



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ ROMÁRIO RIBEIRO

**INTERAÇÃO ENTRE ALVENARIA E ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO:
CONTRIBUIÇÃO PARA SIMULAÇÕES NUMÉRICAS**

Pau dos Ferros/RN

2019

JOSÉ ROMÁRIO RIBEIRO

**INTERAÇÃO ENTRE LVENARIA E ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO:
CONTRIBUIÇÃO PARA SIMULAÇÕES NUMÉRICAS**

Monografia apresentado pelo aluno **José Romário Ribeiro**, ao Conselho do Curso Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade Federal Rural do Semi-Árido Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros/RN, como requisito parcial para obtenção título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Matheus Fernandes de Araújo Silva – UFERSA

Pau dos Ferros/RN

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Centro multidisciplinar de Pau dos Ferros (BCPDF)
Setor de Informação e Referência (SIR)

R484i Ribeiro, José Romário.
 Interação entre alvenaria e estrutura de concreto armado:
 contribuição para simulações
 Numéricas / José Romário Ribeiro. - 2019.
 32 f. : il.

Orientador: Matheus Fernandes de Araújo Silva. Monografia
(graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil, 2019.

1. Alvenaria de vedação. 2. Pórticos. 3. análise numérica. I. Silva,
Matheus Fernandes de Araújo, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JOSÉ ROMÁRIO RIBEIRO

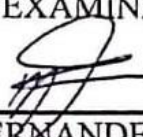
**INTERAÇÃO ENTRE ALVENARIA E ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO:
CONTRIBUIÇÃO PARA SIMULAÇÕES NUMÉRICAS**

Monografia apresentado pelo aluno **José Romário Ribeiro**, ao Conselho do Curso Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade Federal Rural do Semi-Árido Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros/RN, como requisito parcial para obtenção título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Matheus Fernandes de Araújo Silva – UFERSA

APROVADA EM: 14/08/2019

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. MATHEUS FERNANDES DE ARAÚJO SILVA
Presidente



Engenheira. Esp. FABIOLA LUANA MAIA ROCHA
1º Membro



Engenheiro. Bel. JOSE HENRIQUE MACIEL DE QUEIROZ
2º Membro

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, coragem, Saúde, paz e tantas bênçãos alcançadas.

Agradeço ao meus Pais e minhas irmãs por todo apoio e companheirismo durante toda essa caminhada.

Agradeço ao meu orientador Matheus Fernandes pela paciência, compromisso e conhecimentos compartilhados durante toda a vida acadêmica e na construção desse trabalho.

Agradeço aos funcionários da UFERSA, em especial os professores que contribuíram no meu aprendizado e possibilitaram a minha chegada até esse momento.

Agradeço a todos os meus amigos, pelos esforços e gentilezas repassadas desde o início do curso. Bem como, a todas as pessoas que contribuíram nessa caminhada.

RESUMO

A alvenaria de vedação é um dos subsistemas mais predominantes na construção civil de elevada rigidez com consequente participação na resistência dos pórticos estruturais, com isso, neste trabalho são apresentadas análises numéricas em modelos de pórticos preenchidos avaliando o comportamento estrutural considerando a interação entre a alvenaria de vedação e os elementos estruturais de concreto armado. Para tanto, realiza o estudo na literatura de resultados determinísticos de modelos numéricos na análise estrutural e investiga-se a distribuição de tensões sobre a alvenaria em pórticos com múltiplos pavimentos e prumadas com a aplicação do método dos elementos finitos. Os resultados mostraram que a alvenaria aumenta a rigidez dos pórticos de múltiplos pavimentos apresentando tensões consideráveis nos apoios e viga baldrame com a elevação do carregamento, dessa forma, visa contribuir em projetos estruturais mais criteriosos considerando a alvenaria de vedação no dimensionamento das estruturas, atentando-se para danos nas vedações verticais com a completa solidarização do sistema parede-estrutura.

Palavras-chave: Alvenaria de vedação, pórticos, análise numérica.

ABSTRACT

The sealing masonry is one of the most prevalent subsystems in the construction of high rigidity with consequent participation in the resistance of the structural porticos, thus, in this work are presented numerical analyses in models of porticos Completed evaluating the structural behavior considering the interaction between the sealing masonry and the structural elements of reinforced concrete. To this end, it carries out a study in the literature of deterministic results of numerical models in the structural analysis and investigates the distribution of stresses on the masonry in multi-storey and prumed frames with the application of the method of the elements Finite. The results showed that the masonry increases the stiffness of the multistorey porticos with considerable tensions in the supports and baldrame girder with the elevation of loading, thus, aims to contribute in more judicious structural projects Considering the sealing masonry in the dimensioning of the structures, paying attention to damage to the vertical seals with the complete solidarity of the wall-structure system.

Keywords: Sealing masonry, porticos, numerical analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Bloco com furos posicionados na horizontal	14
Figura 2: Bloco com furos posicionados na vertical	14
Figura 3: Prismas de alvenaria com dois e três blocos cerâmicos	14
Figura 4: Diferentes modos de falhas de quadros preenchidos com alvenaria.....	19
Figura 5 – Modelo de pórtico utilizado	21
Figura 6 – Malha de elementos finitos	22
Figura 7 – Nó de obtenção das tensões máximas de compressão	23
Figura 8 – Modelos de pórticos preenchidos analisados	24
Figura 9 – Análise das tensões máximas de compressão em função da variação do número de pavimentos.....	26
Figura 10 – Modelo de pórtico com múltiplas prumadas.....	27
Figura 11 – Análise das tensões máximas de compressão em função da variação na relação (H/L)	28
Figura 12 – Tensões de tração na alvenaria.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de compressão para prismas com dois blocos	15
Tabela 2 - Resultados dos ensaios de compressão para prismas com três blocos	15

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVO GERAL.....	12
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3	REFERÊNCIAL TEÓRICO	13
3.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ALVENARIAS DE VEDAÇÃO.....	13
3.2	SIMULAÇÕES DE ALVENARIA EM ELEMENTOS FINITOS	15
3.3	INTERAÇÃO ALVENARIA/ESTRUTURA	17
4	METODOLOGIA.....	20
4.1	GEOMETRIA DO PROBLEMA	20
4.2	MODELAGEM NUMÉRICA	21
4.3	DISPOSIÇÃO DE CARGAS	22
4.4	MÉTODOS DE ANÁLISES	23
5	RESULTADOS	24
5.1	ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS TENSÕES	24
5.2	ANÁLISE DAS TENSÕES VERTICAIS COM SEPARAÇÃO ENTRE A BASE DA ALVENARIA E VIGA BALDRAME	28
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com a verticalização dos grandes centros urbanos devido ao constante crescimento populacional, surgiu uma maior preocupação com a estabilidade global das estruturas, empregando na sua concepção estrutural métodos construtivos e modelos computacionais que represente com a maior fidelidade possível o comportamento real das edificações, garantindo maior estabilidade e eficiência estrutural, visando projetos mais econômicos (GUERRA *et al*, 2018).

Nesse sentido, são necessárias informações mais realistas sobre a estabilidade global dos edifícios, sobretudo em construções convencionais nas quais a contribuição da alvenaria de vedação na resistência horizontal dos edifícios é de grande importância, tendo em vista que as análises dos esforços horizontais, tais como a ação do vento e desaprumo, são responsáveis por deslocamentos laterais consideráveis nas estruturas. Por isso, é bastante conveniente considerar nas concepções de projetos estruturais a influência do preenchimento de alvenaria na estabilidade global da estrutura reticulada, possibilitando empregar vigas e pilares menos robustos (FERREIRA; CRUZ; BASTOS, 2019).

