alvenaria apresenta maior rigidez que os demais, o que faz com que surja uma força de torção maior do que a esperada caso não se considere o painel de contraventamento, sendo um efeito contra a segurança do projeto.

Figura 1 - Exemplo de efeito desfavorável de um pórtico preenchido



Fonte: Madia (2012, p. 16)

Muitos estudos têm sido feitos nas últimas décadas, tanto de caráter experimental, através de modelos reduzidos, como de simulações numéricas para determinar o comportamento dos pórticos preenchidos. Todos são unânimes em afirmar que este conjunto traz, significativamente, um ganho de rigidez, entretanto, não há ainda uma teoria que descreva de maneira satisfatória como se dá essa interação a ponto de ter aplicação direta.

As pesquisas têm demonstrado que ao serem aplicados carregamentos em uma lateral de um pórtico preenchido forma-se uma diagonal comprimida na alvenaria. Esse elemento vai do canto superior adjacente à força aplicada ao canto inferior oposto, enquanto a diagonal oposta está tracionada. Dessa forma, para simplificação é adotado o conceito de diagonal equivalente, em que o painel de alvenaria é substituído por uma barra com propriedades equivalentes ao do painel.

Diante disso, o presente trabalho visa analisar o comportamento de um pórtico preenchido quanto à distribuição de tensões no painel de alvenaria e avaliar quais das metodologias apresentadas pela bibliografia representam melhor a sua influência no conjunto.

## 1.2 Justificativa

Na nossa sociedade, a maior concentração de empregos e oportunidades se dá nos grandes centros urbanos, o que atrai para eles um grande número de pessoas,

e, conseqüentemente, novos empreendimentos. Isso leva à escassez de espaço nesses grandes centros, o que faz com que os terrenos disponíveis sejam muito valorizados e a aquisição de novas propriedades se torne inviável. Dessa forma, atualmente o setor imobiliário procura atingir o maior número de pessoas, no intuito de gerar maiores lucros, pelo aproveitamento máximo do espaço através da verticalização urbana, que consiste na construção de edifícios altos.

No entanto, edifícios mais altos levam a estruturas mais esbeltas e sob maior ação do vento. Isso faz com que o deslocamento horizontal causado por carregamentos laterais seja grande no topo da edificação. Esse deslocamento pode levar a distorção excessiva e causar o aparecimento de fissuras no edifício, até a perda de estabilidade da estrutura. Por esse motivo, a NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece limites máximos para esse deslocamento. Além disso, a mesma norma estabelece que quando os esforços causados pelo deslocamento, os chamados efeitos de 2ª ordem, representarem um acréscimo superior a 10% na solicitação da estrutura, esses efeitos devem ser considerados no dimensionamento da estrutura.

Para tanto, é comum a adoção de sistemas de contraventamento, como paredes estruturais na caixa do elevador, o que forma um núcleo rígido, mas que podem causar esforços de torção, ou também o aumento na seção das vigas e pilares para aumentar a rigidez dos pórticos. Essas soluções, porém, podem levar a custos muito elevados.

Usualmente, quando uma estrutura é dimensionada, considera-se que os pórticos que a constituem são vazios e que a alvenaria ali contida para a proteção do ambiente interno é apenas um carregamento, não apresentando qualquer influência estrutural.

Estudos como os de Polyakov (1960), Benjamin (1968), Mainstone e Weeks (1970) e Alva *et al.* (2015), têm sido feitos para determinar a influência da alvenaria interna aos pórticos no deslocamento horizontal deste. Tais estudos são importantes para a busca por métodos mais eficazes e baratos de se aumentar a estabilidade lateral de uma estrutura, e introduziram à engenharia o conceito de pórtico preenchido. Esse conceito consiste na consideração da rigidez dos painéis de alvenaria, que aumentam a resistência do conjunto pórtico-painel, permitindo a diminuição na seção de pilares e vigas, levando a estruturas mais leves e econômicas.

Apesar do consenso de que há vantagens na consideração dos pórticos preenchidos, ainda há relutância no seu uso, principalmente porque não existe uma

ferramenta que torne a sua aplicação prática e confiável. O estudo nessa área ainda está se desenvolvendo, pois os métodos existentes para a consideração dos painéis de alvenaria conferem resultados muito distintos, acabando, algumas vezes, por superestimar ou mesmo subestimar os seus efeitos.

Assim, o presente trabalho justifica-se por analisar como os painéis de alvenaria influenciam no comportamento de uma estrutura, no intuito de constatar como estas devem ser consideradas no desenvolvimento do projeto de um edifício.

### **1.3 Objetivos**

O principal objetivo deste trabalho é verificar a influência que os painéis de alvenaria têm no enrijecimento da estrutura de concreto armado de uma edificação.

Os objetivos específicos são os que seguem:

- a) Modelar um pórtico de concreto armado preenchido por alvenaria de módulo de elasticidade 450 MPa para um caso e 900 MPa para outro através do Método dos Elementos finitos no software Ansys, aplicando uma força lateral no plano da parede e comparar os resultados obtidos;
- b) Modelar, também no Ansys, o mesmo pórtico com as diagonais equivalentes sugeridas pela bibliografia;
- c) Modelar o pórtico com as diagonais equivalentes sugeridas na bibliografia no software Ftool;
- d) Comparar os resultados obtidos nos itens a), b) e c) para verificar qual metodologia conduz a resultados mais representativos da situação com painel inteiro.

## 2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Ao longo da história, o homem desenvolveu e aprimorou técnicas de construção que se adaptassem melhor as suas necessidades e recursos. Algumas dessas técnicas utilizam elementos verticais e horizontais, os chamados pórticos, para suportar as cargas das edificações. Desse modo a alvenaria possui apenas a função de vedação, sendo que, atualmente, ela é executada principalmente com blocos cerâmicos e/ou de concreto unidos por argamassa.

O sistema construtivo de concreto armado é resultado dessa busca por melhores técnicas construtivas. Araújo (2014) afirma que entre as vantagens deste tipo de estrutura estão a facilidade de execução de diversas formas, resistência ao desgaste mecânico e a pouca necessidade de manutenção ou conservação, o que o torna atraente economicamente. Esses são alguns dos motivos que fazem deste o sistema construtivo hegemônico no Brasil (Santos, 2008).

Porém, nas últimas décadas estudiosos como Mainstone (1971) e Silva (2014) têm se dedicado a qualificar e quantificar os efeitos estruturais que os painéis de alvenaria podem ter no interior de um pórtico, conjunto que passou a ser chamado de pórtico preenchido.

### 2.1 Desenvolvimento histórico

Durante uma tempestade com rajadas de vento ultrapassando 145km/h, no Edifício Empire State houve o início de fissuras em vários painéis de alvenaria dos andares 29 e 42. Nesse arranha-céu, construído em estrutura de aço com 102 andares, na cidade de Nova York, foi possível observar através de extensômetros fixados nos pilares que os pórticos não sofreram deformações antes do aparecimento de fissuras nos painéis, mesmo sob forte vento. Segundo Alvarenga (2002), esse fato contribuiu para o desenvolvimento do estudo de alvenaria de preenchimento de pórticos sob carregamentos laterais.

A explicação é que a alta rigidez dos painéis de alvenaria evitou distorções nos pórticos de aço. O que é corroborado pelo fato de que quando os painéis foram solicitados além de sua capacidade de fissuração, o conjunto passou a perder rigidez e os extensômetros começaram a registrar deformações no pórtico de aço, o que

significa que, a partir de então, este começou a participar na resistência à ação do vento.

Polyakov (1956, apud ALVARENGA, 2002, p. 14) publicou resultados de ensaios de pórticos preenchidos em modelos reduzidos realizados entre 1948 e 1953, com o intuito de avaliar a resistência à tração e ao cisalhamento da alvenaria de preenchimento.

Para determinar a resistência de pórticos com preenchimentos, foram realizados 65 ensaios em escala maior. Trinta e dois ensaios foram realizados em pórticos quadrados de 1200 mm e os demais, em pórticos retangulares com comprimento e altura de 3000 mm e 2000 mm, respectivamente. Foram investigados efeitos como: tipos de blocos, traços da argamassa, métodos de aplicação de cargas (monotônico ou cíclico) e painéis com aberturas. Para avaliação deste último efeito, foram utilizados oito protótipos. (ALVARENGA, 2002, p. 14).

Durante a mesma época, Thomas (1953) e Wood (1958) também realizaram ensaios experimentais com pórticos preenchidos. “Whitney et al. (1955) publicaram uma pesquisa tratando da resistência das estruturas, pórticos preenchidos, frente a esforços proporcionados por explosões atômicas” (SILVA, 2014, p. 17). Benjamin e Williams (1957) e Wood (1958) analisaram esses estudos e foram unânimes em afirmar que a presença dos painéis de alvenaria aumenta a rigidez dos pórticos.

O primeiro trabalho sobre pórticos preenchidos publicado no Brasil foi feito por Braguim (1989), como cita Madia (2012). Nesse trabalho foram realizadas análises experimentais caracterizando as ligações semi-rígidas dos pórticos de aço e verificando a influência dessas ligações no comportamento dos pórticos preenchidos. Posteriormente, Braguim (1993, apud MADIA, 2012, p. 26) realizou uma análise numérica de pórticos de quatro pavimentos, combinando os tipos de ligações dos elementos dos pórticos e a inclusão da alvenaria de preenchimento, através do método da barra diagonal equivalente. O autor concluiu que a presença de alvenaria enrijece consideravelmente a estrutura, quase que independentemente do tipo de ligação viga-pilar.

Alvarenga (2002) realizou ensaios experimentais com pórticos de aço em escala real preenchidos com blocos de concreto celular autoclavado. Além disso, também realizou modelagens numéricas a fim de observar qual a melhor relação altura/comprimento dos pórticos para a análise de pórticos preenchidos.

Em sua dissertação, Madia (2012) analisou a contribuição dos painéis de alvenaria em um edifício real de 22 pavimentos, utilizando o método da diagonal equivalente. Ele comparou três situações para a estrutura: pórtico sem diagonal equivalente, que obteve deslocamento horizontal no topo da estrutura de 2,39cm; pórtico com diagonal equivalente, mas com seções de pilares reduzidas, que obteve deslocamento de 2,03cm e, ainda, pórtico com seções de pilares reduzidas, mas sem a diagonal de contraventamento, que apresentou um deslocamento de 2,65cm, comprovando o aumento da rigidez provocado pela presença da alvenaria

Silva (2014) analisou numericamente a influência na estabilidade de pórticos de concreto armado preenchidos por alvenaria de fatores como a dimensão e posição de aberturas nos painéis, utilizando tanto o método da diagonal equivalente quanto o Método dos Elementos Finitos (MEF). Ela concluiu que a presença de aberturas no lado da aplicação da força horizontal (no canto superior comprimido) resulta em deslocamento maior do que quando a abertura está posicionada no lado oposto.

## **2.2 Pórtico preenchido**

No dimensionamento de uma estrutura aporricada, como é o caso das estruturas de concreto armado, é comum considerar os painéis de alvenaria simplesmente como elementos de vedação, sem qualquer contribuição estrutural. Carvalhido (2009, p. 3) ressalta que “a prática de projecto de negligenciar os painéis de enchimento na formulação do modelo numérico leva a uma diferença relevante na previsão da rigidez lateral, resistência e ductilidade”.

Pórticos preenchidos por alvenaria apresentam comportamento diferente de pórticos “vazios”, ou sem preenchimento. Silva (2011) afirma que os painéis de alvenaria conferem ao pórtico que estão inseridos um aumento na rigidez, enquanto este, reciprocamente, aumenta a ductilidade do painel.

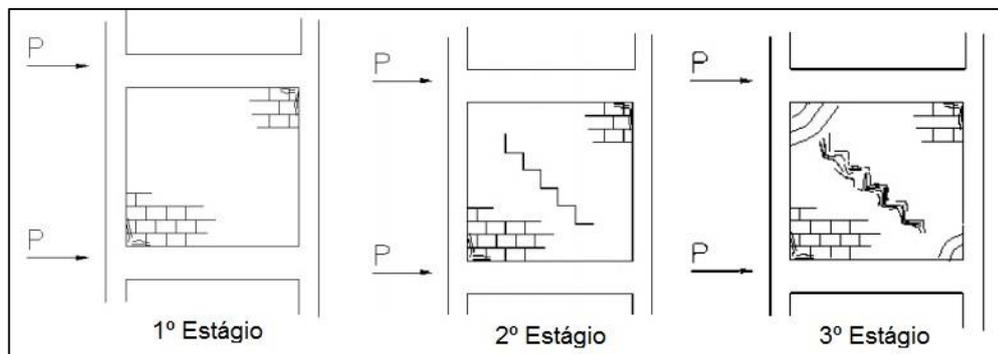
Polyakov (1960) descreveu o comportamento dos pórticos preenchidos submetidos a carregamentos laterais em três estágios: no primeiro, a alvenaria e o pórtico apresentam comportamento monolítico, sem aparecimento de fissuras. O fim deste estágio é caracterizado pelo aparecimento das primeiras fissuras, na interface pórtico-painel nos cantos da diagonal tracionada.

No segundo estágio, há um alongamento da diagonal tracionada e encurtamento da diagonal comprimida, ocasionando o aparecimento de fissuras

escalonadas que acompanham as juntas de argamassa de assentamento ao longo desta diagonal.

Finalmente, no terceiro estágio, a estruturas ainda é capaz de resistir a acréscimos de carga, apesar do aparecimento de fissuras, que aumenta juntamente com o carregamento. O término desse estágio se dá quando é atingido o estado limite último da estrutura. A Figura 2 ilustra os estágios descritos.

Figura 2 - Términos dos estágios



Fonte: Adaptado de Santos (2007, p. 24 e 25)

### 2.3 Painéis de alvenaria

A alvenaria é um dos elementos de construção mais antigos utilizados pela humanidade. Inicialmente, ela era construída de barro ou da sobreposição de pedras, como o famoso Muro das Lamentações (Figura 3), com ou sem ligante entre elas. Atualmente, com a descoberta de novos materiais e desenvolvimento da tecnologia, a alvenaria pode ser feita com o uso de blocos e tijolos cerâmicos, de concreto, de solo-cimento, entre outros materiais.

Figura 3 – Muro das Lamentações



Fonte: Infoescola (2010, não paginado)

Os painéis de alvenaria podem ser utilizados tanto como elementos estruturais ou de vedação. No primeiro caso, as paredes são autoportantes, o que significa que elas sustentam toda a edificação, dispensando a utilização de vigas e pilares, exemplo disso é o sistema construtivo de alvenaria estrutural, ilustrado na Figura 4. Já no caso da alvenaria de vedação, sua função é a de dividir e proteger das intempéries o ambiente interno de uma edificação, de forma a promover a estanqueidade, isolamento e conforto térmico e acústico (MEDEIROS; FRANCO, 1999). Como não possuem função estrutural, esses últimos painéis frequentemente são considerados apenas como carga a ser suportada pela estrutura.

Figura 4 – Edificação em alvenaria estrutural



Fonte: Próprio autor

De acordo com Madia (2012), os painéis de alvenaria, apesar de possuírem baixa resistência à tração, apresentam considerável resistência à compressão e uma grande rigidez. Dessa forma, podem ser utilizados como elementos comprimidos em conjunto com as vigas e pilares, servindo de contraventamento para o aumento da rigidez de uma estrutura. Este mesmo autor explica ainda que a presença da alvenaria pode alterar a distribuição dos esforços, como aqueles causados pela ação do vento, o que torna importante a consideração dos efeitos causados por esses elementos em uma edificação.

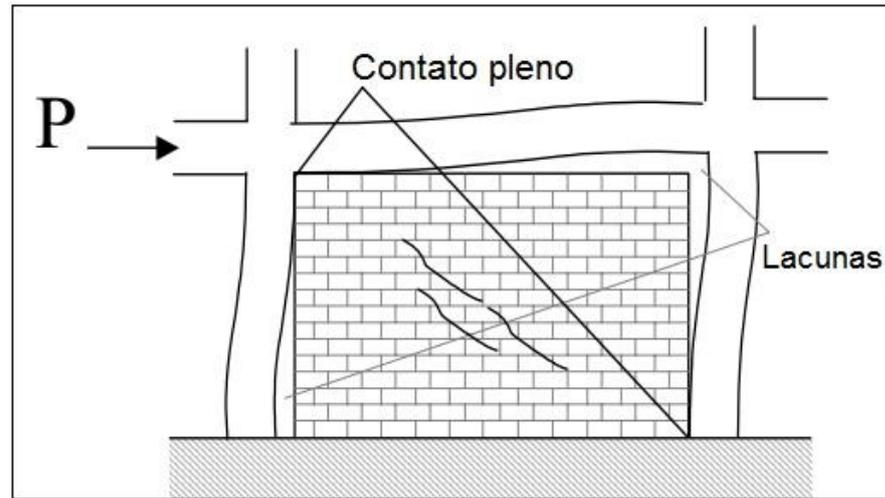
### **2.3.1 Ligação dos painéis aos pórticos**

Para que a alvenaria presente no interior de um pórtico não esteja sob o efeito de forças além do seu próprio peso e tenha apenas a função de vedação é necessário que ela não esteja solidarizada da estrutura. Al-Chaar (2002) classifica esse tipo de preenchimento como isolado. Neste caso, é necessário que a lacuna entre o painel e o pórtico em cima e dos lados seja maior do que a possível deformação do pórtico. Caso contrário, quando existe o contato entre a alvenaria e a estrutura, o preenchimento é considerado “regular” e participa na resistência dos esforços laterais.

Dessa forma, nota-se como a ligação entre o painel e o pórtico influencia no comportamento do conjunto, pois é ela que realiza a transmissão de carga entre estes elementos. Madia (2012, p. 34) salienta que “[...] a principal dificuldade para avaliar o desempenho de uma estrutura preenchida é determinar o tipo de interação entre o enchimento e o pórtico [...]”.

Alvarenga (2002) constatou que para baixos carregamentos a contribuição do painel é máximo, já que há pleno contato na interface pórtico-painel. Essa contribuição diminui com o aumento do carregamento, pois o pórtico passa a sofrer uma deformação que não é completamente acompanhada pelo preenchimento, o que causa descolamento parcial da interface, como pode ser visto na Figura 5, onde P representa uma força horizontal aplicada.

Figura 5 - Deformação do pórtico preenchido

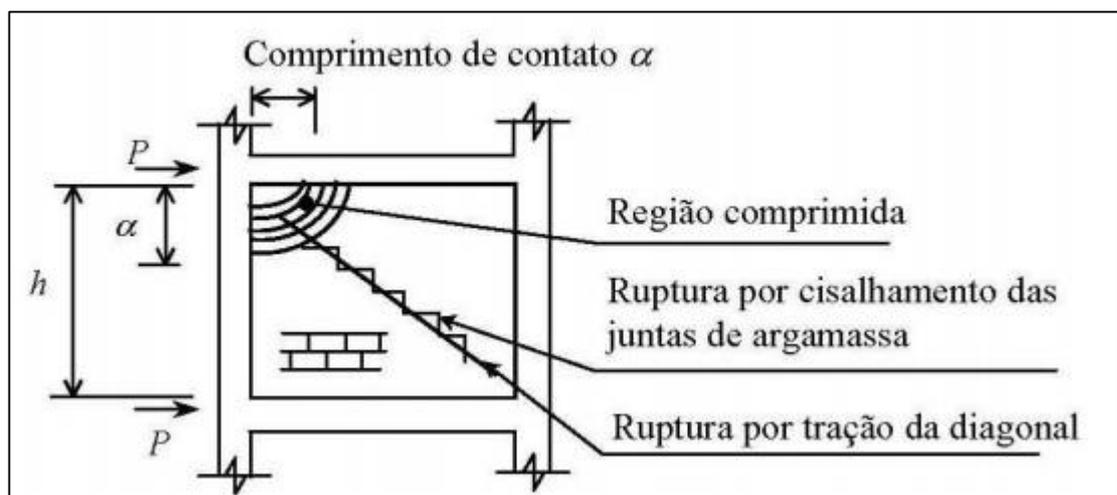


Fonte: Al-Chaar (2002, p. 16)

### 2.3.2 Fissuração dos painéis de alvenaria

Flanagan e Bennet (2001) esclarecem que, quando os pórticos preenchidos são solicitados até seus limites, a alvenaria de preenchimento possui três modos de falha: a fissuração por cisalhamento entre o bloco e a argamassa de assentamento, fissuração por compressão nos cantos comprimidos e fissuração por tração na direção da diagonal comprimida. Os modos de fissuração podem ser observados na Figura 6.

Figura 6 - Modos de fissuração da alvenaria



Fonte: Alvarenga (2002, p. 22)

O autor ainda explica que a fissuração da diagonal ocorre quando os estados limites de serviço são atingidos e que a força necessária para que isso ocorra é

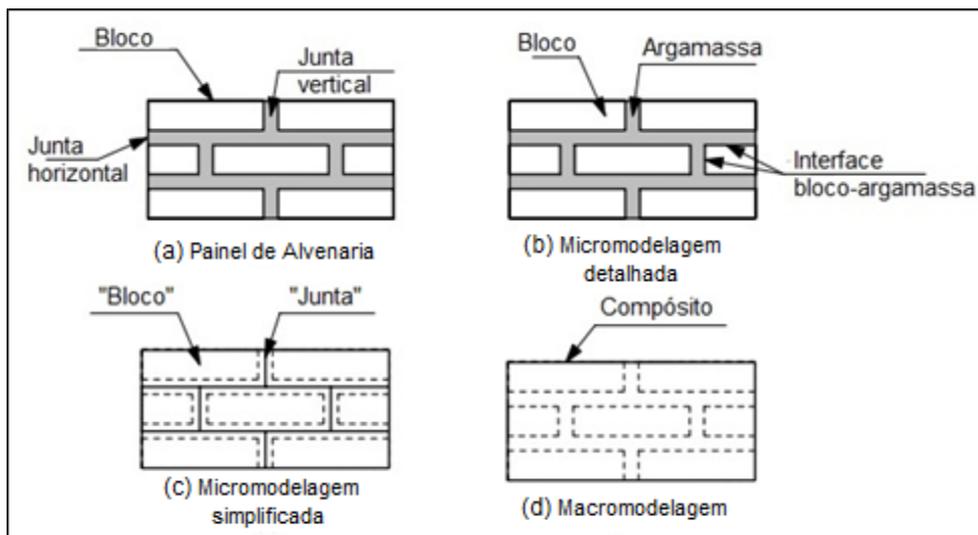
relacionada com as dimensões do painel. Ele salienta que para painéis muito largos, a força de fissuração da diagonal pode ser maior do que a de compressão dos cantos.

## 2.4 Modelagem

Os pórticos preenchidos submetidos a carregamentos laterais consistem em um problema estaticamente indeterminado, pois a distribuição de tensões entre o pórtico e o painel se dá de forma interativa, como explica Silva (2014). É necessário verificar qual o comportamento dos painéis de alvenaria junto aos pórticos para desenvolver aproximações do seu uso.

Para isso podem ser realizadas pesquisas teóricas, que utilizam técnicas numéricas para analisar numericamente as estruturas através de softwares. De acordo com Crisafulli e Carr (2007), essas técnicas podem ser classificadas como de micromodelagem e de macromodelagem. A primeira envolve modelos matemáticos em que a estrutura é discretizada em um grande número de elementos, para levar em conta os efeitos locais da estrutura de forma mais detalhada, enquanto que a segunda inclui modelos simplificados, baseados no entendimento do comportamento físico dos pórticos preenchidos. Tais conceitos são exemplificados na Figura 7.

Figura 7 - Formas de modelagem



Fonte: Traduzido de Lourenço (1996, p. 12)

Lourenço (1996) ainda divide a modelagem de um painel de alvenaria (Figura 7-a) em: micromodelagem detalhada (Figura 7-b), em que os blocos e a argamassa das juntas são representados por elementos contínuos, enquanto a interface entre

eles é representada por elementos descontínuos; micromodelagem simplificada (Figura 7-c), onde os blocos expandidos são representados por elementos contínuos, ao passo que o comportamento da argamassa das juntas e a interface bloco-argamassa é aglomerada em elementos descontínuos; e, finalmente, macromodelagem (Figura 7-d), que considera todo o material de alvenaria como um único elemento homogêneo e anisotrópico.

### **2.4.1 Macromodelagem**

De acordo com Teewuen (2009), com a macromodelagem é possível prever comportamentos globais dos painéis de alvenaria, como a sua rigidez e as cargas de ruptura, porém, não são considerados todos os possíveis modos de falha de local. Esse tipo de modelagem é a mais comumente adotada, por ser mais prática e de simples aplicação quando comparada à micromodelagem, necessitando de menos tempo e capacidade de processamento dos computadores. O autor relata que esse método ainda pode ser empregado através da teoria da plasticidade, do conceito de pórtico equivalente e do conceito de diagonal equivalente, sendo este último o mais simples e mais utilizado.

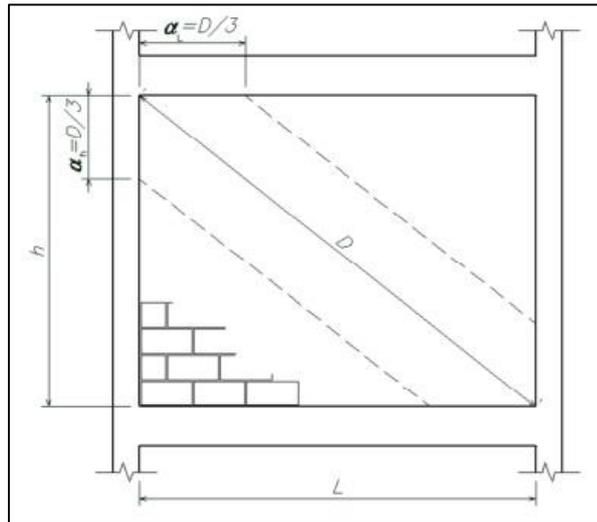
#### **2.4.1.1 Barra diagonal equivalente**

O método da barra diagonal equivalente consiste em substituir a alvenaria de preenchimento em um pórtico por uma barra fictícia de contraventamento com as propriedades do painel em questão para que a estrutura tenha um comportamento semelhante ao do pórtico preenchido.

O conceito da barra diagonal equivalente foi introduzido por POLYAKOV (1956) e desenvolvido por HOLMES (1961) e, posteriormente, refinado por STAFFORD-SMITH (1962, 1966, 1967a, 1967b) e STAFFORD-SMITH e CARTER (1969), MAINSTONE (1971) e LIAUW e LEE (1977) (ALVARENGA, 2002, p. 16).

Holmes (1961) propôs que essa diagonal tenha a mesma espessura e módulo de elasticidade do material de enchimento, e que os comprimentos de contato com a viga e a coluna adjacente sejam de um terço do comprimento da diagonal, como mostra a Figura 8.

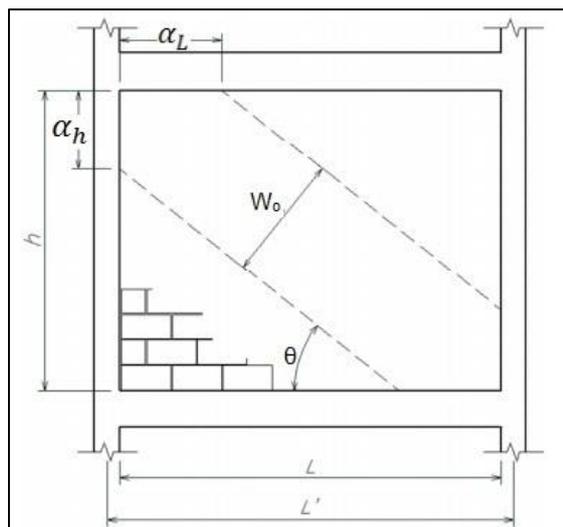
Figura 8- Diagonal equivalente segundo Holmes (1961)



Fonte: Madia (2012, p. 48)

Também utilizando o conceito de diagonal equivalente, Smith (1962) estudou a rigidez lateral de pórticos preenchidos. Este autor concluiu que a largura da diagonal depende do comprimento de contato (Figura 9) e que este, por sua vez, depende da rigidez relativa entre pórtico e painel. A norma canadense CSA S304.1 (2004) utiliza este modelo.

Figura 9 - Diagonal equivalente segundo Smith (1962)



Fonte: Adaptado de Madia (2012, p. 49)

Os comprimentos de contato são definidos segundo as Equações 1 e 2, a seguir:

$$\frac{\alpha_h}{L'} = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\lambda_h L'} \quad \dots(1)$$

$$\frac{\alpha_L}{L'} = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\lambda_L L'} \quad \dots(2)$$

Sendo que  $\alpha_h$  é o comprimento de contato entre o painel e o pilar;  $\alpha_L$  é o comprimento de contato entre o painel e a viga;  $L'$  é o comprimento entre eixos de pilares; e  $\lambda_h L'$  e  $\lambda_L L'$  são os parâmetros de rigidez relativa, dados, respectivamente, pelas Equações 3 e 4:

$$\lambda_h L' = L' \sqrt[4]{\frac{E_{\text{painel}} t}{4E_p I_p h} \text{sen}(2\theta)} \quad \dots(3)$$

$$\lambda_L L' = L' \sqrt[4]{\frac{E_{\text{painel}} t}{4E_p I_v L} \text{sen}(2\theta)} \quad \dots(4)$$

Em que  $E_p$  é o módulo de elasticidade do material do pórtico;  $E_{\text{painel}}$  é o módulo de elasticidade do painel de alvenaria;  $I_p$  é o momento de inércia do pilar;  $I_v$  é o momento de inércia da viga;  $t$  é a espessura do painel;  $h$  é a altura do painel;  $\theta = \arctg(h/L)$  é a inclinação da diagonal com a horizontal e  $L$  é o comprimento do painel.

Dessa forma, a largura da diagonal equivalente pode ser obtida através da Equação 5:

$$w_0 = \sqrt{\alpha_h^2 + \alpha_L^2} \quad \dots(5)$$

A FEMA 356 sugere que a rigidez proporcionada pelos painéis de preenchimento é representada pelo modelo de diagonal equivalente baseado nos trabalhos de Mainstone e Weeks (1970) e Mainstone (1971). Nesse modelo, a largura da diagonal é dada pela Equação 6:

$$a = 0,175(\lambda_1 h_{\text{col}})^{-0,4} r_{\text{inf}} \quad \dots(6)$$

Onde  $\lambda_1$  é calculado com a Equação 3;  $h_{\text{col}}$  é a altura dos pilares medida entre os eixos das vigas e  $r_{\text{inf}}$  é o comprimento da diagonal.

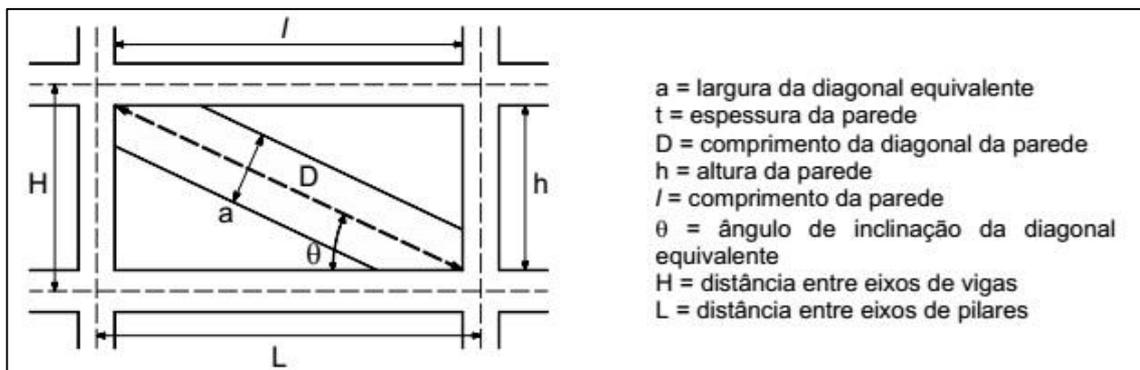
$$\lambda_1 = \sqrt[4]{\frac{E_{\text{painel}} t}{4E_p I_p h} \text{sen}(2\theta)} \quad \dots(7)$$

Na Nova Zelândia, a NZS 4230 (SNZ, 2004) afirma que a alvenaria de preenchimento modifica o comportamento estrutural do pórtico preenchido e, portanto, é necessário considerar a sua influência no dimensionamento da estrutura. Ela ainda

recomenda que a largura da diagonal equivalente tenha um quarto de seu comprimento.

Além dessas considerações, muitos outros pesquisadores desenvolveram equações para definir a largura da diagonal equivalente. Silva (2014) apresenta um quadro resumido com algumas das equações encontradas na bibliografia, e este pode ser conferido na Tabela 1.

Figura 10 - Parâmetros para cálculo da diagonal equivalente



Fonte: Silva (2014, p. 33)

Tabela 1 - Equações para determinação da diagonal equivalente

Autores	Expressões	
MAINSTONE e WEEKS (1970) e MAINSTONE (1974)	$a = 0,175 \cdot (\lambda_{Ht})^{-0,4} \cdot D$	
LIAUW e KWAN (1984)	$a = \frac{0,95 \cdot \text{sen}(2\theta)}{2 \cdot \sqrt{\lambda_{Ht}}} \cdot D$	
DECANINI e FANTIN (1987)	Para painéis não fissurados: $\lambda_{Ht} \leq 7,85$ : $a = \left( 0,085 + \frac{0,748}{\lambda_{Ht}} \right) D$ $\lambda_{Ht} > 7,85$ : $a = \left( 0,130 + \frac{0,393}{\lambda_{Ht}} \right) D$	Para painéis fissurados: $\lambda_{Ht} \leq 7,85$ : $a = \left( 0,010 + \frac{0,707}{\lambda_{Ht}} \right) D$ $\lambda_{Ht} > 7,85$ : $a = \left( 0,040 + \frac{0,470}{\lambda_{Ht}} \right) D$
PAULAY e PRIESTLEY (1992)	$a = \frac{D}{4}$	
DURRANI e LUO (1994)	$a = \gamma \cdot \text{sen}(2\theta) \cdot D$ $\gamma = 0,32 \cdot \sqrt{\text{sen}(2\theta)} \cdot \left( \frac{H^4 \cdot E \cdot t}{m \cdot E_p \cdot I_p \cdot h} \right)^{-0,1}$	$m = 6 \left( 1 + \frac{6 \cdot E_v \cdot I_v \cdot H}{\pi \cdot E_p \cdot I_p \cdot L} \right)$ $E_v$ = módulo de elasticidade do material da viga; $I_v$ = momento de inércia à flexão da viga.
CHRYSOSTOMOU e ASTERIS (2012)	$a = 0,270 \cdot (\lambda_{Ht})^{-0,4} \cdot D$	

Fonte: Silva (2014, p. 34)

### 2.5.2 Micromodelagem

Diferente da macromodelagem, “[...]na micromodelagem, as propriedades dos materiais dos blocos e argamassa, como módulo de deformação, coeficiente de Poisson e, opcionalmente, as propriedades inelásticas, são definidas individualmente” (ALVARENGA, 2002, p. 131). Por esse motivo, esse tipo de modelagem leva a comportamentos mais próximos dos reais do que os macromodelos.

Lourenço et al (1998, apud SILVA, 2014, p. 28) observa que, para este tipo de modelagem, a utilização do Método dos Elementos Finitos tem mostrado ser eficiente na investigação das mais variadas situações. Teewuen (2009) cita que a primeira abordagem de estudo de pórticos preenchidos utilizando o MEF foi sugerida por Mallick e Severn (1967). Eles introduziram uma técnica iterativa que leva em conta a separação e o deslizamento na interface pórtico-painel.

Esse método foi refinado por Mallick e Garg (1971) e Barua e Mallick (1977), levando em conta a deformação axial do pórtico. Os resultados para este método foram compatíveis com análises experimentais com pórticos de relação altura/vão menores do que dois.

Mais recentemente, Alvarenga (2002) fez uma estudo teórico-experimental de estruturas de aço com pórticos preenchidos e concluiu que o modelo numérico adotado mostrou-se adequado para a análise de pórticos sem aberturas. Ghosh e Amde (2002) compararam os resultados de sua modelagem numérica com obtidos por Riddington (1984) e os resultados coincidiram, principalmente para baixas cargas.