No entanto, a interação entre alvenaria de vedação e a estrutura é comumente desprezada, contribuindo para dimensionamentos mais conservadores quanto aos possíveis danos ocasionados nas vedações verticais pela transmissão de esforços dos elementos estruturais, bem como, critérios de projetos mais específicos e econômicos. Nesse caso, a prática usual considera apenas o peso próprio da alvenaria como carregamento nas vigas e lajes pela complexidade da análise do mecanismo de interação da alvenaria aos elementos estruturais, e para o seu correto dimensionamento são necessários modelos matemáticos detalhados e informações de projeto suficiente, considerando entre outros parâmetros as propriedades mecânicas da alvenaria (PITANGA, 2017).

Com uma abordagem computacional é possível executar amplas simulações numéricas para a análise estrutural de alvenarias com base em uma escolha categórica dos parâmetros relativos ao objetivo do estudo, assim sendo a escolha da abordagem numérica deve prescrever de antemão a finalidade da análise estrutural, a complexidade e dimensão da estrutura, conhecimento da geometria e propriedades dos materiais, entre outros. Isso porque, ainda não é possível uma análise realista da alvenaria que adote todos os aspectos relativos à simulação numérica (SALOUSTROS, 2018).

Dessa forma, o objetivo principal desse trabalho é realizar simulação numérica em edifícios de múltiplos pavimentos por meio do método dos elementos finitos (MEF) considerando a interação entre os painéis de alvenaria e os quadros estruturais circundantes. Para tanto, foi realizada uma revisão bibliográfica acerca do tema em revistas indexadas, bem como, propostos modelos de pórticos e realizado análise numéricas por meio da discretização dos pórticos preenchidos em elementos finitos de barra e casca.

2 OBJETIVO GERAL

Simular edifícios de múltiplos pavimentos em estruturas usuais de concreto armado considerando a interação entre as alvenarias e os elementos estruturais.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a distribuição de tensões sobre a alvenaria;
- Analisar os diagramas de momento fletor e força cortante sobre a viga baldrame.
- Propor modelo em elementos finitos para analisar a interação do sistema viga-parede no pavimento térreo.

3 REFERÊNCIAL TEÓRICO

Para estruturar de forma prática a pesquisa, dividiu-se o referencial teórico em três partes. Onde a subseção 2.1 abordam-se sobre as propriedades mecânicas das alvenarias de vedação; em 2.3 apresenta-se informações sobre simulações numéricas de alvenaria em elementos finitos; e em 2.4 faz-se uma explanação sobre a interação entre a alvenaria e a estrutura.

3.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ALVENARIAS DE VEDAÇÃO

As alvenarias de vedação são subsistemas da construção civil composta por um conjunto de unidades menores, em geral blocos cerâmicos, pedras, tijolos, conformadas por material cimentício denominado juntas de argamassa, posicionados em fiadas na horizontal e justaposta em camadas que se sobrepõem (CAPORRINO, 2018). Tem por finalidade, segundo Sabbatini (2002), o compartimento de ambientes internos e proteger contra ação de agentes agressivos, separando os espaços internos e externos. Além disso, deve garantir o conforto térmico e acústico, estanqueidade, segurança na utilização e durabilidade (PEREIRA, 2005).

As propriedades mecânicas, segundo Queiroz (2018), referem-se ao comportamento mecânico do material quando submetido a tensões, como por exemplo, resistência a compressão, resistência a tração, resistência ao cisalhamento, modulo de elasticidade, entre outros.

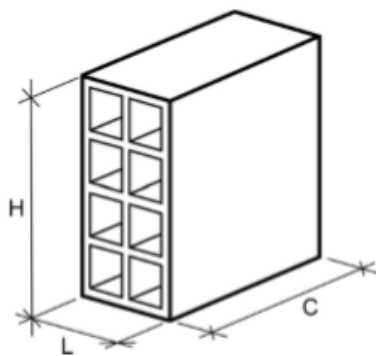
As características mecânicas das paredes de vedação dependem das particularidades de seus componentes, unidades de alvenaria e juntas de argamassa. Dessa forma, a capacidade resistente das alvenarias depende da aderência do conjunto, do vínculo com os elementos estruturais e da geometria das paredes. Assim, as solicitações, em partes, serão resistidas pela resistência a compressão dos blocos cerâmicos e pela resistência de aderência entre os blocos e a argamassa de assentamento (SILVA, 2003).

Assim, segundo Sousa e Sousa (2016) a resistência a compressão da alvenaria de vedação é requerida quase que em sua totalidade pela resistência a compressão do bloco, tendo pouca representação da resistência da argamassa que, por sua vez, tem maior contribuição em propriedades como módulo de elasticidade, retração, flexão entre outras.

A ABNT NBR 15270-1:2005 (Tabela 4) especifica os valores mínimos de resistência de compressão para os blocos cerâmicos de vedação com base na posição dos furos:

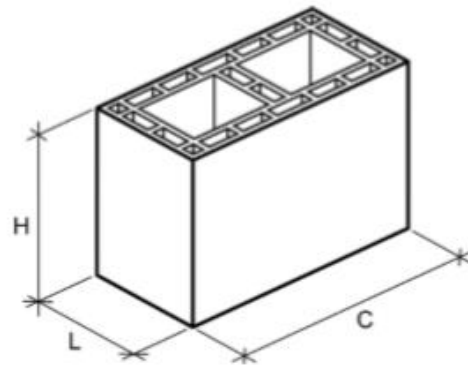
- Para blocos posicionados com furos na horizontal, conforme apresentado na Figura 1, a resistência à compressão (f_b) deve ser maior ou igual a 1,5 Mpa.
- Para blocos posicionados com furos na vertical, conforme apresentado na Figura 2, a resistência à compressão (f_b) deve ser maior ou igual a 3,0 Mpa.

Figura 1: Bloco com furos posicionados na horizontal



Fonte: ABNT, 2005.

Figura 2: Bloco com furos posicionados na vertical



Fonte: ABNT, 2005.

O módulo de elasticidade da argamassa de assentamento é muito importante na avaliação do nível de deformação da alvenaria, tendo como uma das suas principais funções a capacidade de absorver eventuais perturbações no subsistema. Portanto, a capacidade de absorver deformações pela argamassa está associado ao seu módulo de deformação, devendo ter o melhor desempenho possível sem se romper (NAKAKURA; CINCOTTO, 2004).

Segundo Nascimento (2015), para determinar a resistência a compressão da alvenaria é muito mais viável economicamente utilizar prismas de alvenaria, conforme visualizado na Figura 3, do que ensaiar paredes de alvenarias completas, tendo em vista a grande quantidade de material e modelos necessários para o ensaio.

Figura 3: Prismas de alvenaria com dois e três blocos cerâmicos



Fonte: Nascimento, 2015.

Assim, valores médios da resistência a compressão de prismas de alvenaria com dois e três blocos cerâmicos são apresentados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. Resultados obtidos por ensaios realizados por Azevedo (2010).

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de compressão para prismas com dois blocos

Tipo	Identificação	Dimensão final do bloco (cm x cm)	Área (cm ²)	Carga Máxima (KN)	Tensão (KN/cm ²)
Resultados dos prismas com 2 blocos	PNR.2	9 x 19	171	9,72	0,057
	PCRFr3.2	15 x 19	285	50,43	0,177
	PCRM3.2	15 x 19	285	45,47	0,159
	PCRM3.2C	21 x 19	399	120,74	0,303

Fonte: Adaptado de Azevedo, 2010.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de compressão para prismas com três blocos

Tipo	Identificação	Dimensão final do bloco (cm x cm)	Área (cm ²)	Carga Máxima (KN)	Tensão (KN/cm ²)
Resultados dos prismas com 3 blocos	PNR.3	9 x 19	171	9,49	0,055
	PC.3	10 x 19	190	18,05	0,095
	PCRFr1,5.3	12 x 19	228	39,56	0,174
	PCRFr3.3	15 x 19	285	45,03	0,158
	PCRM3.3	15 x 19	285	52,71	0,185
	PCRf3.3	15 x 19	285	59,02	0,207
	PCRFr1,5.3C	18 x 19	342	94,47	0,276
	PCRFr3.3C	21 x 19	399	100,25	0,251
	PCRM3.3C	21 x 19	399	109,12	0,273

Fonte: Adaptado de Azevedo, 2010.

3.2 SIMULAÇÕES DE ALVENARIA EM ELEMENTOS FINITOS

A alvenaria é um material heterogêneo com comportamento complexo influenciado pelas propriedades mecânicas das suas unidades constituintes, variando conforme a escala de análise do problema em uma simulação numérica (OLIVEIRA; SILVA, 2019). Dessa forma, segundo Lourenço (2013), existem abordagens de modelagens numéricas diferentes dependendo da

precisão e escala desejada. Entre elas, podemos citar a macromodelagem, a micromodelagem simplificada e a micromodelagem detalhada.

Na macromodelagem consideram-se as propriedades da alvenaria como homogêneas, não necessitando de muitos dados de entrada, na micromodelagem simplificada o bloco e a argamassa são considerados como elementos contínuos analisados como um único material e na interface unidade/argamassa representado por elementos descontínuos. A micromodelagem detalhada é utilizada na abordagem de resultados localizados, pois ela analisa o comportamento de cada material constituinte da alvenaria, bloco e argamassa, individualmente (OLIVEIRA; SILVA, 2019).

Problemas como deslocamentos excessivos, rotações, flambagem, deformações, efeitos globais de segunda ordem, a não linearidade física dos materiais, entre outros, foram predominantemente estudados por meio do método dos elementos finitos ao longo do tempo, proporcionando a discretização do sistema estrutural em pequenas partes, elementos finitos, mantendo as propriedades originais, influenciando na escolha de modelos estruturais específicos (BISCHOFF et al 2018).

Dessa forma, existe uma gama de possibilidades de análises utilizando o método dos elementos finitos, entre elas o estudo do efeito isolado de cada parâmetro na estabilidade global de pórticos preenchidos sob diferentes condições de contorno (MEDEIROS, 2018). No entanto, a modelagem numérica deve prescindir de um estudo experimental para compreender o comportamento real das estruturas, bem como, dos materiais empregados, visando calibrar o modelo numérico (RAMOS, 2002).

Em outro caso, segundo Asteris (2013), pode ser executado modelagem de alvenaria como material bifásico por meio de aproximações intermediárias, empregando elementos contínuos para representar as unidades expandidas (blocos) e elementos descontínuos para representar a interface entre bloco e argamassa e o comportamento das juntas de argamassa, proporcionando menor custo computacional e criando um modelo aplicável a diferentes estruturas.

Muitos autores realizaram pesquisas em pórticos preenchidos com o método dos elementos finitos (MEF), por proporcionar ao longo do tempo uma análise cada vez mais refinada do comportamento da estrutura, com modelagens muito mais detalhadas principalmente sobre a interface entre a estrutura e a alvenaria.

Gomes (2001) desenvolveu um modelo numérico para analisar quantitativamente o ensaio de compressão uniaxial de prismas de blocos de concreto e cerâmicos, comparando com um estudo experimental com seis modelos diferentes de prismas. O método de elementos finitos

foi utilizado para verificar a resposta estrutural dos prismas de alvenaria em uma análise tridimensional. Os resultados mostraram uma boa concordância nos valores obtidos entre os dois modelos.

Moura, Costa e Lourenço (2016) executaram simulações de alvenaria com o método dos elementos finitos, considerando estratégias da macromodelação sobre uma malha de elementos finitos utilizando elementos no estado plano de tensões 2D. Os resultados obtidos mostraram que os modelos numéricos são capazes de reproduzir o comportamento plano das alvenarias de pedras quando sujeitas a carregamentos verticais e horizontais, comprovado pelos autores por meio de modelos experimentais.

Outro estudo aplicando o método dos elementos finitos foi executado por Pedreiro (2011) que realizou a discretização de prismas de alvenaria estrutural por meio dos elementos finitos considerando a análise não linear dos materiais constituintes, fazendo comparação a outro modelo experimental realizado por Albertini (2009). Os resultados permitiriam avaliar a eficiência do modelo de ruptura Mohr-Coulomb e os redutores dos módulos de elasticidade dos materiais.

Medeiros (2015) desenvolveu um estudo de uma nova modelagem computacional para verificar a interação entre painéis de alvenaria e os elementos estruturais, para tanto foi realizado simulação do comportamento da parede utilizando o método dos elementos finitos de barra. A análise consistiu basicamente em avaliar as deformações da estrutura de suporte e dos deslocamentos verticais considerando comportamento elástico linear dos materiais. Os resultados comprovam a eficiência da modelagem proposta por assemelhar-se a modelos experimentais de referência.

3.3 INTERAÇÃO ALVENARIA/ESTRUTURA

A solidarização das paredes de alvenaria nos elementos estruturais de concreto armado provoca solicitações adicionais sobre as alvenarias de vedação que passam a restringir os deslocamentos e deformações sofridas pelos elementos estruturais, ocasionando o aumento de tensões sobre os painéis de alvenaria que atuam nestas condições como chapas rígidas de contraventamento dos pórticos estruturais. Como a alvenaria possui uma rigidez significativa deforma-se muito pouco e por isso estará mais susceptível a formação de fissuras, trincas e até mesmo chegar mais rápido ao colapso (TRAMONTIN, 2005).

Por esse motivo, Thomaz e Helene (2000) associam a qualidade das paredes de vedação ao sistema estrutural reticulado, ou seja, quanto melhor o desempenho dos elementos estruturais que a envolve, desde a seu nivelamento, prumo até o comportamento mecânico, maior a

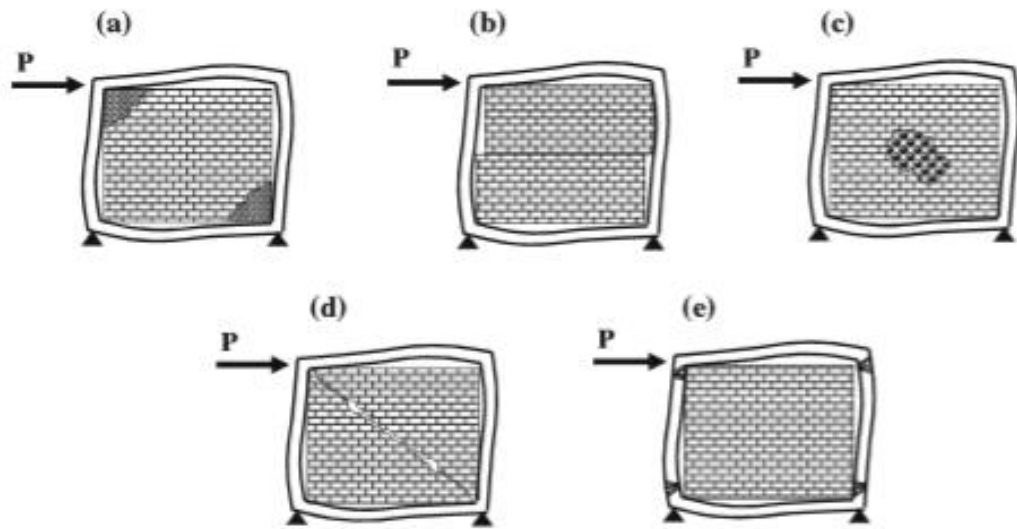
eficiência e consequente vida útil da alvenaria. Por isso, segundo Sperotto (2009) é somente por meio do mecanismo de ligação que as deformações dos elementos estruturais podem ou não serem transmitidas às alvenarias de vedação, logo o seu bom desempenho está associado ao método construtivo.

Apesar disso, as paredes de alvenaria, segundo Alva *et al.* (2015), são consideradas somente como um carregamento vertical distribuído sobre os elementos estruturais, com a função de vedação, ou seja, a sua rigidez é desprezada nos modelos de análise estrutural, sendo que, quando fixadas às estruturas apórticadas, os painéis de alvenarias contribuem na resistência as ações horizontais.