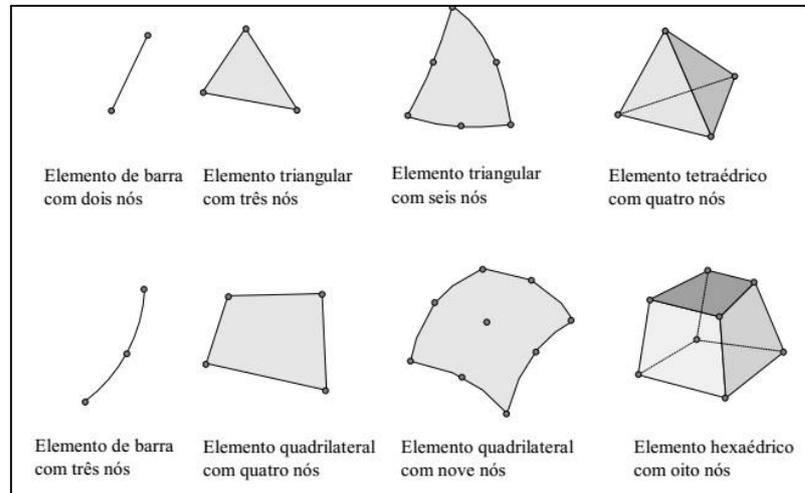
### 2.5.3 Método dos Elementos Finitos

O MEF surgiu em 1955 a partir da evolução da análise matricial de modelos reticulados, devido a necessidade de projetar estruturas de modelos contínuos, como aborda Soriano e Lima (2003). Sua primeira utilização foi na análise de distribuição de tensões em chapas de asas de avião.

Tanaka (2011) salienta que este método é uma ferramenta numérica utilizada na solução aproximada de equações diferenciais. Segundo Souza (2003), o MEF consiste em dividir o meio contínuo de estudo em partes menores de geometria mais simples. Cada uma dessas partes é denominada “elemento”, possui uma geometria definida, como ilustra a Figura 11, de dimensões finitas, e a sua quantidade é finita,

sendo que estes são ligados uns aos outros através de nós. A divisão do problema em elementos menores é um processo conhecido como discretização.

Figura 11 - Diferentes geometrias dos elementos finitos



Fonte: Souza (2003, p. 2)

Marinho (2002) ainda explica que para cada um desses elementos é estabelecido um comportamento aproximado, de forma que as incógnitas do problema em qualquer ponto possam ser definidas em função das mesmas incógnitas nos pontos nodais do elemento. Com a soma das contribuições de cada elemento, obtém-se um sistema total de equações, do qual a solução fornece os valores das incógnitas nos pontos nodais.

### 2.5.3.1 O Software Ansys e os elementos finitos

A aplicação do MEF pode ser muito complexa, principalmente quando se utilizam muitos elementos em uma modelagem. Um maior número de elementos finitos fornece um resultado mais preciso, mas também exige um trabalho significativamente maior, já que mais cálculos devem ser realizados. Portanto, esse método geralmente é empregado utilizando softwares de análise numérica.

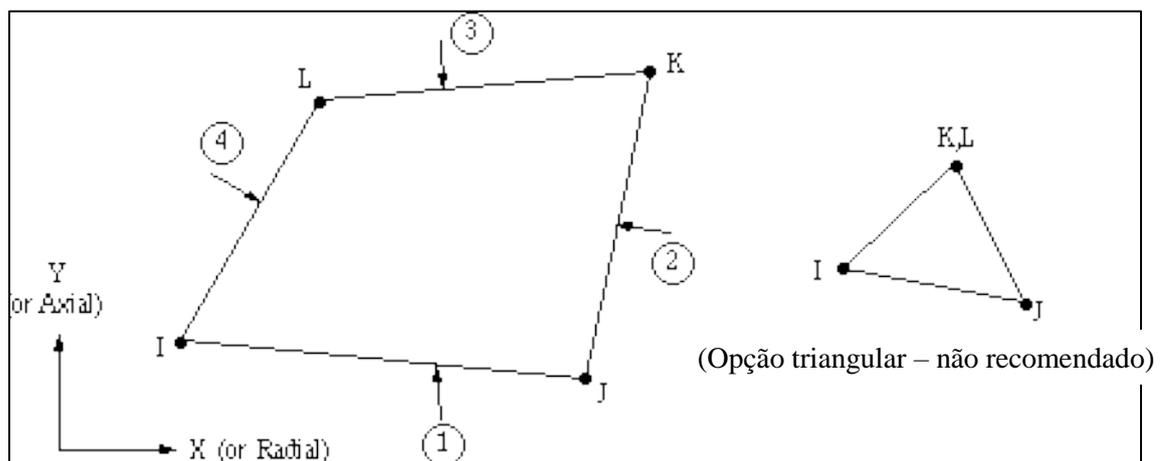
Um dos softwares utilizados para esse tipo de análise é o Ansys, que oferece suporte para áreas de pesquisa como estruturas, elétrica e fluidos. Através dele é possível a simulação de diversos problemas com a modelagem das geometrias necessárias e inserção das propriedades dos materiais utilizados.

Para a aplicação do MEF, é necessário definir os tipos de elementos a serem adotados. No caso de estruturas em que duas dimensões são preponderantes, como

lajes, barragens e paredes, os elementos estão ligados entre si de forma contínua, portanto é necessário que o corpo contínuo seja subdividido em partes finitas, definindo a malha de elementos finitos a ser utilizada. Nessas situações pode se utilizar elementos planos.

O PLANE182 é um dos elementos planos que pode ser utilizado no Ansys, ilustrado na Figura 12. Este elemento possui quatro nós com dois graus de liberdade cada um, que correspondem aos deslocamentos dos nós nas direções X e Y. Para modelá-lo é necessário a inserção do valor de sua espessura, além das propriedades do material: módulo de elasticidade, coeficiente de dilatação térmica, peso específico e módulo de elasticidade transversal.

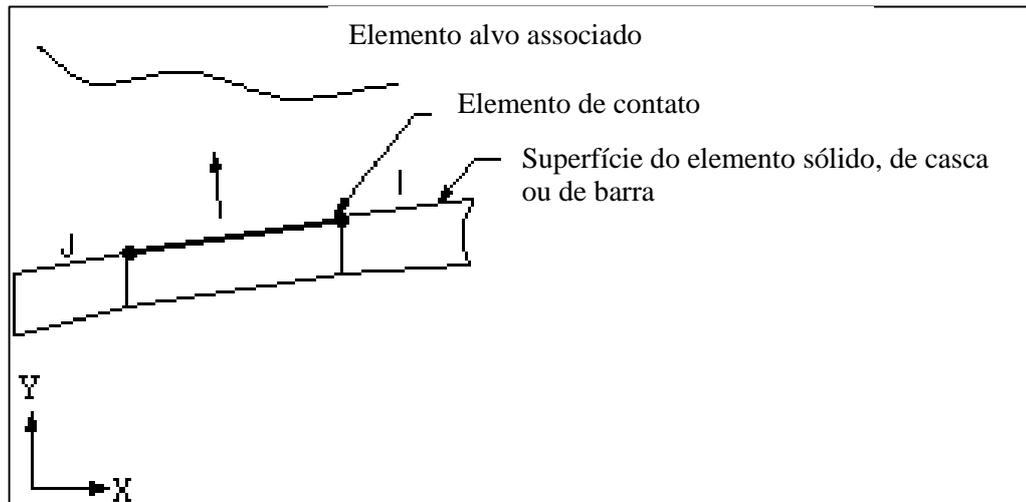
Figura 12 - Elemento plano PLANE182



Fonte: Ansys Academic Teaching na STU Bratislava (20--, não paginado)

Em algumas estruturas é comum que os esforços alterem as condições de contato que existem entre duas superfícies diferentes, como por exemplo o deslizamento de um sobre a outra ou mesmo o descolamento delas. Essas alterações são passíveis de ocorrerem na ligação entre o painel de alvenaria e os pilares e vigas de concreto armado. Para simular essas condições no Ansys é necessário utilizar elementos de contato. Um desses elementos disponíveis neste software é o CONTA171, Figura 13, que define a superfície de contato, que define o material mais flexível, no caso do exemplo anterior, a alvenaria.

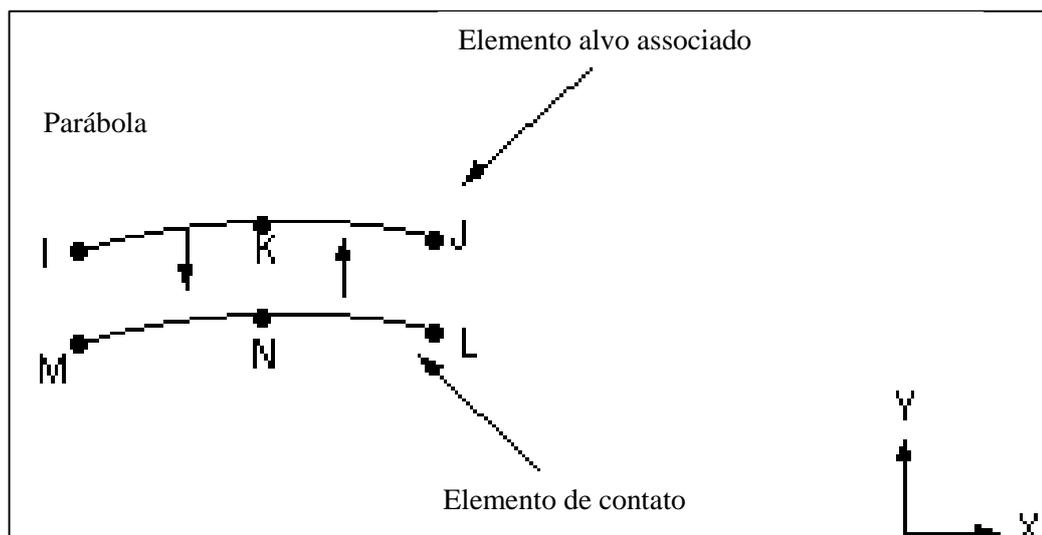
Figura 13 - Elemento de contato CONTA171



Fonte: Ansys Academic Teaching na STU Bratislava (20--, não paginado)

Juntamente com este, é necessário definir a superfície alvo, correspondente ao material mais rígido, no caso o concreto, e que deve ter as mesmas propriedades reais do elemento de contato. Para isso, pode ser utilizado o elemento TARGE169, ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Elemento alvo TARGE169



Fonte: Ansys Academic Teaching na STU Bratislava (20--, não paginado)

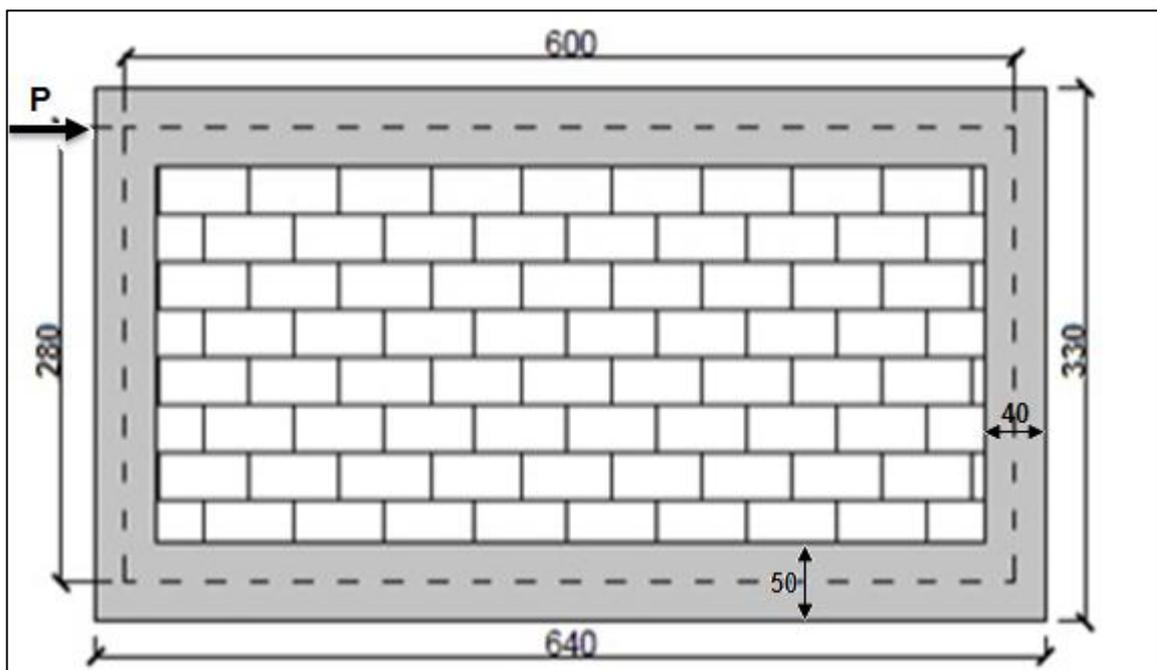
### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para a análise das tensões na alvenaria de preenchimento de um pórtico de concreto armado, estudo da diagonal equivalente formada nesse conjunto para posterior comparação entre métodos aplicados.

#### 3.1 Análise numérica através do MEF de um pórtico preenchido

O pórtico utilizado para este estudo está baseado no Modelo L1 utilizado por Silva (2014), que possui vão teórico de 6,00m, viga com altura de 50 cm e pilares com largura de 40cm, como ilustrado na Figura 15. A espessura desses elementos, assim como a da alvenaria é de 19cm.

Figura 15 - Pórtico preenchido de estudo



Fonte: Silva (2014, p. 44)

A carga P aplicada lateralmente ao pórtico é definida a partir do deslocamento horizontal máximo permitido pela NBR 6118 (ABNT, 2014), que é  $H/850$ , onde H é a altura do pórtico entre eixos de vigas. Para este caso, o deslocamento máximo é 3,29mm, causado por uma força de 62,48 kN, sendo a carga utilizada neste trabalho.

As propriedades adotadas para o concreto armado têm como base a NBR 6118 (2014). Os modelos foram analisados variando-se as propriedades da alvenaria de vedação. Segundo a NBR 15270-1 (2005), as resistências mínimas à compressão do bloco são 1,50 MPa e 3,0 MPa, para blocos com furo na horizontal e blocos com furo na vertical, respectivamente. Admitindo-se um fator de eficiência (resistência do prisma/resistência do bloco) igual a 0,50, as resistências à compressão do prisma ( $f_p$ ) para os modelos analisados ficam em 0,75 MPa e 1,50 MPa, respectivamente. O valor adotado para o coeficiente de Poisson, para as alvenarias de vedação, segue a recomendação da NBR 15812 (2010), que é 0,15.

Como simplificação, assumiu-se a alvenaria como material elástico-linear. O módulo de elasticidade longitudinal da alvenaria de blocos cerâmicos ( $E$ ) foi definido através da Equação 7, baseada na norma de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos NBR 15812 (2010).

$$E = 600x f_p \quad \dots(7)$$

As propriedades dos materiais utilizados para as análise encontram-se na Tabela 2.

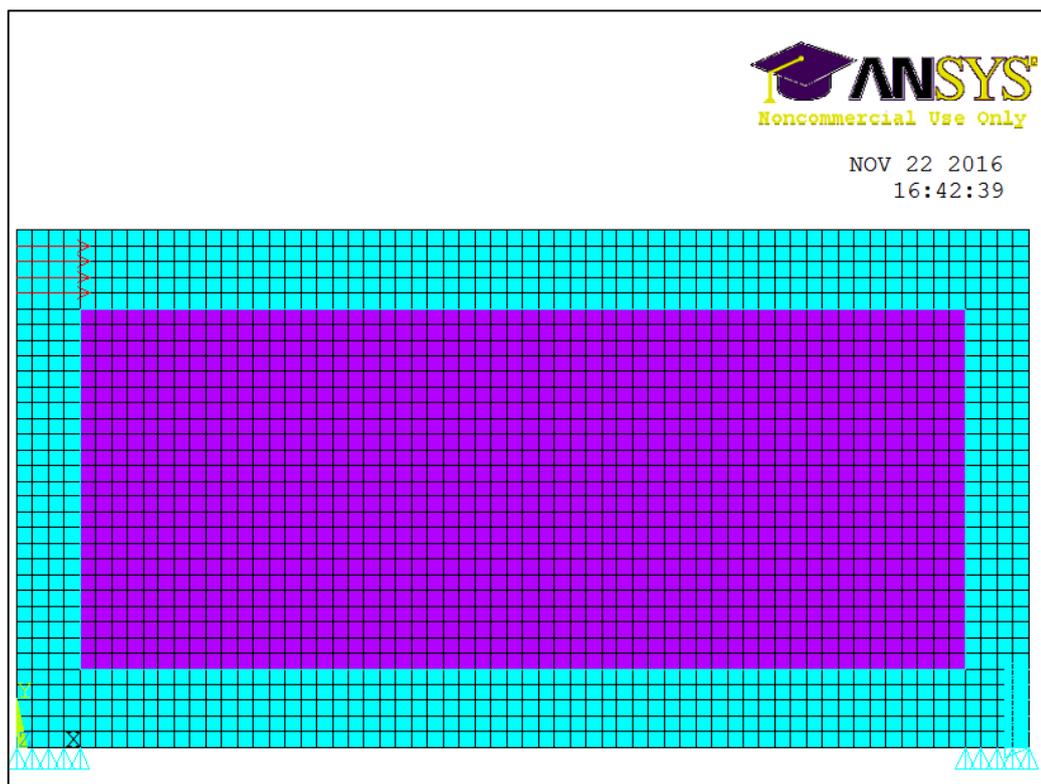
Tabela 2 - Propriedades dos materiais utilizados na modelagem

Material	Posição dos blocos de alvenaria	Módulo de elasticidade longitudinal (MPa)	Coeficiente de Poisson
Concreto armado	-	25000	0,20
Painel de alvenaria	Furos na horizontal	450	0,15
	Furos na vertical	900	0,15

Fonte: Próprio Autor

Esse pórtico foi modelado pelo Método dos Elementos Finitos no software Ansys versão 11, utilizando o elemento PLANE182 para o concreto e para a alvenaria, com uma malha de 10x10 cm, e o elemento CONTA171 para a interação do contato pórtico/painel, conforme Figura 16. Nesta primeira etapa, foram analisadas as tensões e deslocamentos que ocorrem no modelo de estudo, comparando os resultados para os dois módulos de elasticidade determinados.