Existem vários estudos sobre a interação dos painéis de alvenaria com as estruturas apórticadas, tanto de concreto armado como de aço. Nas estruturas de aço por exemplo, segundo Medeiros (2018), a alvenaria tem grande influência na resistência do pórtico ao seu plano de cisalhamento enquanto o quadro estrutural de aço circundante contribui na ductibilidade do sistema. Por outro lado, foi relatado pelo autor que quando considera folga ou juntas de ligação entre a viga superior com o painel de alvenaria observou uma redução das fissuras principais e cargas máximas na parede de alvenaria em torno de 50%. Resultados parecidos foram obtidos quando a ligação foi executada com argamassa de baixa qualidade. O evento foi atribuído à eliminação dos esforços de cisalhamento existentes entre os dois componentes quando estes estavam totalmente solidarizados.

Asteris *et al* (2011) traz cinco modos de falhas de quadros preenchidos com alvenaria observados experimentalmente e analiticamente ao longo do tempo, conforme apresentado na Figura 1: (a) modo de esmagamento dos cantos; (b) modo de cisalhamento deslizante; (c) modo de compressão diagonal; (d) modo de rachadura diagonal; e (e) modo de falha de quadro.

Figura 4: Diferentes modos de falhas de quadros preenchidos com alvenaria



Fonte: Guerrero *et al* (2014)

4 METODOLOGIA

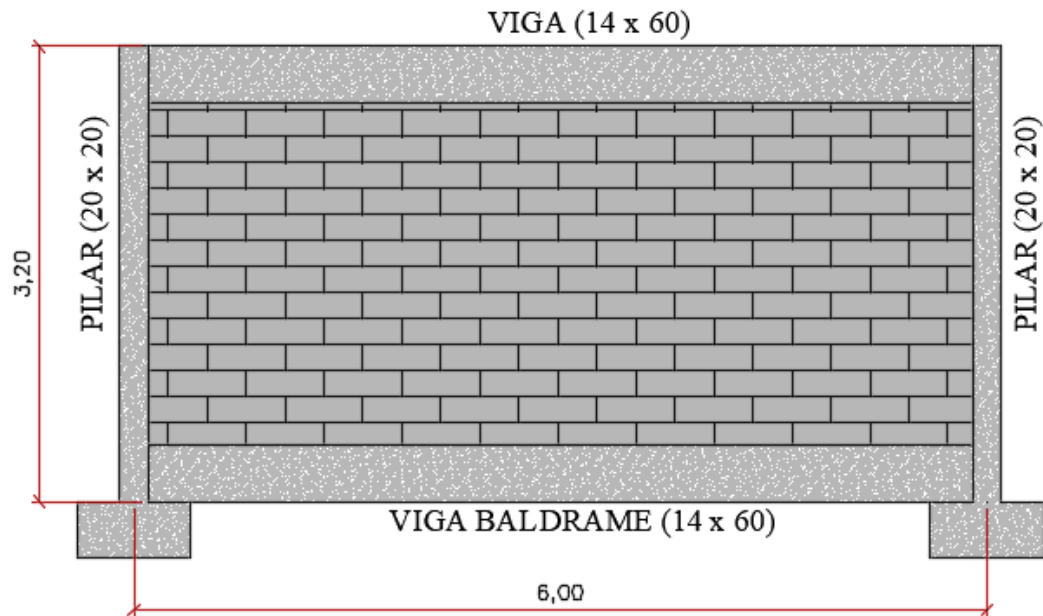
O estudo proposto neste trabalho foi desenvolvido por meio de uma revisão bibliográfica, definida por Botelho, Cunha e Macedo (2011) como um método específico de busca e análise de trabalhos em acervos literários, realizada principalmente em revistas indexadas, com o objetivo de buscar informações de análises em elementos finitos sobre a interação entre a alvenaria e a estrutura reticulada, bem como, modelos experimentais em conformidades com a análise numérica. Além disso, foram executados no programa computacional SAP2000 versão 20.0 simulações numéricas em elementos finitos de barra e casca dos pórticos preenchidos com alvenaria.

A pesquisa desempenhada nesse trabalho é classificada em qualitativa, pois descreve os resultados observados interpretando-os intuitivamente. Segundo Martins (2004), a pesquisa qualitativa é definida como aquela que realiza análises intensiva dos dados buscando a compreensão dos resultados, caracterizando uma posição intuitiva no momento da análise.

4.1 GEOMETRIA DO PROBLEMA

Para a análise numérica dos pórticos foi modelado uma estrutura flexível com apoios engastados e alvenaria totalmente solidarizada ao quadro estrutural, com uma altura (H) de 320 cm e comprimento (L) de 600 cm. Consideramos também uma viga superior de seção 14x60, pilares 20x20 e uma viga baldrame inferior de 14x60, conforme mostra a Figura 5. Em seguida, foram acrescidos sequencialmente ao modelado apresentado mais pavimentos e prumadas com as mesmas dimensões, a fim de analisar o estado de tensões sobre a alvenaria com diferentes configurações geométricas, bem como, verificar a influência da relação entre a altura e o comprimento dos pórticos na distribuição de tensões.

Figura 5 – Modelo de pórtico utilizado

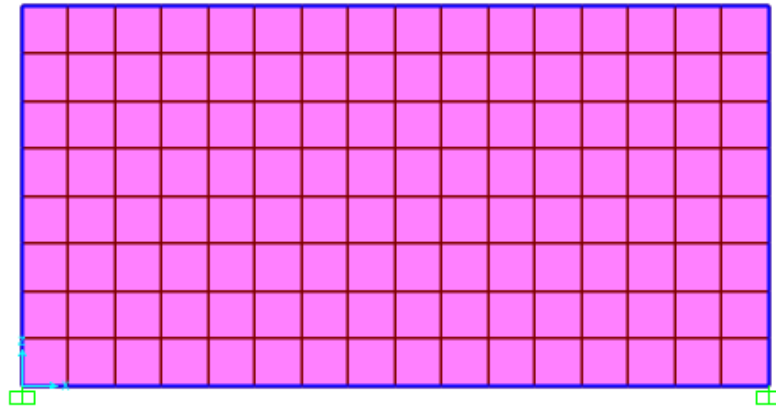


Fonte: Autoria própria, 2019.

4.2 MODELAGEM NUMÉRICA

A análise da estrutura pelo método dos elementos finitos acontece com a discretização da estrutura e alvenaria em uma malha de pequenos elementos lineares interligados, segundo Araújo (2010), pelos nós do elemento que sofrem deslocamentos axial, deslocamento transversal e rotação. Na simulação numérica foi executado uma macromodelagem considerando a alvenaria como elemento contínuo e gerado uma malha de elementos finitos retangular simples com 16 elementos na horizontal e 8 elementos na vertical comum a todos os modelos de pórticos estudados, conforme apresentado na Figura 6, seguindo a análise de convergência de malha apresentada por Amorim (2019) adequada por um modelo físico também executado pela autora.

Figura 6 – Malha de elementos finitos



Fonte: Sap2000, 2019.

Com relação aos parâmetros adotados, foi considerado material isotrópico elástico-linear tanto para as estruturas de concreto armado como para a alvenaria de vedação de blocos cerâmicos. Com isso, dada a descrição dos materiais serão necessários apenas dois parâmetros, o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν), admitindo simplificação ao modelo.

Nesse caso, os valores do módulo de elasticidade (E) e do coeficiente de Poisson (ν) utilizados para os elementos estruturais, vigas e pilares, foram adquiridos conforme a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) e para a alvenaria com base em ensaio experimental realizado por Amorim (2019) com prismas de blocos cerâmicos com dimensões de 9x19x19cm.

- Módulo de elasticidade para as estruturas de concreto armado: 24000 Mpa
- Coeficiente de Poisson para as estruturas de concreto armado: 0,2
- Módulo de elasticidade para a alvenaria: 272,544 Mpa
- Coeficiente de Poisson para a alvenaria: 0,15

Foram utilizados elementos finitos de barra (frame) para representar vigas e pilares e elementos finitos de casca (Shell-thin) para o preenchimento de alvenaria. Nas condições de contorno consideramos a restrição total dos deslocamentos horizontais e verticais, empregando na concepção dos modelos apoios engastado.

4.3 DISPOSIÇÃO DE CARGAS

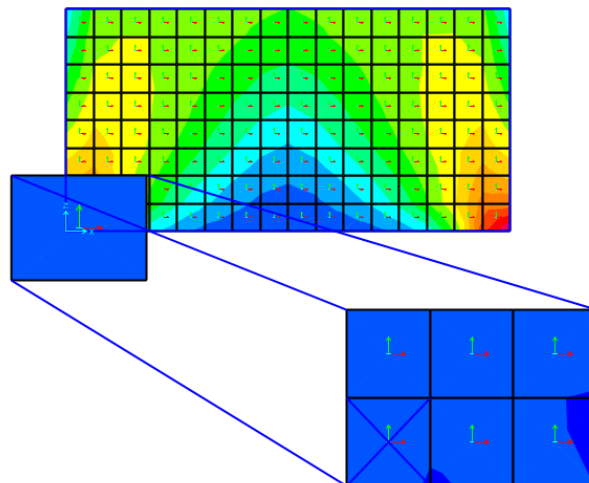
Nos modelos analisados foi disposto um carregamento vertical de cálculo ($P_d = 15 \text{ kN/m}$) distribuído sobre a viga superior de cada pavimento e um carregamento horizontal na extremidade também da viga superior em todos os pavimentos, representando as

imperfeições globais, calculada conforme o item 11.3.3.4.1 da NBR 6118:2014 Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.

4.4 MÉTODOS DE ANÁLISES

Os resultados são apresentados na forma gráfica para a combinação de ações apresentadas, em duas análises diferentes, a primeira é verificada o acréscimo de tensões máximas de compressão em função da variação do número de pavimentos e na segunda também foi observado o acréscimo de tensões máximas de compressão variando o número de prumadas do pórtico. Nos dois casos foi considerado o elemento finito mais próximo ao apoio, conforme observado na Figura 7, tendo em vista a maior concentração de tensão.

Figura 7 – Nó de obtenção das tensões máximas de compressão



Fonte: Autoria própria, 2019.

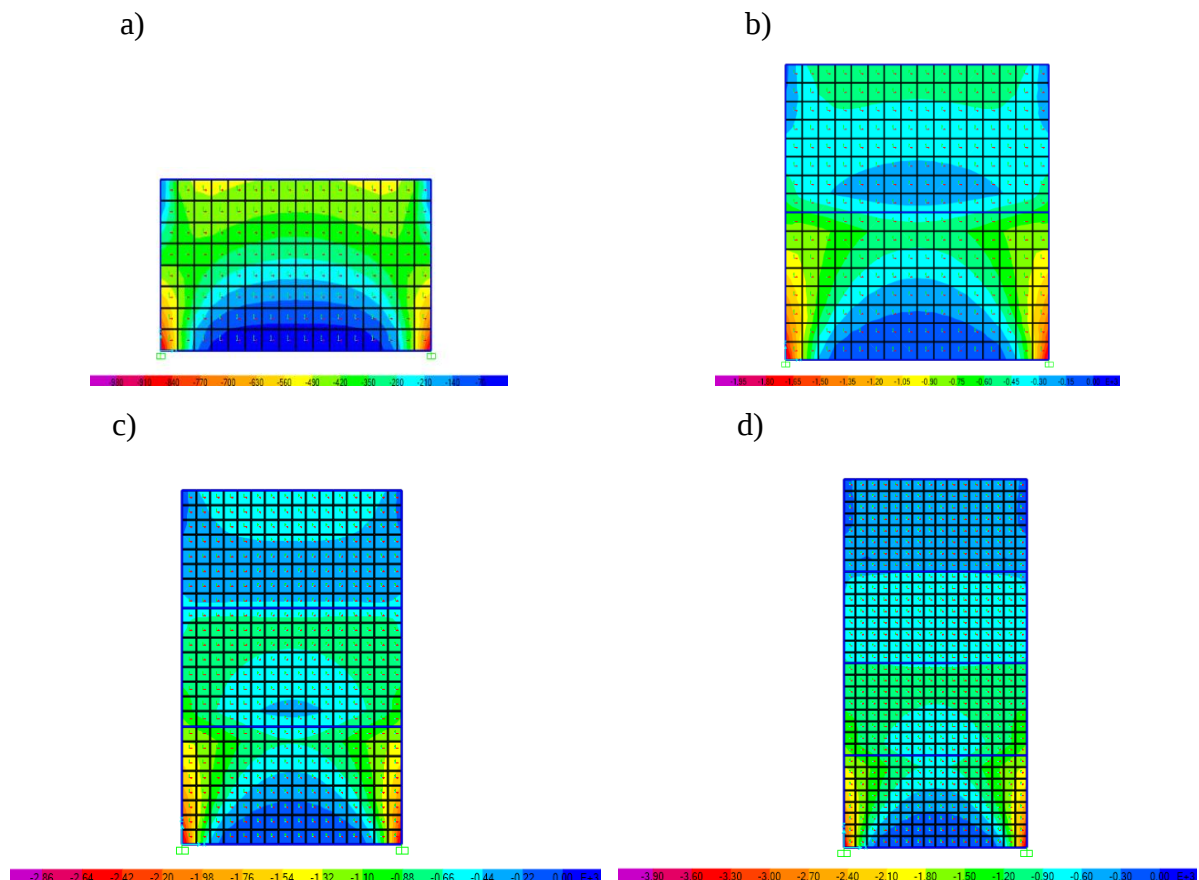
Em um segundo momento, foi realizado a análise em um novo modelo de pórtico preenchido com 4 pavimentos empregando na sua constituição a separação entre a base da alvenaria e a viga baldrame por meio do refinamento da malha no local, analisando os pontos onde apresentaram tensões de tração decorrentes da elevação do carregamento com a altura do pórtico.

5 RESULTADOS

5.1 ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS TENSÕES

A partir de uma análise paramétrica nos diferentes modelos de pórticos preenchidos, foi possível avaliar os esforços de momento fletor, força cortante e força axial sobre os painéis de alvenaria e a viga baldrame do pavimento térreo. Inicialmente, com a colocação da alvenaria além da possibilidade de perceber visualmente uma maior rigidez da estrutura como um todo, observamos que a distribuição de esforços sobre o preenchimento de alvenaria segue uma forma parabólica nos pavimentos inferiores, independentemente da continuação do carregamento proveniente aos pavimentos superiores onde a distribuição de carga acontece mais uniformemente, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 – Modelos de pórticos preenchidos analisados



Fonte: Sap2000, 2019.

Com a completa solidarização da alvenaria aos elementos estruturais, foi possível verificar a capacidade de transmissão de carga pela alvenaria e analisar a resistência do sistema global do pórtico com completa participação do preenchimento. A deformação dos elementos estruturais é totalmente influenciada pelo tipo de ligação com a alvenaria, que por sua vez, apresentará uma distribuição de tensões condizente com o tipo de fundação empregada na estrutura. Assim, para apoios isolados como nos modelos estudados ocorre uma concentração de tensões verticais na base da parede próximo aos apoios e tensões nulas ou de tração dependendo da intensidade do carregamento vertical, no meio do vão.