Figura 16 – Malha de elementos finitos do pórtico preenchido



Fonte: Próprio Autor

### 3.2 Estudo da barra diagonal equivalente pelo MEF

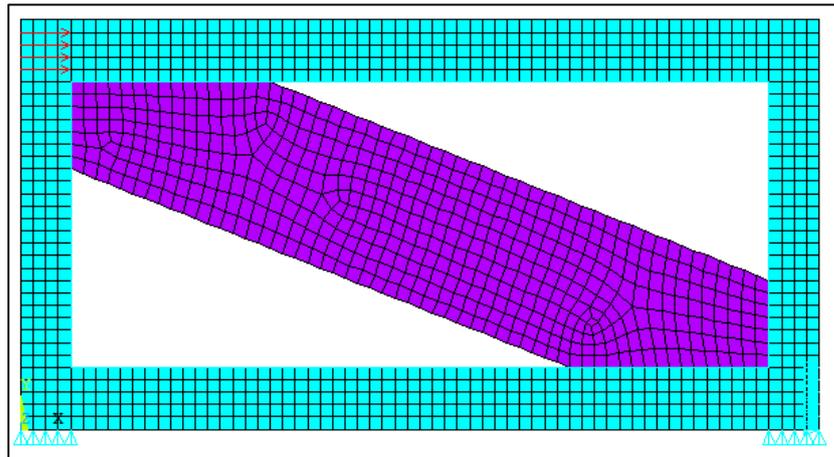
Em seguida foram modelados pórticos semelhantes ao anterior, com os mesmo elementos e propriedades, porém preenchidos com diagonais equivalentes, substituindo o painel, de larguras determinadas de acordo com as equações da Tabela 1. As dimensões utilizadas encontram-se na Tabela 3. A Figura 17 ilustra a malha utilizada para a análise pelo método dos elementos finitos.

Tabela 3 – Largura das diagonais equivalentes estudadas

	Largura da diagonal equivalente (m)	
	E = 450 MPa	E = 900 Mpa
Decani e Fantin (1987) - ã Fissurado	2,784	2,423
Decani e Fantin (1987) - Fissurado	2,206	1,864
Paulay e Priestley (1992)	1,513	1,513
Liaw e Kwan (1984)	1,431	1,312
Chrysostomou e Asteris (2012)	1,240	1,157
Durrani e Luo (1994)	0,963	0,898
Mainstone e Weeks (1974)	0,804	0,750

Fonte: Próprio Autor

Figura 17 – Malha de elementos finitos do pórtico com diagonal equivalente



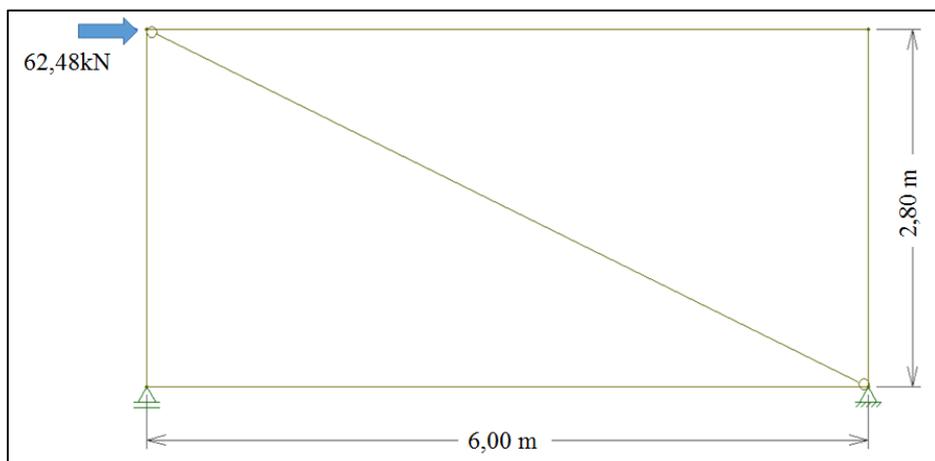
Fonte: Próprio Autor

Esta segunda etapa é análoga à primeira, pois foram realizadas as mesmas análises anteriores, adicionando-se à comparação dos resultados de ambas as etapas para cada diagonal.

### 3.3 Análise do pórtico preenchido no software Ftool

Por fim, o pórtico preenchido foi modelado no software Ftool, considerando os eixos das vigas e pilares, com as larguras da diagonal equivalente, iguais as do item anterior e os deslocamentos obtidos foram comparados com os obtidos anteriormente, com a finalidade de averiguar se a utilização do Ftool traz resultados satisfatórios que possam dispensar a análise pelo MEF ou não. Um exemplo deste modelo encontra-se na Figura 18.

Figura 18 – Modelo de pórtico preenchido com diagonal equivalente no Ftool



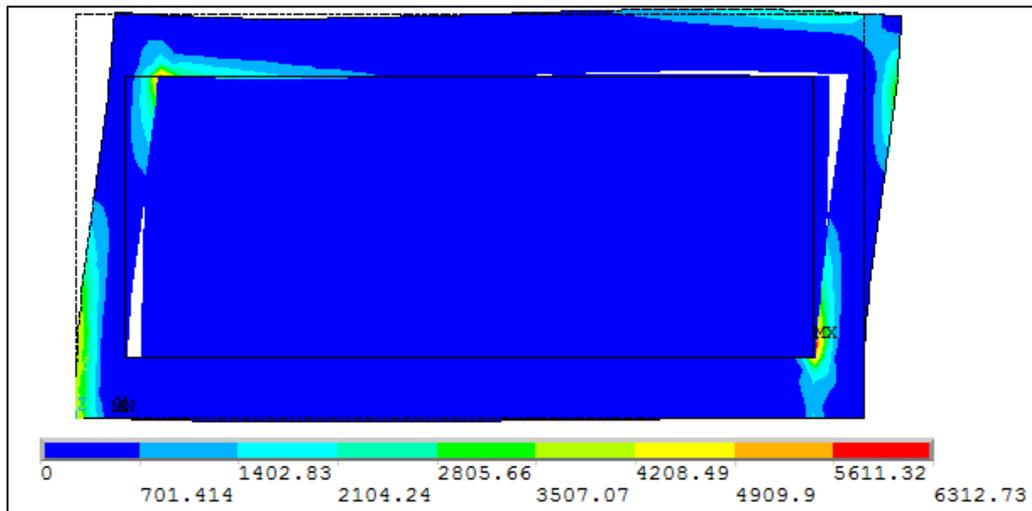
Fonte: Próprio Autor

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Análise do comportamento do pórtico preenchido através do MEF

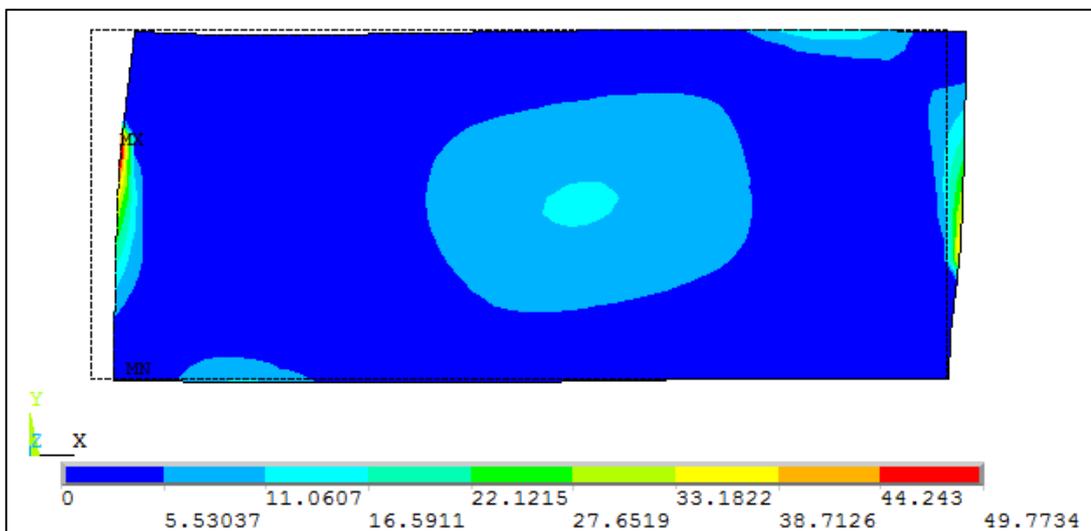
Para o pórtico simulado foram tomados os resultados referentes às tensões principais, ao cisalhamento, o deslocamento horizontal e a pressão de contato existente entre a estrutura e o painel de alvenaria para o módulo de elasticidade de 450MPa, como ilustram as Figuras 19 à 27. Os retângulos formados pelas linhas tracejadas externas e linhas contínuas internas representam o estado indeformado do conjunto.

Figura 19 – Tensões principais máximas (kN/m<sup>2</sup>) para E = 450MPa



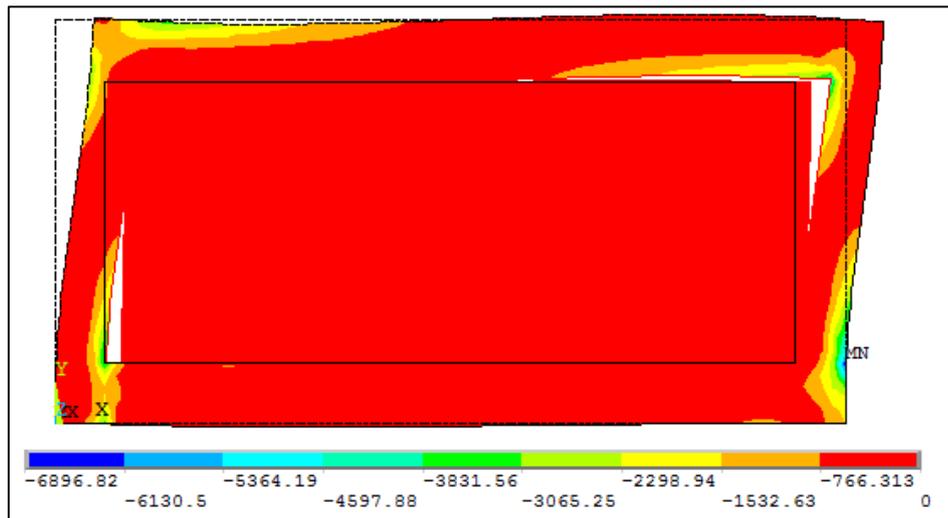
Fonte: Próprio Autor

Figura 20 – Tensões principais máximas (kN/m<sup>2</sup>) na alvenaria para E = 450MPa



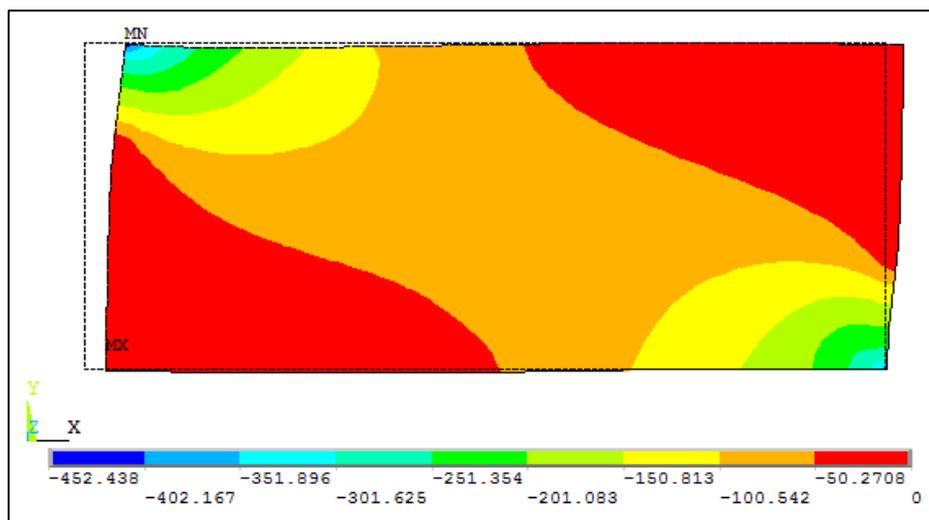
Fonte: Próprio Autor

Figura 21 – Tensões principais mínimas (kN/m<sup>2</sup>) para E = 450MPa



Fonte: Próprio Autor

Figura 22 – Tensões principais mínimas (kN/m<sup>2</sup>) na alvenaria para E = 450MPa



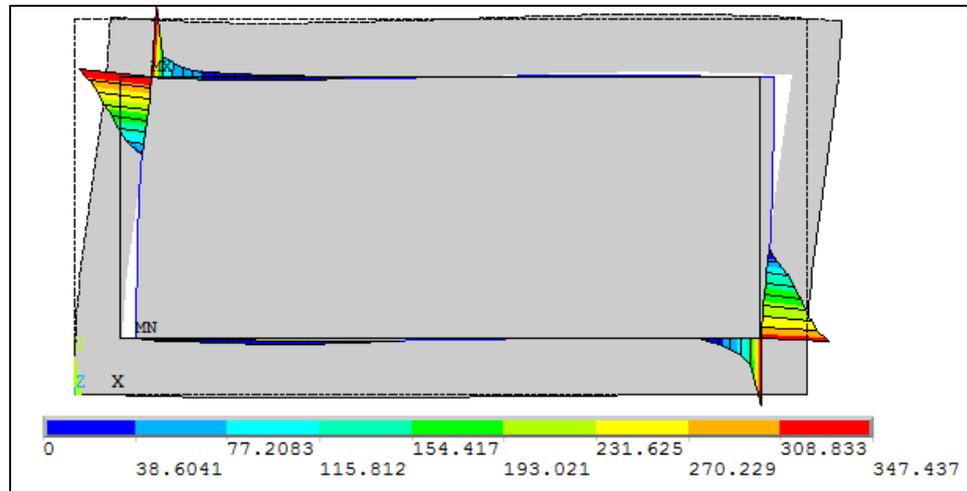
Fonte: Próprio Autor

A figura 22 evidencia a formação de uma diagonal com maiores tensões de compressão, enquanto a figura 20 apresenta maiores tensões de tração nos cantos da diagonal oposta àquela. Comparando-se as tensões nos pórticos (figuras 19 e 21), observa-se que as tensões principais máximas e mínimas também são diagonalmente opostas.

Na figura 23 torna-se visível como é formada a diagonal comprimida no painel de alvenaria, já que esta mostra a compressão que ocorre entre o painel e o pórtico.

Isso se dá dentro de uma certa faixa de contato, além da qual não mais compressão e a estrutura começa a separar-se da alvenaria.

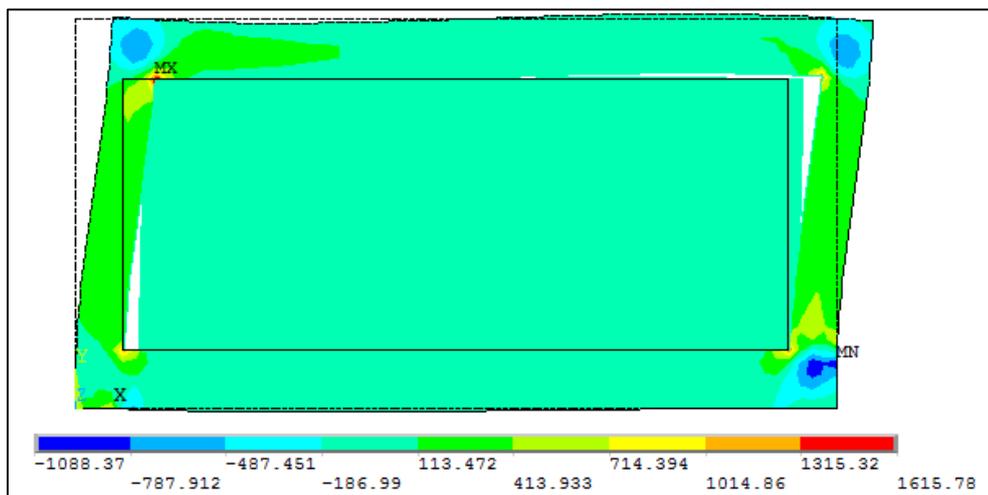
Figura 23 – Pressão de contato na interface pórtico/painel (kN/m<sup>2</sup>) para E = 450MPa



Fonte: Próprio Autor

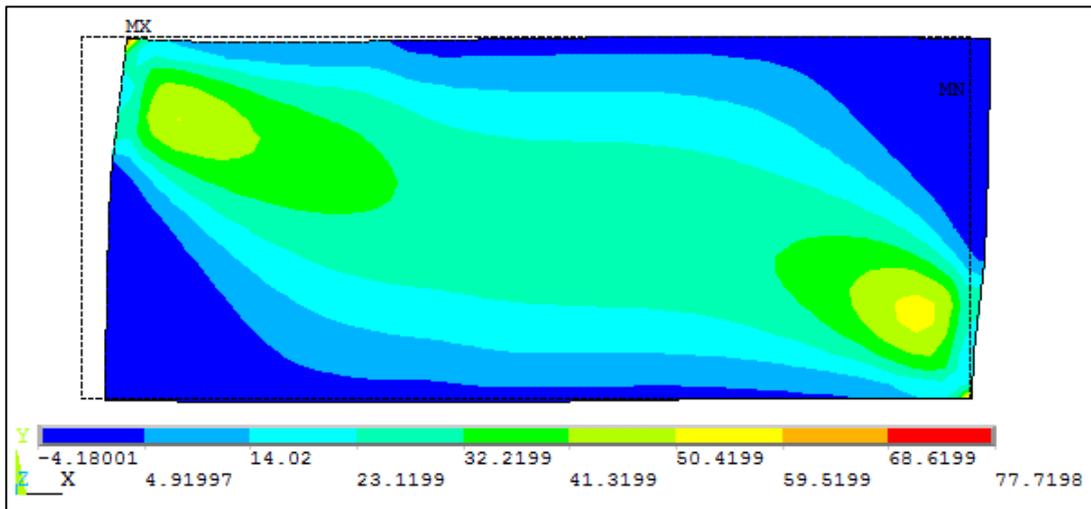
É possível notar uma região onde as tensões de cisalhamento são maiores e esta se encontra na mesma direção da diagonal de compressão, como ilustra a figura 25. Isso pode explicar o aparecimento de fissuras nas juntas de argamassa no segundo estágio do comportamento dos pórticos preenchidos, como explicado por Polyakov (1960) e demonstrado na figura 2.