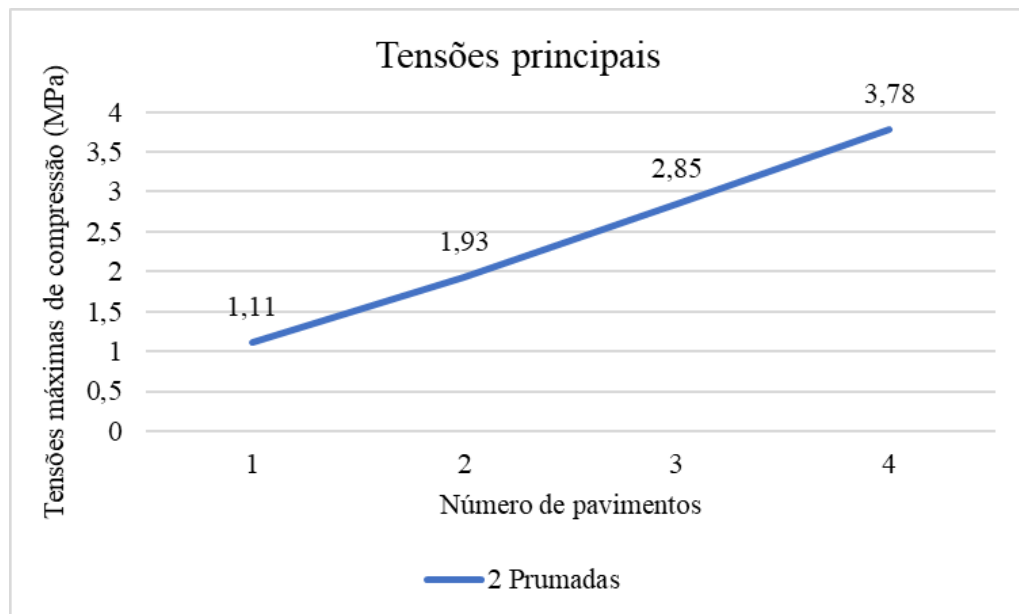
Dessa forma, nos modelos analisados de pórticos preenchidos a alvenaria oferece rigidez suficiente para induzir os esforços aos apoios (engastes) formando o sistema de bielas comprimidas sobre os painéis de alvenaria. Os esforços, principalmente de momento fletor, são direcionados para os apoios assumindo uma configuração triangular, reduzindo expressivamente valores positivos no meio do vão, pois a parede atua restringindo o deslocamento vertical da viga. Dessa forma, os valores máximos de compressão ocorrem nas extremidades da alvenaria, especificamente próximos aos apoios, gerando tensões nulas ou pequenos esforços de tração na interface entre a base da alvenaria e a viga baldrame, ocorrendo flexo-compressão nas suas extremidades e flexo-tração no meio do vão.

Como as tensões são encaminhadas para os apoios, a viga baldrame fica axialmente tracionada devido também ao surgimento de tensões cisalhantes na sua interface com a base da alvenaria, assumindo o papel de um tirante. Assim, a distribuição de tensões sobre a alvenaria segue a forma de um arco, conforme visualizado na Figura 8, fazendo com que no meio do vão a alvenaria tenda a se separar da viga. Dessa forma, o painel de alvenaria traciona a viga que ao mesmo tempo está sendo comprimida pelos pilares do pórtico.

O efeito arco originado na distribuição de tensões sobre a alvenaria depende em parte da rigidez da viga e do tipo de apoio. Assim, para vigas com seções menores que a utilizada nos modelos, mais expressivo será o arco originado e vice-versa, consequentemente maior o alastramento de tensões sobre os apoios. Aditivamente, conforme discutido acima em pavimentos superiores a distribuição de tensões sobre os painéis de alvenaria é mais uniforme, não sendo possível visualizar a ocorrência do efeito arco. Isso porque, segundo Riddington e Stafford Smith (1978, *apud* Barbosa, 2000, p. 10) mantendo constante o carregamento sobre a viga o arco originado na distribuição de tensões sobre a alvenaria obedece a relação de $H \leq 0,7L$ entre a altura (H) e comprimento (L), ou seja, para alturas superiores a $0,7L$ do vão o peso proveniente dessa porção da parede é considerada apenas como acréscimo de carga.

Com relação as tensões principais, as máximas tensões de compressão acontecem próximo aos apoios e são intensificadas com o aumento do número de pavimentos, conforme observado a Figura 9, acarretando momento fletor máximo e força cortante máxima sobre os apoios, formando um estado múltiplo de tensões variando ponto a ponto. Podendo com o acréscimo de carga danificar a estrutura e causar fissuras na alvenaria, bem como, chegar ao colapso.

Figura 9 – Análise das tensões máximas de compressão em função da variação do número de pavimentos



Fonte: Autoria própria, 2019.

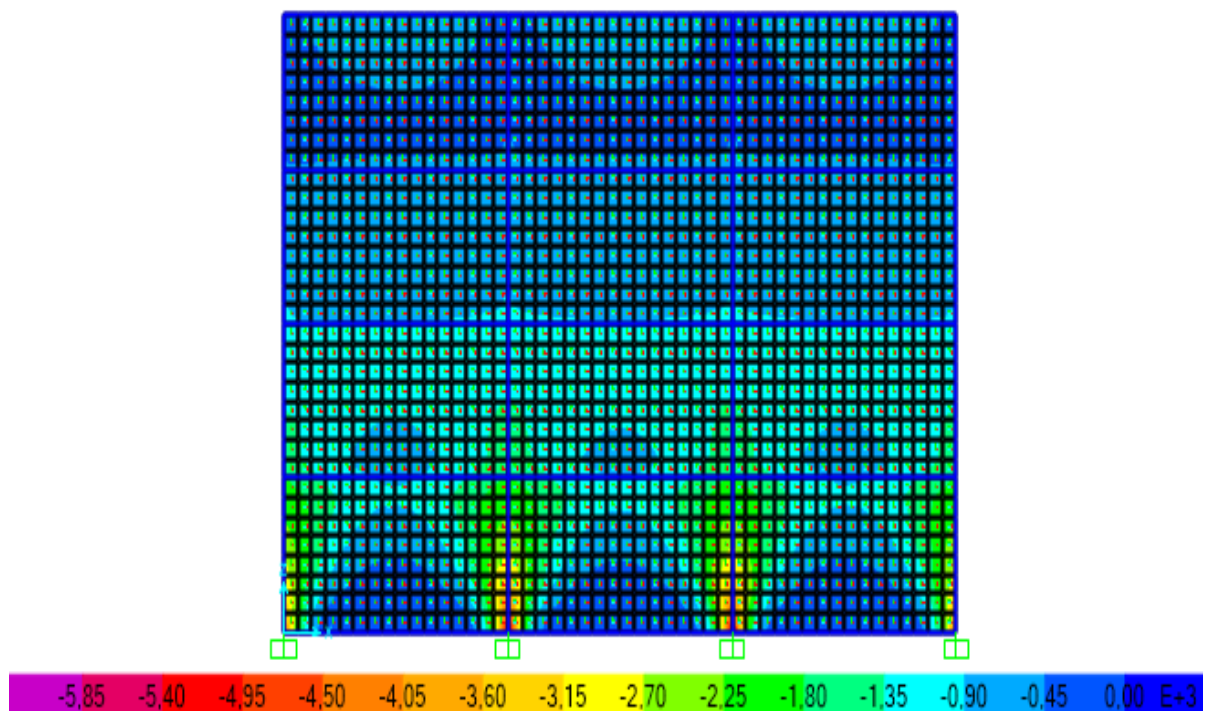
A alvenaria altera a distribuição dos esforços na estrutura, segundo Alva *et al* (2015), à medida que as ações horizontais são aplicadas aos pórticos a contribuição dos painéis de alvenaria aumentam a resistência lateral das estruturas aporticadas, onde as tensões principais mínimas formam uma diagonal comprimida sobre a alvenaria. No entanto, no estudo aplicado nesse trabalho foram considerados carregamentos verticais bem superiores que as ações horizontais representada somente pelo desaprumo, logo a distribuição dos esforços de compressão sobre as paredes foram direcionados para os pilares do modo a se intensificarem próximo aos apoios, tracionando axialmente a parte inferior da alvenaria, bem como, o meio do vão da viga baldrame.

As alvenarias de vedação não são projetadas para contribuir com a resistência dos pórticos nem para as ações horizontais, como é comumente conhecido, nem para as verticais. No entanto, isso só acontece se não ocorrer a solidarização da alvenaria ao quadro estrutural circundante, ou seja, deve haver um espaço vazio entre os dois componentes ou ser preenchido

por material mais deformável de modo a não proporcionar rigidez suficiente para ocorrer a transmissão de esforços da estrutura para as paredes de vedação. À medida que a alvenaria passa a ser solicitada pode ocorrer uma distribuição irregular das forças aplicadas, de modo a originar pontos de maior rigidez que por consequência serão mais solicitados (PARSEKIAN; HAMID; DRYSDALE, 2013).

Em uma segunda análise variando o número de prumadas dos pórticos, justificado pelos valores expressivos de tensões nos apoios intermediários e o grau de interação do sistema viga-parede. Os resultados mostraram a continuidade da formação do arco na distribuição de tensões em todos os modelos, conforme mostra a Figura 10. Dessa forma, como já esperado ocorreram uma grande concentração de tensões máximas de compressão próximos aos apoios internos, bem como, valores mais expressivos de tensões de tração no bordo inferior da alvenaria justaposta ao centro da viga baldrame.

Figura 10 – Modelo de pórtico com múltiplas prumadas

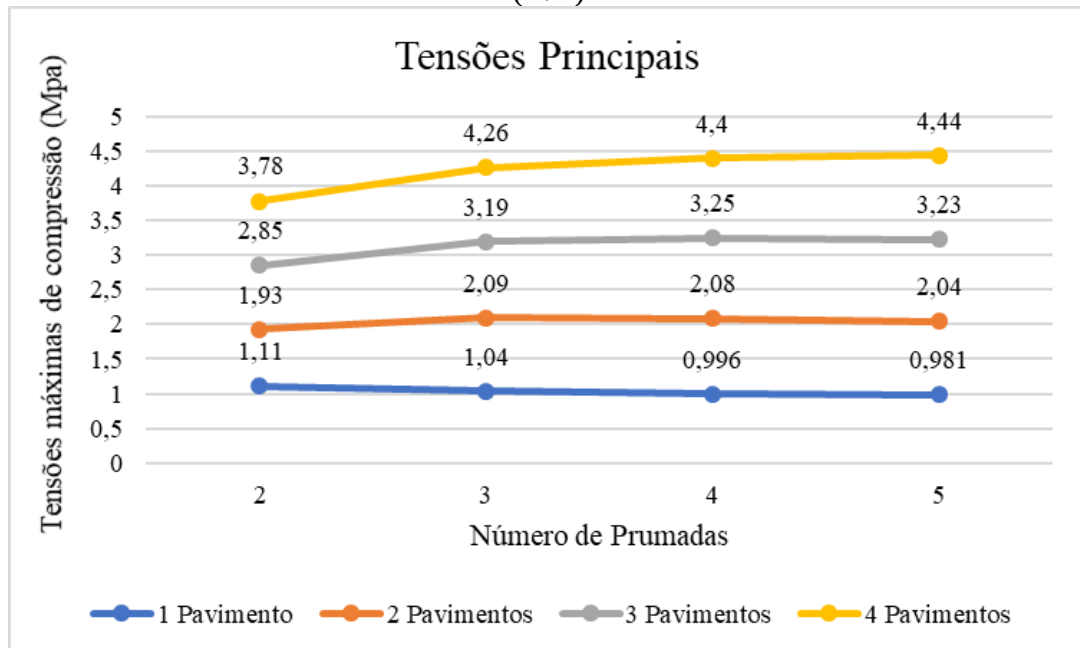


Fonte: Sap2000, 2019.

Os diagramas de momento fletor e cortante da viga baldrame seguem o mesmo padrão dos primeiros modelos. Assim, os maiores momentos fletores e forças cortantes ocorreram no pavimento inferior sobre a viga baldrame com valores máximos negativos próximos aos apoios, diminuindo gradativamente em direção ao meio do vão. As tensões verticais de compressão máximas ocorreram próximos aos pilares intermediários e são intensificadas com o aumento do

carregamento, conforme visualizado na Figura 11, onde apresenta os valores de tensões de compressão sobre o apoio externo variando o número de prumadas nos pórticos mantendo constante o número de pavimentos.

Figura 11 – Análise das tensões máximas de compressão em função da variação na relação (H/L)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na Figura 11, percebe-se pouca variação dos valores das tensões quando comparado com a primeira análise, executada apenas para duas prumadas. Isso pode ter acontecido pelo aumento da área de atuação das tensões, tendo em vista o grau de interação entre os elementos estruturais e a alvenaria. Em todo caso, a maioria da carga é absorvida pelos elementos estruturais e encaminhado para a fundação.

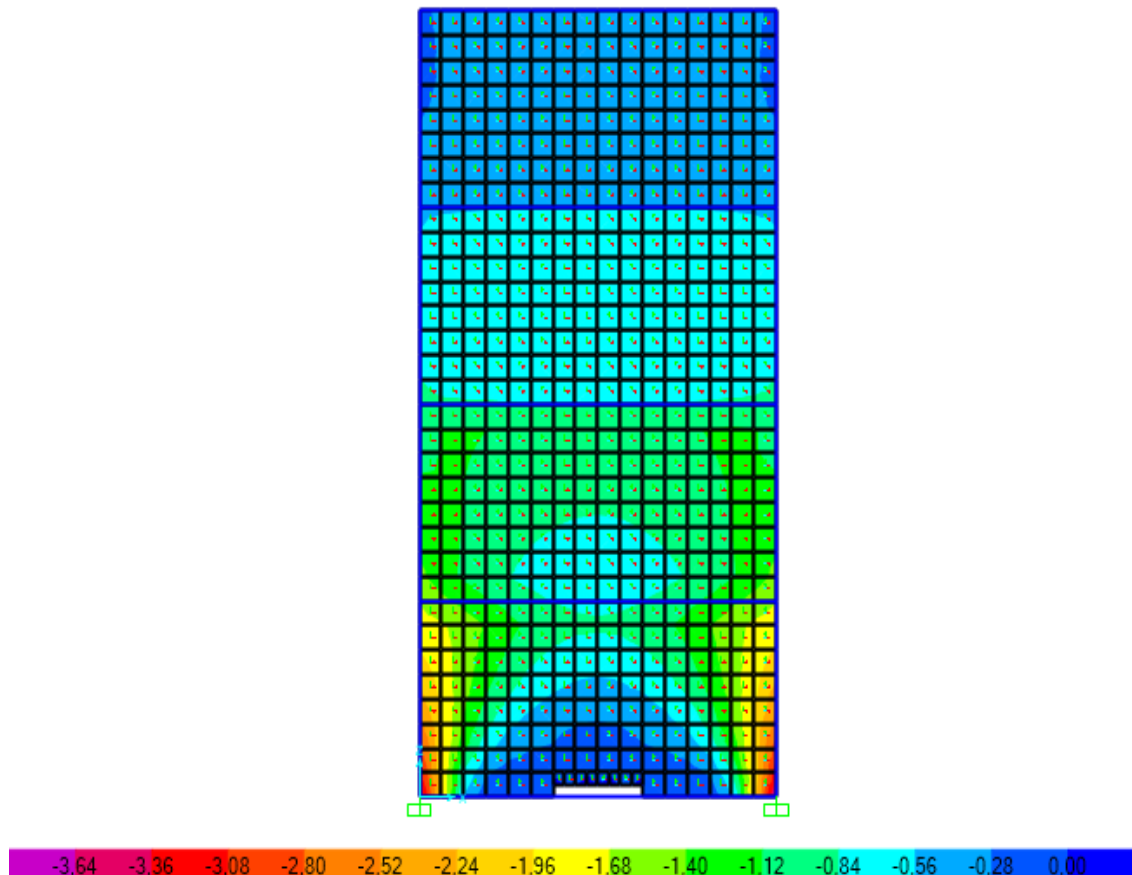
5.2 ANÁLISE DAS TENSÕES VERTICAIS COM SEPARAÇÃO ENTRE A BASE DA ALVENARIA E VIGA BALDRAME

Um novo modelo constitutivo de pórtico em concreto armado preenchido foi desenvolvido para verificar a interface entre a base da alvenaria e a viga baldrame. Para tanto, foi considerado uma estrutura de 4 pavimentos atrelada a uma redução da seção transversal da viga baldrame no pavimento térreo. Os resultados mostraram também como esperado uma

dispersão dos esforços, especialmente de momento fletor, do meio da viga para os extremos da alvenaria.