Figura 24 – Tensões de cisalhamento (kN/m<sup>2</sup>) para E = 450MPa



Fonte: Próprio Autor

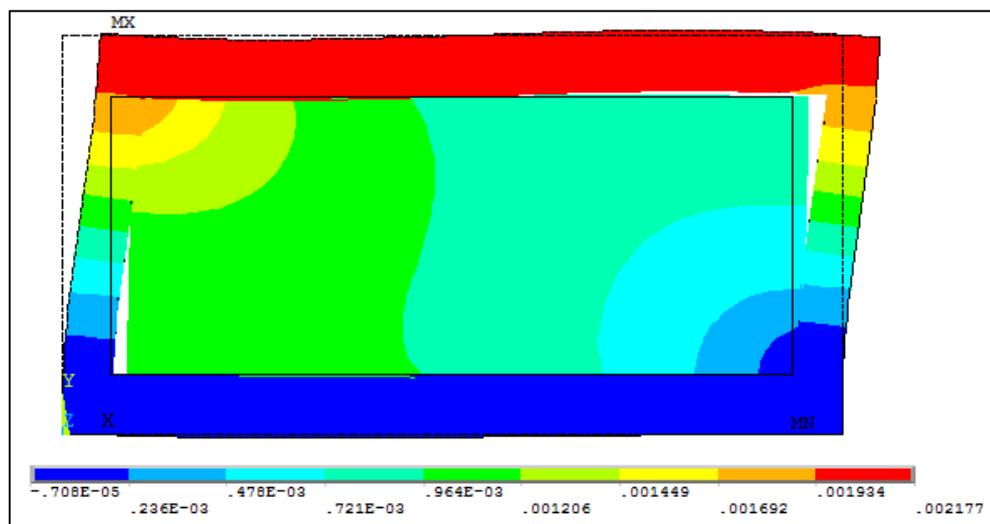
Figura 25 – Tensões de cisalhamento (kN/m<sup>2</sup>) na alvenaria para E = 450Mpa



Fonte: Próprio Autor

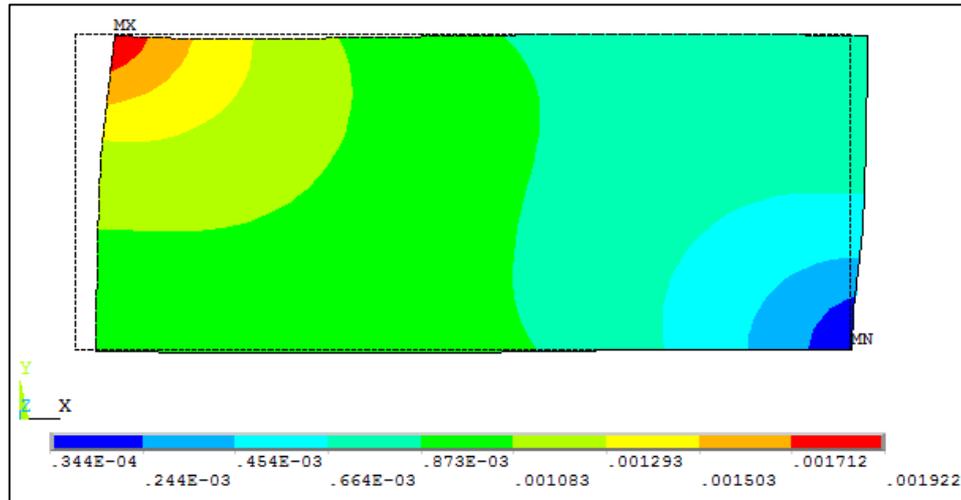
O deslocamento horizontal máximo ocorre no canto superior esquerdo tanto do pórtico quanto do painel (figuras 26 e 27, respectivamente), o que é de se esperar, já que é a região onde está sendo aplicado o carregamento. Além disso, a análise do deslocamento auxilia na compressão do descolamento que ocorre na lateral esquerda entre pórtico e alvenaria, pois chama a atenção para o encurtamento horizontal do painel.

Figura 26 – Deslocamento horizontal (m) para E = 450MPa



Fonte: Próprio Autor

Figura 27 – Deslocamento horizontal (m) na alvenaria para  $E = 450\text{MPa}$

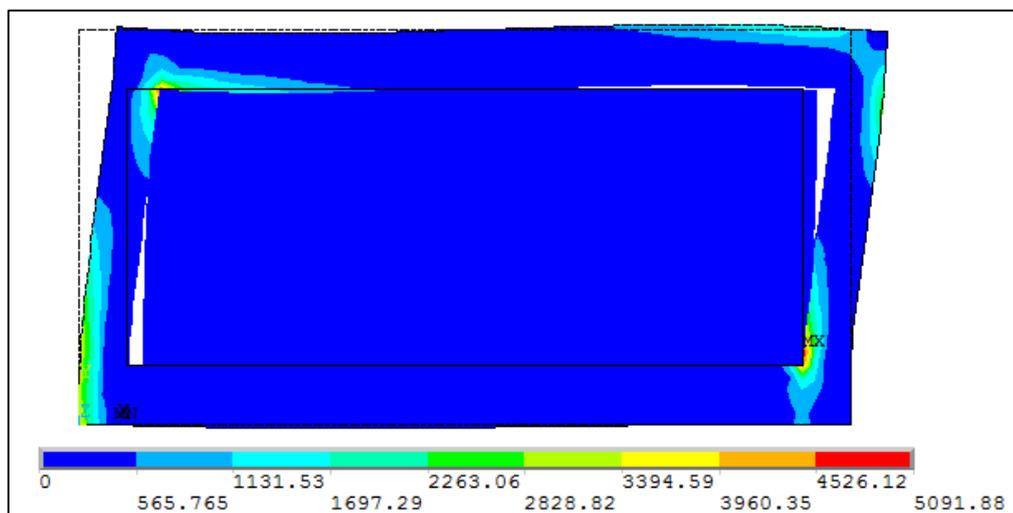


Fonte: Próprio Autor

Além disso, também foram feitas análises para o pórtico preenchido com alvenaria com módulo de elasticidade de  $900\text{MPa}$  e verificação da influência dessa alteração no conjunto.

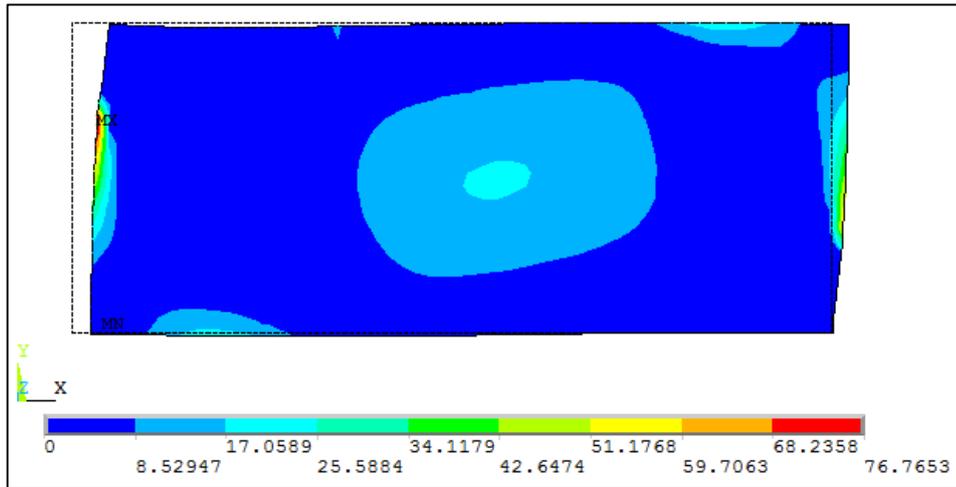
A comparação com os resultados anteriores demonstra que esse aumento resultou numa participação maior do material de preenchimento na distribuição de esforços, fazendo com que este absorva tensões maiores, enquanto o pórtico apresenta, conseqüentemente, um alívio. A largura da diagonal comprimida diminuiu, enquanto a tensão aumenta, isso faz com que a pressão nas regiões de contato na interface pórtico/painel aumente. As figuras 28 a 36 ilustram esses resultados.

Figura 28 – Tensões principais máximas ( $\text{kN/m}^2$ ) para  $E = 900\text{MPa}$



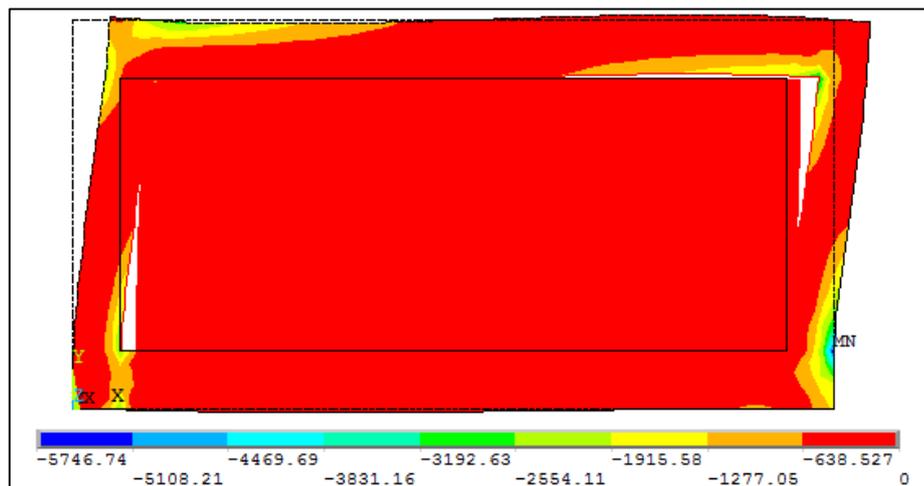
Fonte: Próprio Autor

Figura 29 – Tensões principais máximas (kN/m<sup>2</sup>) na alvenaria para E = 900MPa



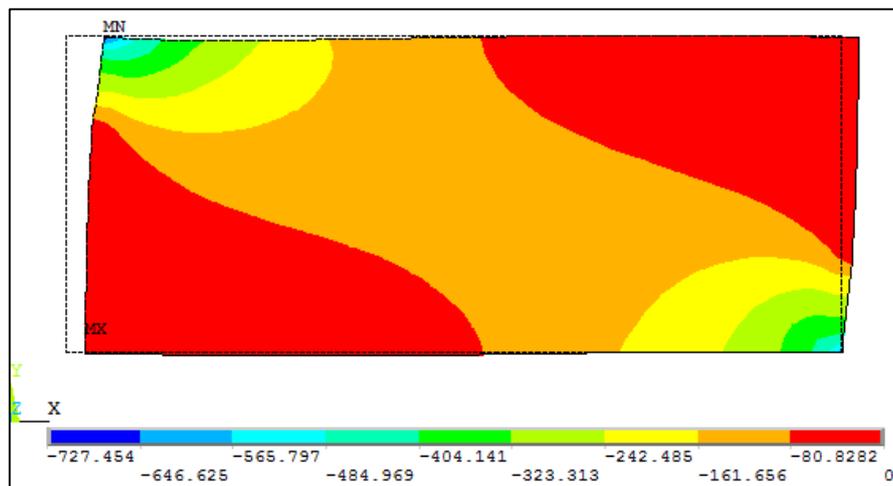
Fonte: Próprio Autor

Figura 30 – Tensões principais mínimas (kN/m<sup>2</sup>) para E = 900MPa



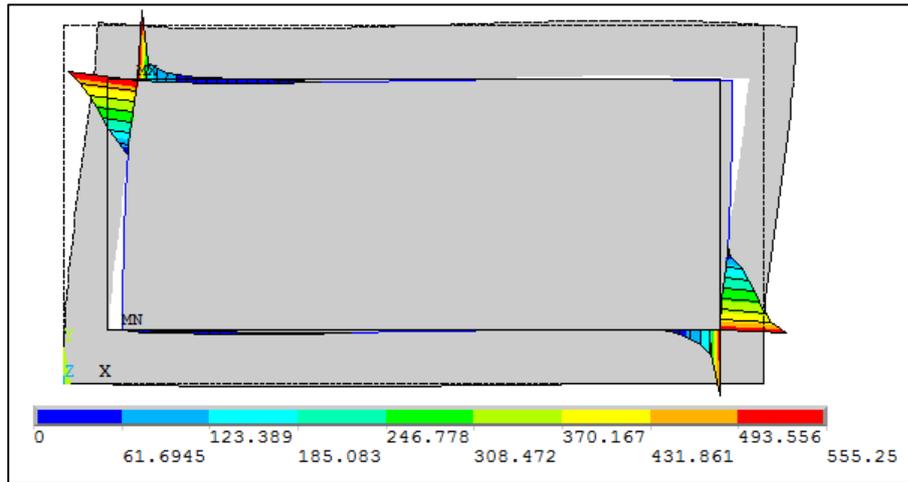
Fonte: Próprio Autor

Figura 31 – Tensões principais mínimas (kN/m<sup>2</sup>) na alvenaria para E = 900MPa



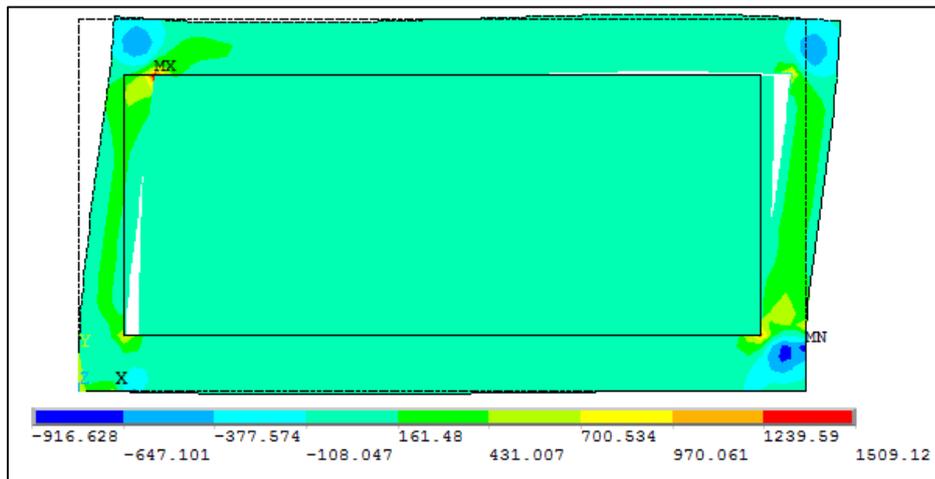
Fonte: Próprio Autor

Figura 32 – Pressão de contato na interface pórtico/painel (kN/m<sup>2</sup>) para E = 900MPa



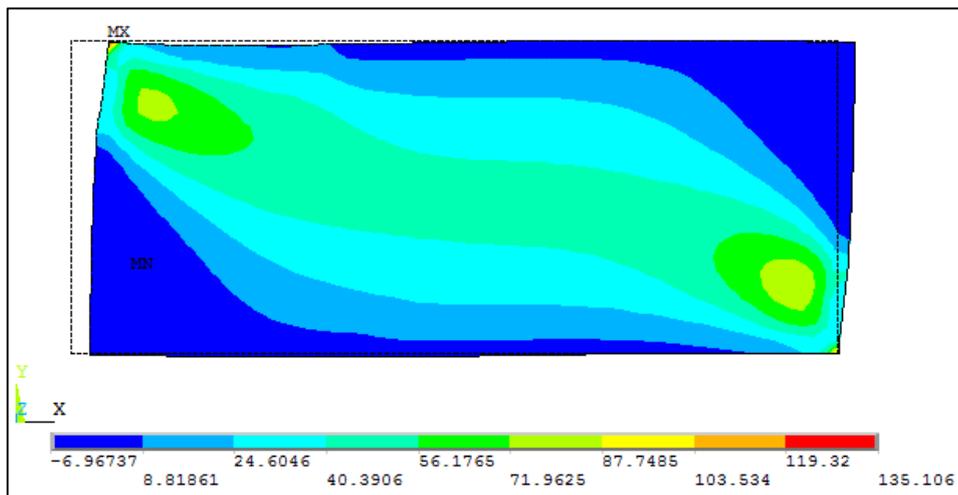
Fonte: Próprio Autor

Figura 33 – Tensões de cisalhamento (kN/m<sup>2</sup>) para E = 900MPa



Fonte: Próprio Autor

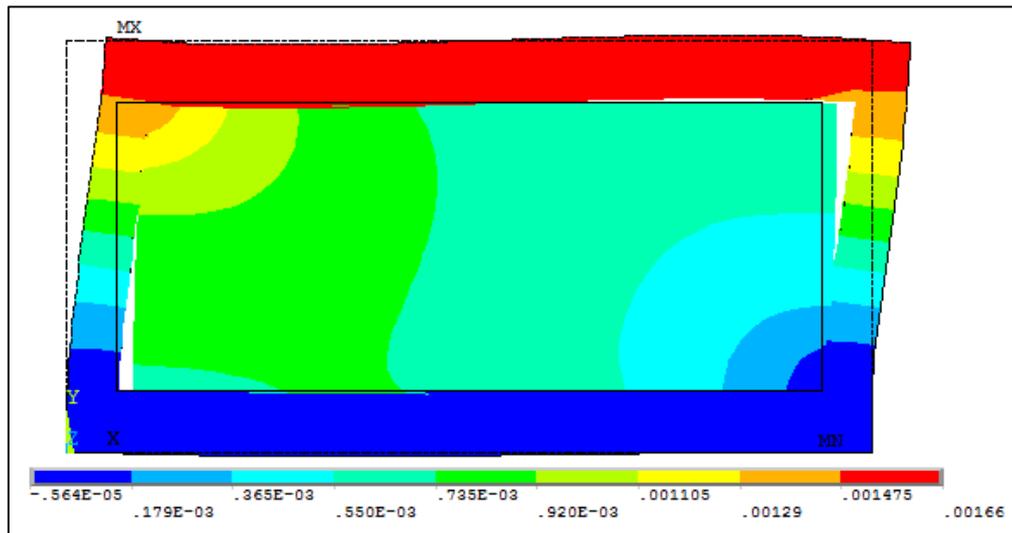
Figura 34 – Tensões de cisalhamento (kN/m<sup>2</sup>) para E = 900MPa



Fonte: Próprio Autor

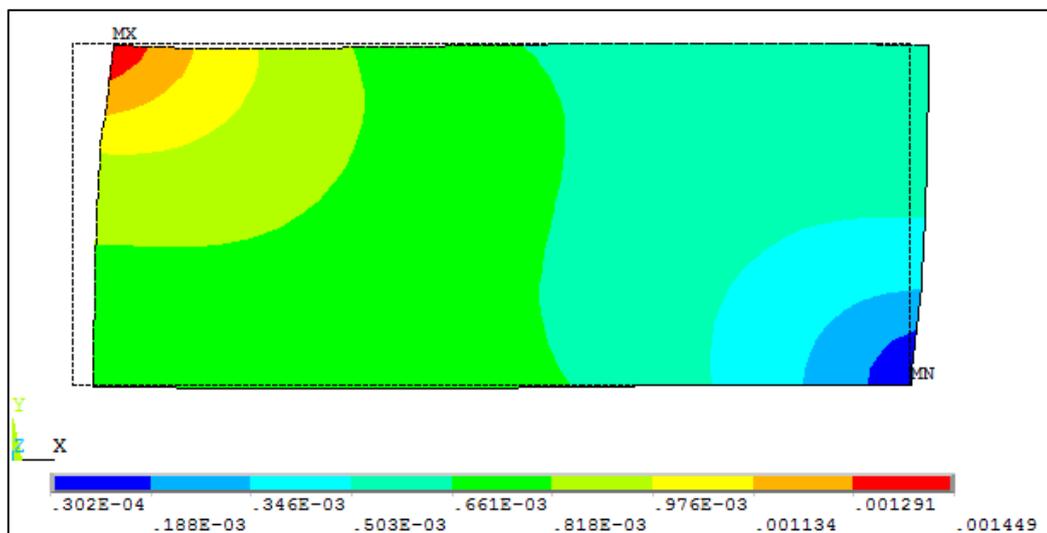
O deslocamento máximo continua ocorrendo no canto superior, mas se por um lado as tensões na alvenaria aumentam, por outro o deslocamento é menor, como pode ser observado nas figuras 35 e 36. Isso ocorre porque o aumento do módulo de elasticidade faz com que o material se torne mais rígido. O deslocamento horizontal, neste caso, diminui de 2,177mm para 1,66mm, uma variação de 26,50%.

Figura 35 – Deslocamento horizontal (m) para  $E = 900\text{MPa}$



Fonte: Próprio Autor

Figura 36 – Deslocamento horizontal (m) na alvenaria para  $E = 900\text{MPa}$



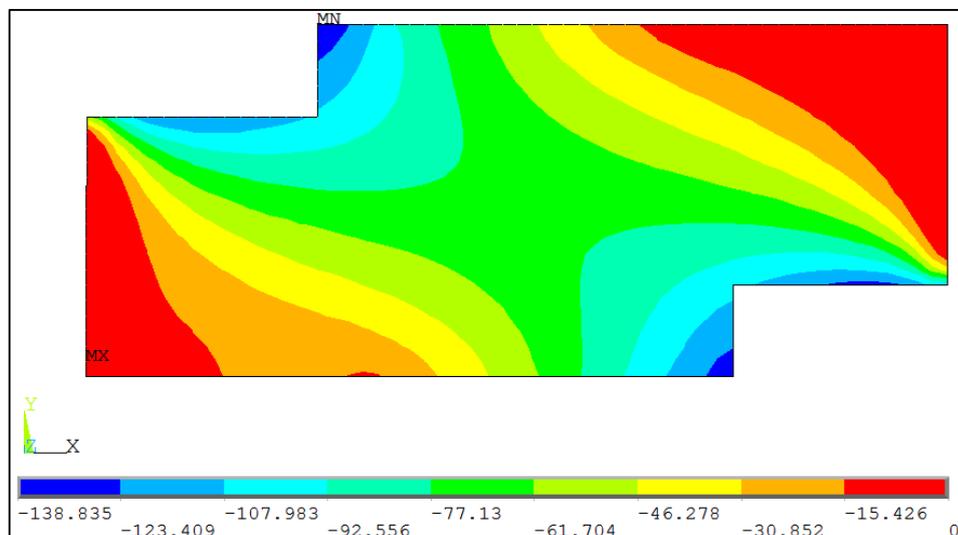
Fonte: Próprio Autor

Para uma melhor compreensão das tensões que ocorrem no interior da diagonal comprimida, foram retirados resultados das tensões principais mínimas do

painel de 450 MPa sem considerar alguns elementos dos cantos do painel, onde estão os valores de compressão máxima, como se vê na Figura 37. É possível notar como a compressão é maior na região central da diagonal comprimida e que diminui conforme se distribui pelo painel de alvenaria.

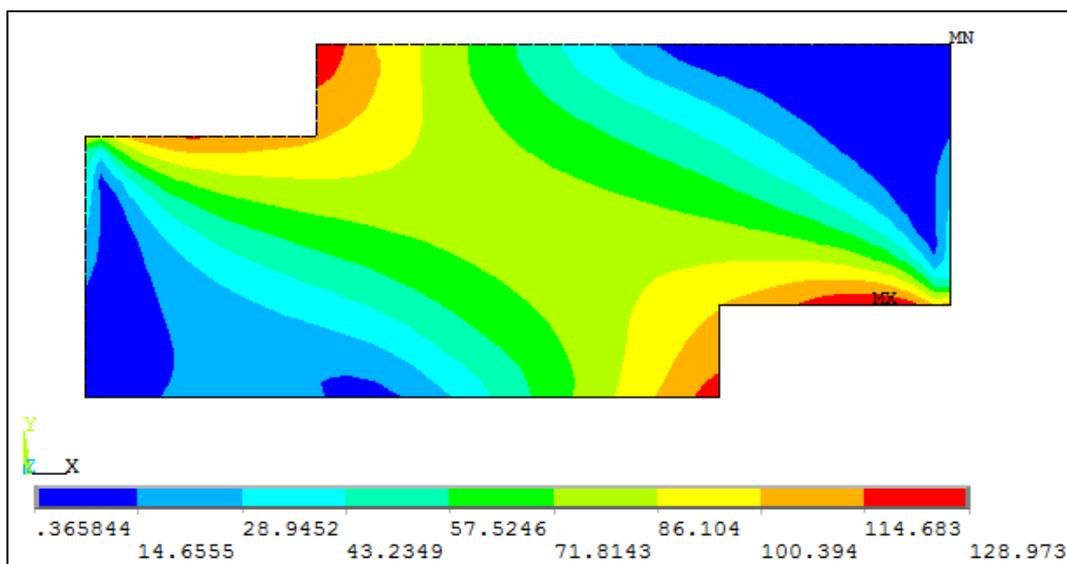
A Figura 38 exibe o critério de Von Mises para a análise de tensões do painel de alvenaria. Percebe-se que o seu comportamento é bem semelhante ao das tensões de compressão, o que confirma que é esse tipo de tensão a mais influente no painel.

Figura 37 – Tensões principais mínimas (kN/m<sup>2</sup>) na alvenaria para E= 450 MPa



Fonte: Próprio Autor

Figura 38 – Tensões equivalentes de von Mises (kN/m<sup>2</sup>)



Fonte: Próprio Autor

## 4.2 Análise do comportamento das diagonais equivalentes

As mesmas análises realizadas anteriormente para o pórtico com painel de alvenaria completo foram feitas para as diferentes larguras de diagonais equivalentes determinadas. A partir dos resultados, foram obtidos os deslocamentos máximos para cada uma das diagonais e feitas comparações destes com o deslocamento máximo do pórtico com painel completo e entre as próprias diagonais para o caso de módulo de elasticidade de alvenaria de 450 MPa, conforme Tabela 4 para o Método dos Elementos Finitos e Tabela 5 para resultados do Ftool.

Tabela 4 – Deslocamento horizontal máximo do pórtico com o MEF para E= 450MPa

	Largura da diagonal equivalente (m)	Deslocamento horizontal máximo (mm)	Diferença relativa ao deslocamento do painel inteiro
<b>Painel inteiro</b>	-	<b>2,177</b>	<b>0,00%</b>
Decani e Fantin (1987) - não Fissurado	2,784	2,189	0,55%
Decani e Fantin (1987) - Fissurado	2,206	2,202	1,15%
Paulay e Priestley (1992)	1,513	2,256	3,63%
Liaw e Kwan (1984)	1,431	2,262	3,90%
Chrysostomou e Asteris (2012)	1,240	2,303	5,79%
Durrani e Luo (1994)	0,963	2,388	9,69%
Mainstone e Weeks (1974)	0,804	2,446	12,36%

Fonte: Próprio Autor

É possível notar que quanto maior a largura da diagonal equivalente (2,784m para a equação de Decani e Fantin (1987) – não fissurado, conforme Tabela 3), mais próximo é o valor do deslocamento horizontal com relação ao modelo com o painel inteiro. Entretanto, até a diagonal de Chrysostomous e Asteris (2012) essa diferença ainda é relativamente pequena.

Tabela 5 – Deslocamento horizontal máximo do pórtico com o Ftool para E= 450MPa

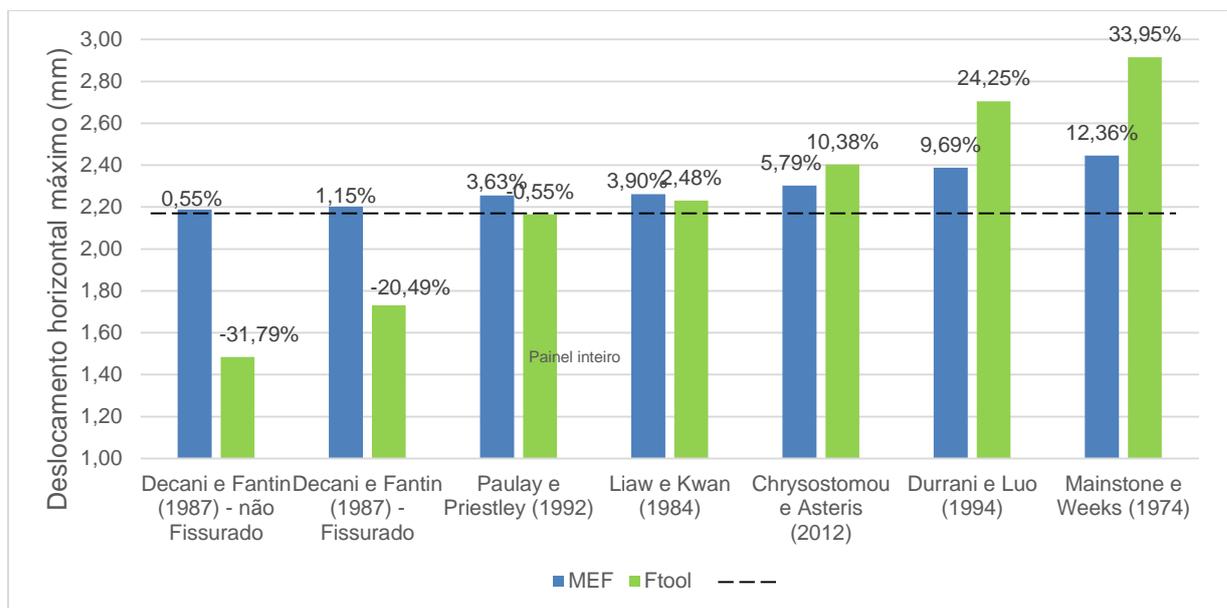
	Largura da diagonal equivalente (m)	Deslocamento horizontal máximo (mm)	Diferença relativa ao deslocamento do painel inteiro
<b>Painel inteiro (MEF)</b>	-	<b>2,177</b>	<b>0,00%</b>
Decani e Fantin (1987) - não Fissurado	2,784	1,485	-31,79%
Decani e Fantin (1987) - Fissurado	2,206	1,731	-20,49%
Paulay e Priestley (1992)	1,513	2,165	-0,55%
Liaw e Kwan (1984)	1,431	2,231	2,48%
Chrysostomou e Asteris (2012)	1,240	2,403	10,38%
Durrani e Luo (1994)	0,963	2,705	24,25%
Mainstone e Weeks (1974)	0,804	2,916	33,95%

Fonte: Próprio Autor

Diferentemente dos resultados para o método dos elementos finitos, no software Ftool os deslocamentos são bem distintos entre si, chegando ao maior deslocamento ser praticamente o dobro do menor. A medida que a largura aumenta, o deslocamento diminui, ao ponto de seu valor ser menor do que o deslocamento do pórtico com painel inteiro.

O Gráfico 1 apresenta uma comparação entre os deslocamentos das diagonais para cada método com os do painel inteiro, as porcentagens acima das barras indicam as diferenças relativas ao deslocamento do painel inteiro. A linha tracejada indica o deslocamento horizontal máximo do painel inteiro.

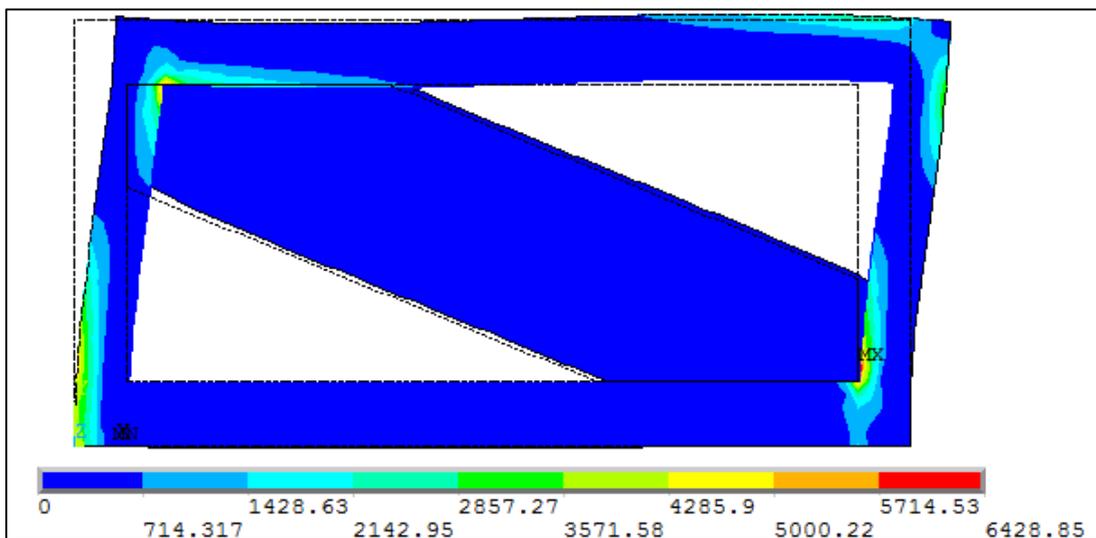
Gráfico 1 - Deslocamento máximo horizontal (mm) para E = 450 MPa



Fonte: Próprio Autor

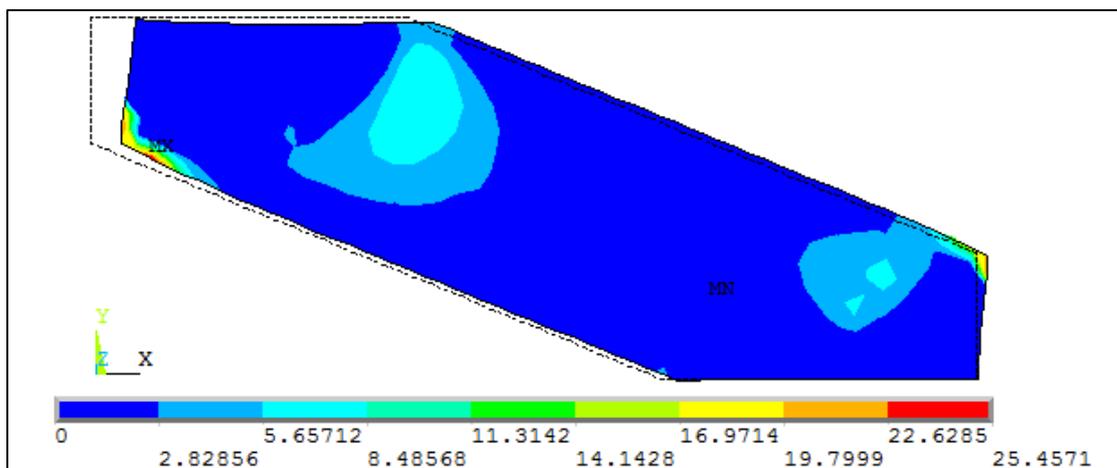
Analisando os resultados de ambos os métodos com o auxílio deste gráfico, é possível perceber que as diagonais de Paulay e Priestley (1992) e Liaw e Kwan (1984) são as que apresentam os resultados mais satisfatórios para este modelo estudado. A primeira dessas duas diagonais apresenta o valor mais próximo do ideal neste caso, por isso serão apresentados os seus resultados gráficos do ANSYS nas Figuras 39 a 47.

Figura 39 – Tensões principais máximas (kN/m<sup>2</sup>) para E = 450 MPa – Diagonal de Paulay e Priestley (1992)



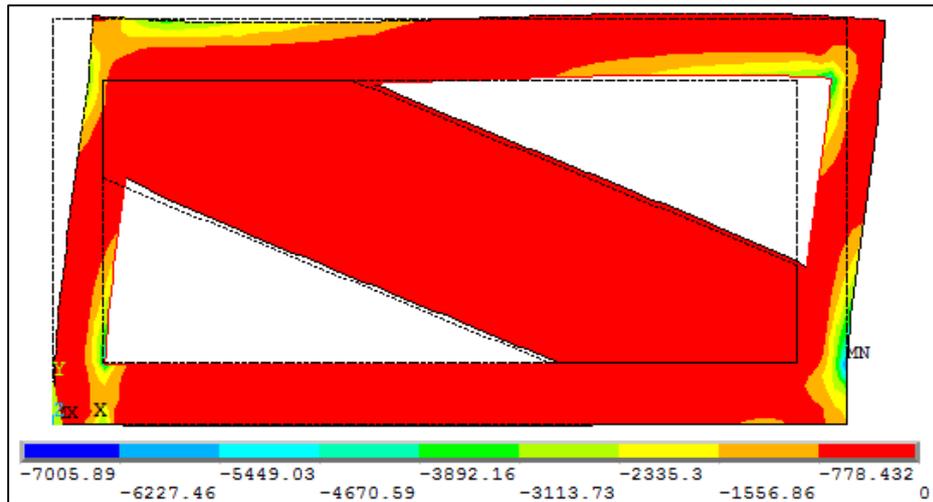
Fonte: Próprio Auto

Figura 40 – Tensões principais máximas (kN/m<sup>2</sup>) na alvenaria para E = 450 MPa – Diagonal de Paulay e Priestley (1992)



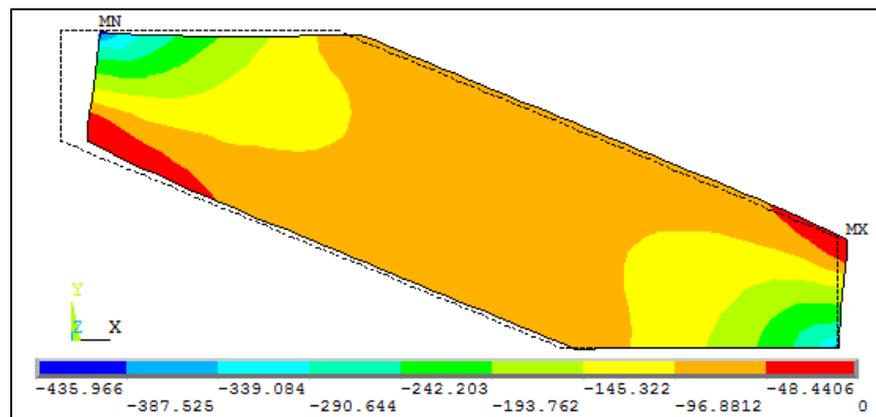
Fonte: Próprio Autor

Figura 41 – Tensões principais mínimas ( $\text{kN/m}^2$ ) para  $E = 450 \text{ MPa}$  – Diagonal de Paulay e Priestley (1992)



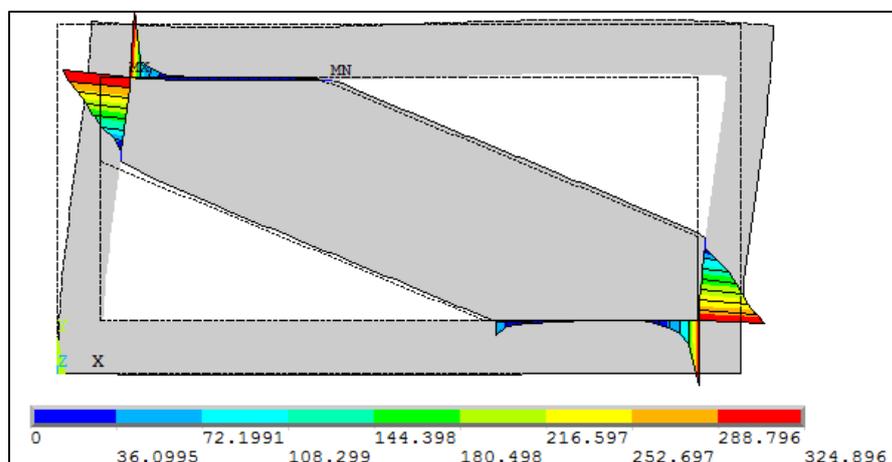
Fonte: Próprio Autor

Figura 42 – Tensões principais mínimas ( $\text{kN/m}^2$ ) na alvenaria para  $E = 450 \text{ MPa}$  – Diagonal de Paulay e Priestley (1992)



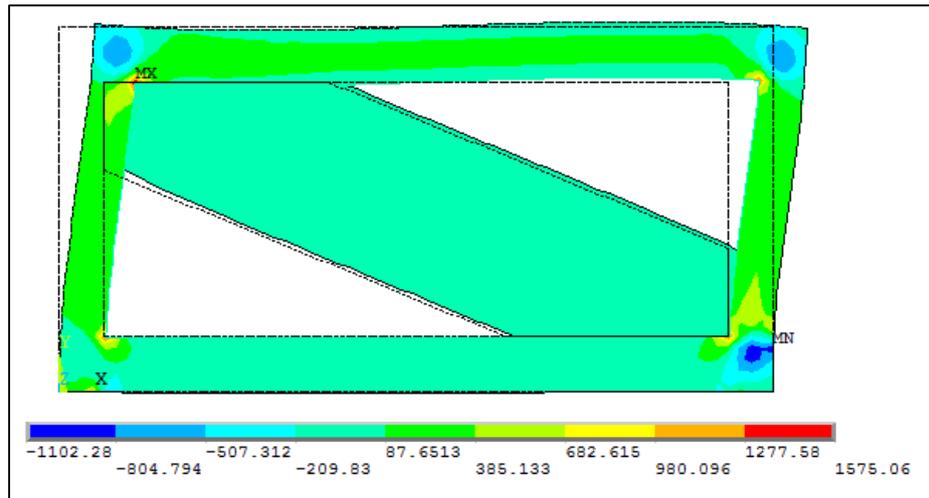
Fonte: Próprio Autor

Figura 43 – Pressão de contato na interface pórtico/diagonal ( $\text{kN/m}^2$ ) para  $E=900 \text{ MPa}$  – Diagonal de Paulay e Priestley (1992)



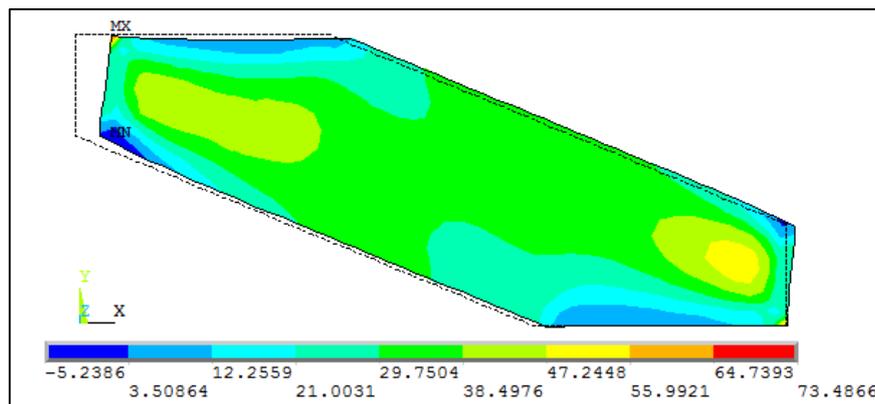
Fonte: Próprio Autor

Figura 44 – Tensões de cisalhamento (kN/m<sup>2</sup>) para E = 450MPa – Diagonal de Paulay e Priestley (1992)



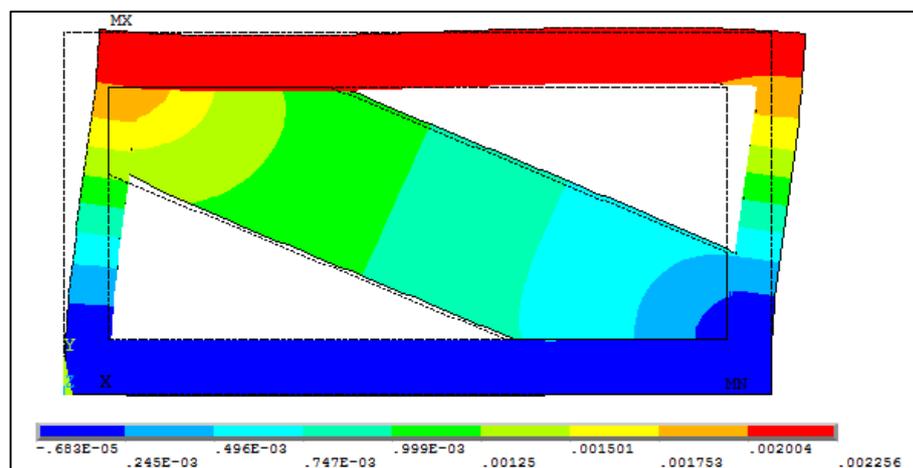
Fonte: Próprio Autor

Figura 45 – Tensões de cisalhamento (kN/m<sup>2</sup>) na alvenaria para E = 450MPa – Diagonal de Paulay e Priestley (1992)



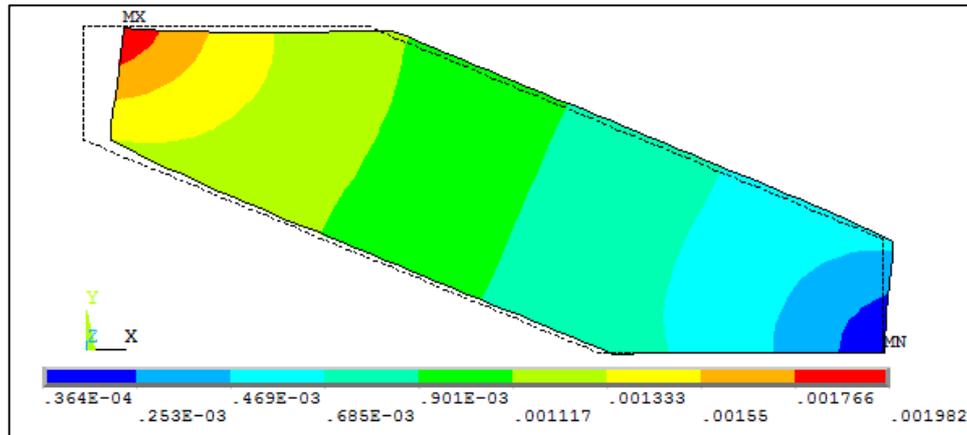
Fonte: Próprio Autor

Figura 46 – Deslocamento horizontal (m) para E = 450MPa – Diagonal de Paulay e Priestley (1992)



Fonte: Próprio Autor

Figura 47 – Deslocamento horizontal (m) na alvenaria para  $E = 450\text{MPa}$ – Diagonal de Paulay e Priestley (1992)



Fonte: Próprio Autor

O aumento do módulo de elasticidade da alvenaria faz com que a largura das diagonais equivalentes seja menor e, portanto, os deslocamentos e tensões também sofrem alteração. Nas tabelas 6 e 7 são comparados os deslocamentos máximos e relativos obtidos através do método dos elementos finitos e pelo software Ftool para o módulo de elasticidade de  $900\text{MPa}$ .

Tabela 6 – Deslocamento horizontal máximo do pórtico com o MEF para  $E = 900\text{MPa}$

	Largura da diagonal equivalente (m)	Deslocamento horizontal máximo (mm)	Diferença relativa ao deslocamento do painel inteiro
<b>Painel inteiro</b>	-	<b>1,660</b>	<b>0,00%</b>
Decani e Fantin (1987) - não Fissurado	2,423	1,681	1,27%
Decani e Fantin (1987) - Fissurado	1,864	1,703	2,59%
Paulay e Priestley (1992)	1,513	1,745	5,12%
Liaw e Kwan (1984)	1,312	1,785	7,53%
Chrysostomou e Asteris (2012)	1,157	1,830	10,24%
Durrani e Luo (1994)	0,898	1,916	15,42%
Mainstone e Weeks (1974)	0,750	2,014	21,33%

Fonte: Próprio Autor

Tabela 7 – Deslocamento horizontal máximo do pórtico com o Ftool para E= 900MPa

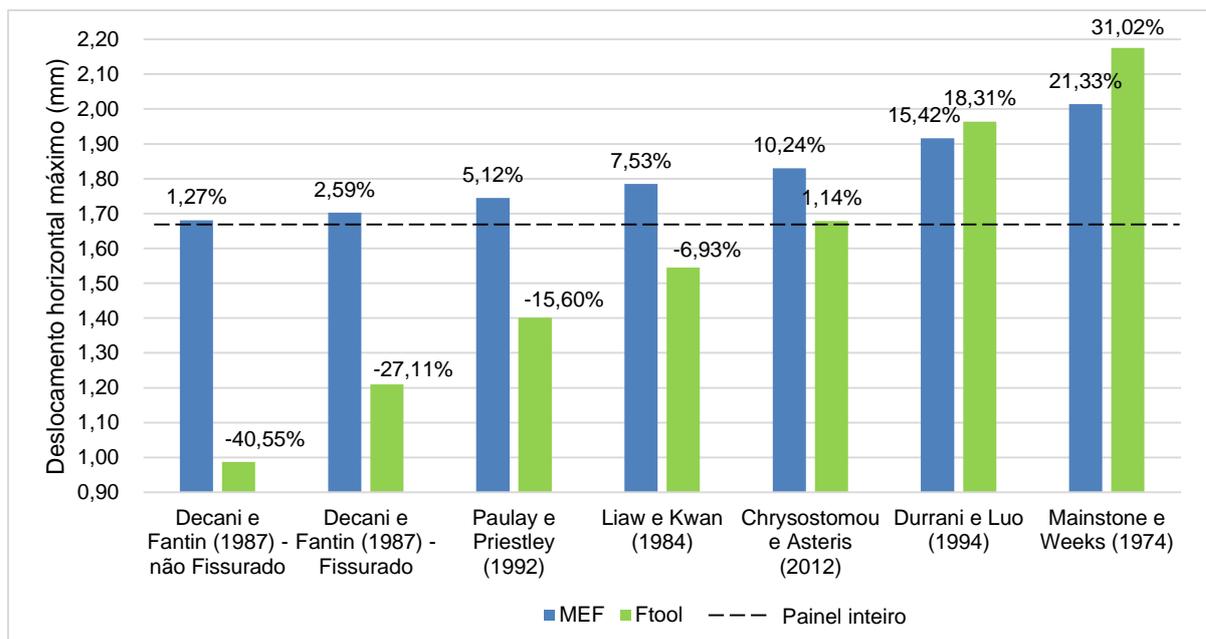
	Largura da diagonal equivalente (m)	Deslocamento horizontal máximo (mm)	Diferença relativa ao deslocamento do painel inteiro
<b>Painel inteiro (MEF)</b>	-	<b>1,660</b>	<b>0,00%</b>
Decani e Fantin (1987) - não Fissurado	2,423	0,987	-40,55%
Decani e Fantin (1987) - Fissurado	1,864	1,210	-27,11%
Paulay e Priestley (1992)	1,513	1,401	-15,60%
Liaw e Kwan (1984)	1,312	1,545	-6,93%
Chrysostomou e Asteris (2012)	1,157	1,679	1,14%
Durrani e Luo (1994)	0,898	1,964	18,31%
Mainstone e Weeks (1974)	0,750	2,175	31,02%

Fonte: Próprio Autor

Assim como observado anteriormente, no MEF, quanto maior a largura da diagonal, mais próximos ficam os valores de deslocamento daquele que ocorre no painel inteiro. Porém, é possível perceber que para 900MPa a diferença entre os deslocamentos é maior, chegando a ser 21,33% maior para a menor diagonal.

O Gráfico 2 traz a comparação dos deslocamentos horizontais máximos entre os softwares e o painel inteiro, com a diferença relativa do deslocamento a este último. A linha tracejada indica o deslocamento horizontal máximo do painel inteiro.

Gráfico 2 - Deslocamento máximo horizontal (mm) para E = 900 MPa



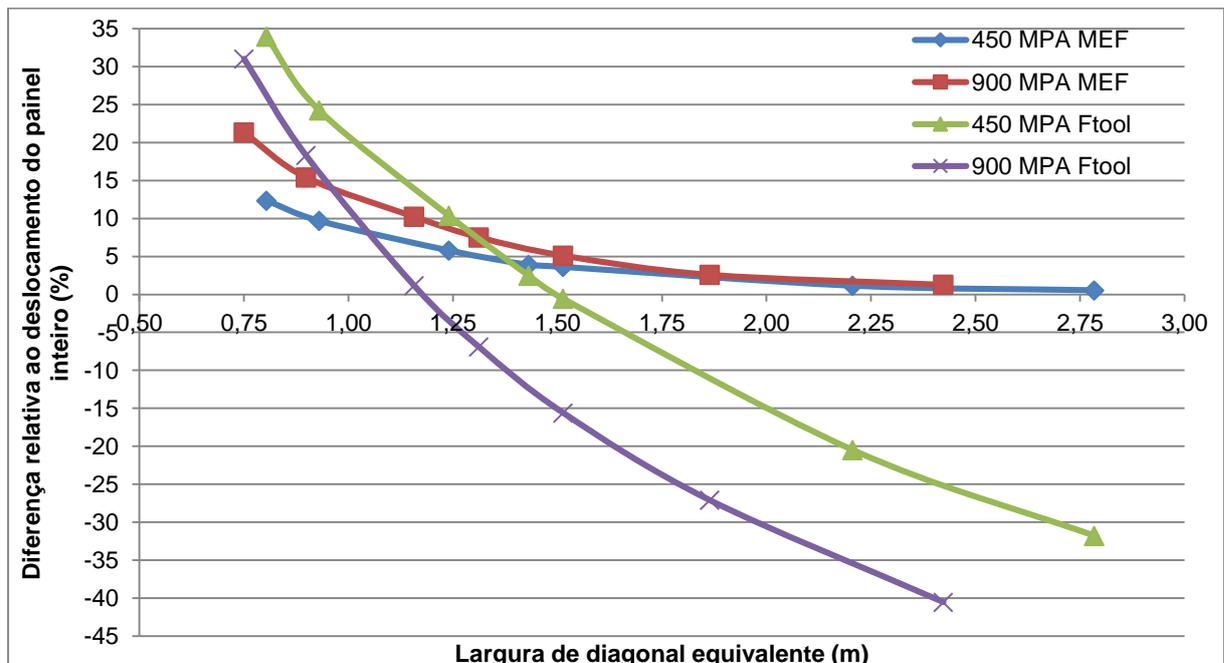
Fonte: Próprio Autor

Com a maior discrepância entre os valores mesmo para larguras iguais, algumas diagonais apresentaram resultados aceitáveis em cada um dos diferentes métodos. Para o MEF foram as diagonais calculadas pelos métodos de Decani e Fantin (1987) - não Fissurado, Decani e Fantin (1987) – Fissurado e Paulay e Priestley (1992) fica mais difícil decidir qual diagonal representa melhor esse caso. Já para o Ftool, apenas a diagonal calculada pelo método de Chrysostomou e Asteris (2012) resultou em um deslocamento horizontal consideravelmente próximo ao deslocamento de referência.

No Gráfico 3 é exibida a relação entre as larguras das diagonais equivalentes com suas diferenças relativas ao deslocamento do painel inteiro para o MEF e Ftool e os diferentes módulos de elasticidade. Percebe-se que para o MEF, as diferenças não são tão discrepantes e que elas tendem a convergir com o aumento da largura da diagonal equivalente, sendo bem aceitáveis para larguras maiores que 1,50m.

Por sua vez, a análise através do Ftool mostrou resultados aceitáveis para os casos da diagonal principal de Paulay e Priestley (1992) no caso de  $E = 450\text{MPa}$  e diagonal principal de Chrysostomou e Asteris (2012) no caso de  $E = 900\text{MPa}$ .

Gráfico 3 – Relação da largura de diagonal (m) x diferença relativa ao deslocamento do painel inteiro (%)

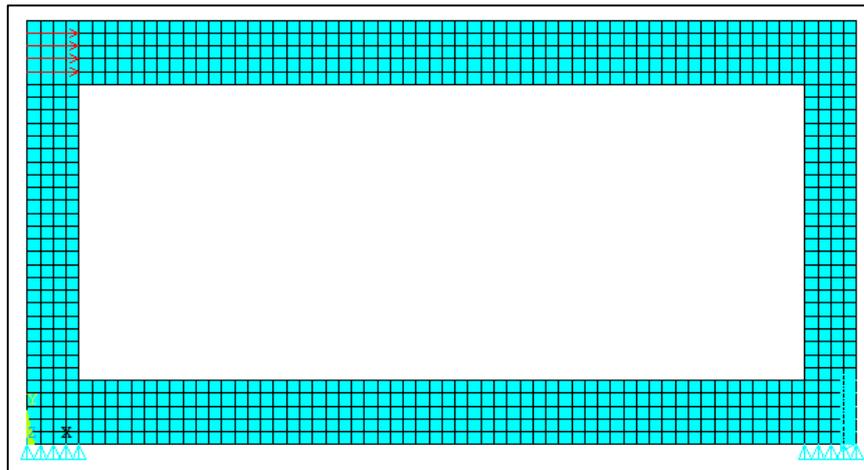


Fonte: Próprio Autor

### 4.3 Análise dos modelos sem o painel de alvenaria

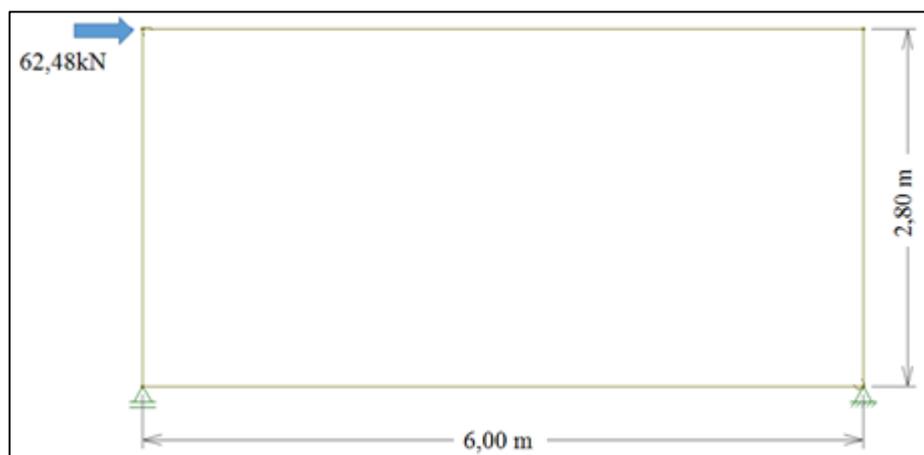
No intuito de verificar a validade do modelo utilizado no software Ftool, foi simulado o pórtico de estudo sem o painel de alvenaria em ambos os softwares, Ansys e Ftool, e obtidos os seus deslocamentos horizontais máximos. As figuras 48 e 49 ilustram ambos os modelos, respectivamente.

Figura 48 – Malha de elementos finitos do pórtico sem o painel de alvenaria



Fonte: Próprio Autor

Figura 49 – Modelo de pórtico sem o painel de preenchimento no Ftool



Fonte: Próprio Autor

O deslocamento horizontal máximo obtido através do MEF no Ansys foi de 3,27 mm, enquanto que no software Ftool foi de 4,82 mm, o que resulta em uma diferença de 47,40% entre os métodos.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentou-se neste trabalho um estudo sobre a influência que a alvenaria de preenchimento contida em um pórtico de concreto armado possui sobre a estrutura, quando esta é submetida a um esforço lateral. Esse esforço pode simular ações como a do vento. Constatou-se, como esperado, que o aumento do módulo de elasticidade (E) do painel de alvenaria faz com que a estrutura se torne mais rígida e, portanto, apresente menores deslocamentos.

Foram utilizados dois módulos de elasticidade para a alvenaria, 450 MPa (blocos com furo na horizontal) e 900 MPa (blocos com furo na vertical), os deslocamentos horizontais máximos obtidos no pórtico foram de 2,177 mm e 1,660 mm, respectivamente. A redução do deslocamento horizontal com o aumento do módulo de elasticidade da alvenaria foi de 23,75%. Este resultado é significativo, pois se forem considerados múltiplos pavimentos, não haverá apenas o efeito linear da multiplicação de pavimentos no valor do deslocamento horizontal máximo, mas o deslocamento vertical da base do pilar localizado no lado oposto à aplicação da força horizontal nos pavimentos superiores (inexistente no caso de análise de pórticos de um único pavimento), causará deslocamentos não lineares com a altura, tornando a influência da alvenaria na estrutura mais significativa.

No que tange às tensões que atuam na alvenaria, a duplicação do módulo de elasticidade da alvenaria resultou no aumento de 60,78% das tensões máximas de compressão no painel. Dessa forma, verifica-se que a consideração da relação entre resistência do bloco da alvenaria e o módulo de elasticidade do painel, expressa na NBR 15812, resulta em grande influência da disposição (horizontal ou vertical) do bloco nas tensões no painel e, conseqüentemente, no deslocamento horizontal do pórtico.

Também foram analisadas larguras de contribuição do painel de alvenaria para a estrutura, determinadas através equações existentes na bibliografia, para análise através do método dos elementos finitos. Observou-se que à medida em que é considerada uma menor largura da diagonal, o valor de deslocamento máximo no pórtico aumenta em relação ao obtido na simulação com o painel inteiro. Para o caso em que foi considerado o módulo de elasticidade de 450 MPa, esse valor aumentou de 0,55% a 12,36%, sendo os maiores aumentos correspondem às menores larguras de diagonal equivalente. No caso em que foi considerado o de módulo de elasticidade

de 900 MPa, o aumento do deslocamento foi de 1,27% a 21,33%, seguindo a mesma relação entre variação do deslocamento horizontal e variação da diagonal equivalente. Verifica-se, ao analisar o gráfico 3, que a largura da diagonal equivalente é mais significativa na variação do deslocamento horizontal no pórtico, do que o módulo de elasticidade do painel.

Constatou-se ainda que a utilização de diagonais equivalentes no MEF não reduz significativamente o número de nós, e conseqüentemente o custo computacional, mas exige maior custo de modelagem. Conclui-se não ser vantajoso o uso de diagonais equivalentes no MEF.

Análise semelhante das diagonais de alvenaria foi realizada através do software Ftool e percebeu-se que os deslocamentos horizontais são mais discrepantes em ambos os casos, variando em um intervalo de +35% a -40% do deslocamento horizontal do pórtico com painel inteiro. As variações no deslocamento horizontal no pórtico são ainda maiores se a referência for o deslocamento horizontal obtido com a diagonal de maior largura (menor deslocamento). Neste caso o intervalo de variações vai de 0% a 120%. A mesma análise feita com os resultados obtidos com o MEF apresentou intervalo de variações de 0% a 20%.

Dito isso, verifica-se que o conceito de diagonais equivalentes deve ser utilizado com cautela no Ftool, pois embora algumas equações tenham resultado em valores satisfatórios para este modelo, os resultados podem divergir consideravelmente para materiais com outras propriedades e estruturas com condições de contorno diferentes. Análise posterior dos pórticos para ambos os métodos de modelagem simulando os pórticos sem o preenchimento de alvenaria em seu interior revelou que o deslocamento para o MEF foi de 3,27 mm, enquanto no Ftool foi de 4,82 mm, uma diferença de 47,40%. Isso demonstra que o modelo utilizado no Ftool deve ser ajustado.

Sugere-se, para trabalhos futuros, o que segue:

- Determinar experimentalmente o módulo de elasticidade do prisma de alvenaria para diferentes tipos de blocos;
- Utilizar pórticos de diferentes dimensões, propriedades de materiais e condições de contorno;
- Simular os blocos de alvenaria juntamente com a argamassa de assentamento;
- Analisar a influência de aberturas no painel de alvenaria;
- Analisar a influência da alvenaria em pórticos de múltiplos pavimentos e com pilares intermediários.

## REFERÊNCIAS

AL-CHAAR, G. **Evaluating strenght and stiffness of unreinforced masonry infill structures**. Washington: US Army Corps Of Engineers, 2002.

ALVA, G. M. S.; KAMINSKI JR, J.; MOHAMAD, G.; SILVA, L. R. Serviceability limit state related to excessive lateral deformations to account for infill walls in the structural model. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 8, n.3, p. 390-426, junho, 2015.

ALVARENGA, R. C. S. S. **Análise teórico-experimental de estruturas compostas de pórticos de aço preenchidos com alvenaria de concreto celular autoclavado**. 2002. 331f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

ANSYS, 2008. Versão 11.

ANSYS ACADEMIC TEACHING NA STU BRATISLAVA. **CONTA171 2-D Surface-to-surface Contact**. Disponível em: <[http://www.ansys.stuba.sk/html/elem\\_55/chapter4/ES4-171.htm](http://www.ansys.stuba.sk/html/elem_55/chapter4/ES4-171.htm)> Acessado em: 19 jun. 2016.

\_\_\_\_\_. **PLANE182 2-D Structural Solid**. Disponível em: <[http://www.ansys.stuba.sk/html/elem\\_55/chapter4/ES4-182.htm](http://www.ansys.stuba.sk/html/elem_55/chapter4/ES4-182.htm)> Acessado em: 19 jun. 2016.

\_\_\_\_\_. **TARGE169 2-D Target Segment**. Disponível em: <[http://www.ansys.stuba.sk/html/elem\\_55/chapter4/ES4-169.htm](http://www.ansys.stuba.sk/html/elem_55/chapter4/ES4-169.htm)> Acessado em: 19 jun. 2016.

ARAÚJO, J. M. de. **Curso de concreto armado**. Rio Grande: Dunas, 2014. v.1, 4.ed.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 15812-1**: Alvenaria Estrutural – Blocos cerâmicos. Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15270-1**: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação. Rio de Janeiro, 2005.

BARUA, H. K.; MALLICK S. K. Behaviour of mortar infilled steel frames under lateral load. **Building and environment**, Oxford, v. 12, n.4, p. 263-272, 1977.

BENJAMIN, J. R. Variability analysis of shear wall structures. In: STATE OF THE ART SYMPOSIUM, 1968, São Francisco. **Anais...** São Francisco: Earthquake Engineering Research Institute, 1968. p. 45-52.

BENJAMIN, J. R.; WILLIAMS, H. A. The Behavior of One-Story Reinforced Concrete Shear Walls. **Journal of the Structural Division**, Baltimore, vol. 83, n.3, p. 1-149, 1957.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA S304.1**: Design of Masonry Structures. Toronto, 2004.

CARVALHIDO, A. S. L. **Avaliação experimental e numérica da influência dos painéis de enchimento de alvenaria de tijolo na rigidez e resposta sísmica de estruturas de betão armado**. 2009. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, 2009.

CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. São Paulo: Pini, 2009, v. 2, 1.ed.

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**, Christchurch, v.40, n.2, p. 69-77, junho, 2007.

FLANAGAN, R. D.; BENNETT, R.M. In-plane Analysis of Masonry Infill Materials. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, Oakland, v.6, n.4, p. 176-182, novembro, 2001.

GOSH, A, K.; AMDE, A. Finite Element Analysis of Infilled Frames. **Journal of Structural Engineering**, Baltimore, v. 128, n.7, p. 881-889, julho, 2002.

HOLMES, M. Steel frames with brickwork and concrete infilling. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, London, v. 19, n.4, p. 473-478, agosto, 1961.

INFOESCOLA. **Muro das Lamentações.** Disponível em: <<http://www.infoescola.com/religiao/muro-das-lamentacoes/>> Acessado em: 2 jun. 2016.

LIAUW, T. C.; LEE, S. W. On the behavior and the analysis of multi-storey infilled frames subjected to lateral loading. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, London, v. 63, n.3, p. 641-657, setembro, 1977.

LOURENÇO, P. B. **Computational strategies for masonry structures.** 1996. 210f. Dissertação (Mestrado em Civil Engineering and Geosciences) – Delft University of Technology, TU Delft Holanda, 1996.

LOURENÇO, P. B.; OLIVEIRA, D. V.; FONSECA, G. M.; SILVA, R. M. Simulação da Rotura de Painéis de Alvenaria em Estruturas Porticadas. In: JPEE 98 – JORNADAS PORTUGUESAS DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS, 1998, Lisboa. **Anais...** Lisboa: Ed. S.P. Santos e M. Pipa, 1998, p. 121-130.

MADIA, F. C. A. R. dos. **Estudo de pórticos preenchidos com alvenaria.** 2012. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

MAINSTONE, R. J.; WEEKS, G. A. The influence of bounding frame on the racking stiffness and strength of bricks walls. **Proceedings of the 2nd International Conference on Brick Masonry**, Building Research Establishment, Watford, England, p. 165-171, 1970.

MAINSTONE, R. J. **Supplementary Note on the Stiffness and Strength of Infilled Frames.** Garston: Building Research Establishment, 1974.

MALLICK, D. V.; GARG, R. P. Effect of openings on the lateral stiffness of infilled frames. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, London, v. 49, n.2, p. 193-209, junho, 1971.

MALLICK, D. V.; SEVERN, R. T. The Behaviour of infilled frames under static loading. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, London, v. 38, n.4, p. 639-656, dezembro, 1967.

MARINHO, I. J. P. **Projeto ótimo de estruturas metálicas de arquibancadas reutilizáveis via ANSYS.** 2002. 198f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

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

MEDEIROS, J. S.; FRANCO, L. S. **Prevenção de trincas em alvenaria através do emprego de telas soldadas como armadura e ancoragem**. São Paulo: EPUSP, 1999.

POLYAKOV, S. V. **Masonry in framed**: an investigation into the strength and stiffness of masonry infilling. Yorkshire: National Lending Library for Science and Technology, 1963.

\_\_\_\_\_. On the interaction between masonry filler walls and enclosing frame when loaded in the plane of the wall. In: Earthquake Engineering Research Institute (EERI). **Translation in Earthquake Engineering**. São Francisco: Earthquake Engineering Research Institute (EERI), 1960.

RIDDINGTON, J. R. The influence of initial gaps on infilled frames behaviour. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, London, v. 77, n.3, p. 295-310, parte 2, setembro, 1984.

SANTOS, R. E. dos. **A armação do concreto no Brasil**: história da difusão do sistema construtivo concreto armado e da construção de sua hegemonia. 2008. 327f. Tese (Doutorado) – Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SILVA, L. R. **Modelagem de pórticos de concreto armado preenchidos com a consideração de aberturas nos painéis de alvenaria**. 2014. 176f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2014.

SILVA, R. L. **Avaliação de pórticos planos de aço considerando a contribuição da alvenaria pelo modelo de bielas e tirantes**. 2011. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2011.

SMITH, B. S. Lateral Stiffness of Infilled Frames. **Journal of the Structural Division**, Baltimore, v. 88, n.6, p. 183-226, 1962.

SMITH, B. S. Behaviour of square infilled frames. **Journal of the Structural Division**, Baltimore, v. 92, n.1, p. 381-403, 1966.

SMITH, B. S. The composite behaviour of infilled frames. **Tall Buildings**, Londres, p. 481-493, 1967a.

SMITH, B. S. Methods of predicting the lateral stiffness and strength of multi-storey infilled frames. **Building Science**, Oxford, v. 2, n.3, p. 247-257, 1967b.

SMITH, B. S.; CARTER, C. A method of analysis for infilled frames. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, Londres, v. 44, n.1, p. 31-48, 1969.

SORIANO, H. L.; LIMA, S. S. **Método de elementos finitos em análise de estruturas**. São Paulo: EDUSP, 2003.

SOUZA, R. M. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Apostila Núcleo de Instrumentação e computação aplicada à Engenharia. Belém, 2003

STANDARDS NEW ZEALAND. **NZS 4230**: Design of Reinforced Concrete Masonry Structures. Wellington, 2004.

TANAKA, E. S. A. S. **Influência da alvenaria dotada de aberturas na rigidez global de um edifício**. 2011. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

TEEWUEN, P. A. **Lateral Behavior of Steel Frames with Discretely Connected Precast Concrete Infill Panels**. 2009. 195f. Tese (Doutorado – Department of Structural Design) – Eindhoven University of Technology, Holanda, 2009.

THOMAS, F. G. The strength of brickwork. **The Structural Engineer**, Londres, v. 31, n.2, p. 35-41, fevereiro, 1953.

WOOD, R. H. The stability of tall buildings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**. Londres, v. 11, n.1, p. 69-102, setembro, 1958.

WORDELL, F. **Avaliação da instabilidade global de edifícios altos**. 2003. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.