Dessa forma, considerando o encunhamento total entre a parede e o quadro estrutural e detalhando a base da alvenaria, como apresentado na figura 12, supondo que o preenchimento sofre deterioração quando submetido a tensões de tração, ocorrendo a separação da parede com a viga baldrame e, com isso, observamos tensões de tração significativas na parte inferior deslocada da parede, bem como, aumento também considerável das tensões de compressão próximo aos pilares. Com isso, à medida que a alvenaria perde contato com a viga o efeito arco observado na distribuição dos esforços tende a se desfazer, ocorrendo completa deterioração da alvenaria com o aumento consecutivo dos esforços de tração na sua base.

Figura 12 – Tensões de tração na alvenaria



Fonte: Sap2000, 2019.

Como a alvenaria ainda está sendo solicitada com carregamentos provenientes da viga superior, com a perda de contato na viga inferior ocorrerá a difusão das tensões verticais para próximo dos pilares, que por sua vez, atrelado a menor rigidez da viga baldrame, devido a

redução da sua seção, originará momento fletor e esforço cortante sobre os apoios ainda maiores.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo analisar a interação entre a alvenaria e o quadro estrutural circundante em vários modelos de pórticos por meio de uma modelagem numérica em elementos finitos. Com isso, apreciou-se uma análise paramétrica da capacidade de transmissão de tensões pela alvenaria, analisou-se o ganho de rigidez da estrutura aporticada e verificou-se a influência da variação do número de pavimentos e prumadas na distribuição de esforços sobre a alvenaria, analisando o acréscimo das tensões principais de compressão próximo aos apoios e os diagramas de momento fletor e cortante da viga baldrame.

Em cada modelo de pórtico, com o incremento de carga, foi possível observar uma discrepância de tensões sobre a viga baldrame, intencionalmente analisada com seção menor no estudo das tensões verticais de tração no bordo inferior da alvenaria com consequente perda de contato com a viga baldrame, tendo em vista, uma menor rigidez e com isso a possibilidade de prever danos na alvenaria ocasionado pelo efeito arco formado na distribuição de tensões.

No sistema viga-parede quando solidarizados existe a transmissão dos esforços para a alvenaria que oferece rigidez suficiente para absorver movimentações dos elementos estruturais. Apesar de a alvenaria aumentar resistência do pórtico as ações horizontais e contribuir para a estabilidade global, atuando como elemento de contraventamento, com carregamentos verticais pode ocorrer o comprometimento físico da alvenaria, como observado nas análises supracitadas. Dessa forma, na interface entre os dois materiais deve existir um espaço vazio ou até mesmo empregar um encunhamento com material mais flexível para atenuar a transferência de esforços e permitir maior deslocamento das vigas.

Nesse sentido, foi possível observar que a modelagem numérica reproduziu o efeito esperado para a distribuição de tensões sobre a alvenaria quando o pórtico é submetido a carregamentos simultâneos, mesmo se tratando de uma análise paramétrica. Dessa forma, para futuros trabalhos convém realizar simulações numéricas nos pórticos preenchidos considerando elementos de interfaces no contato entre os elementos estruturais e a alvenaria.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Estruturas de concreto armado – Procedimento. Rio de Janeiro. 2014.

_____. **NBR 15270-1**: componentes cerâmicos, parte 1: blocos cerâmicos para a alvenaria de vedação – terminologia e requisitos. Rio de Janeiro. 2005.

ALBERTINI, M. M. **Análise do comportamento experimental e numérico de prismas de alvenaria estrutural utilizando o elemento finito prismático regular parabólico**. 2009. 214f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita”, Ilha Solteira, 2009.

ALVA, Gerson Moacyr Sisniegas, *et al.* Estado limite de serviço de deformações horizontais excessivas com a consideração das alvenarias de preenchimento no modelo estrutural. **RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal**, 2015, 8.3.

AMORIM, L. S. de. **Análise experimental e numérica de resistência à compressão de prismas de alvenaria de vedação**. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Ufersa, Pau dos Ferros – RN, 2019.

ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. 3.ed. Rio Grande: DUNAS, 2010. v.3.

ASTERIS, Panagiotis G. et al. Mathematical macromodeling of infilled frames: state of the art. **Journal of Structural Engineering**, v. 137, n. 12, p. 1508-1517, 2011.

ASTERIS, P. G. et al. The state-of-the-art in infilled frames numerical models. In: **Proceedings of the Struct Eng World Congress**. 2002.

AZEVEDO, A. A. C. **Avaliação Comparativa da Influência do Revestimento Simples e Armado no Comportamento Compressivo de Prismas e Paredinhas de Blocos Cerâmicos de Vedação**. Recife, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2010.

BISCHOFF, M.; RAMM, E.; IRSLINGER, J. **Models and finite elements for thin-walled structures**. Encyclopedia of Computational Mechanics Second Edition, 2018, 1-86.

BOTELHO, L. L. R.; CUNHA, C. C. de A.; MACEDO, M. O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. **Gestão e sociedade**, v. 5, n. 11, p. 121-136, 2011.

CAPORRINO, C. F. **Patologias em alvenarias**. Oficina de Textos, 2018.

COSTA, A. C.; LOURENÇO, P. B.; MOURA, R. **Modelação física e numérica de nembos de edifícios em alvenaria de pedra irregular**. Projeto EPICIDADE. 2016.

FERREIRA, A. L. S.; CRUZ, J. R.; BASTOS, C. C. D. O. análise não-linear de edificações mistas (aço-concreto) sob ação de vento considerando a rigidez das alvenarias. **Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula**, v. 1, n. 1, p. 33-46, 2019.

Gomes, I. R. (2001). **Simulação numérica do ensaio de compressão de prisma de alvenaria pelo método dos elementos finitos com comportamento de interface**. 160p. 2001. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

GUERRA, Maurício et al. Influência das paredes de vedação na estabilidade global de edifícios de concreto armado. **Revista CIATEC-UPF**, v. 10, n. 2, 2018.

GUERRERO, Néstor et al. Experimental analysis of masonry infilled frames using digital image correlation. **Materials and structures**, v. 47, n. 5, p. 873-884, 2014.

LOURENÇO, P. B. Computational strategies for masonry structures: multi-scale modeling, dynamics, engineering applications and other challenges. 2013.

MARTINS, H. H. T. de S. Metodologia qualitativa de pesquisa. **Educação e pesquisa**, v. 30, n. 2, p. 289-300, 2004.

MEDEIROS, Wallison Angelim; PARSEKIAN, Guilherme Aris. Alvenaria participante em pórtico de concreto pré-moldado. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 9, n. 3, p. 234-245, 2018.

MEDEIROS, K. A. S. **Modelagem computacional para avaliação da interação entre painéis de alvenaria e estrutura de suporte em concreto armado**. 2015. Master's Thesis. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

MEDEIROS, W. A. **Pórticos em concreto pré-moldado preenchidos com alvenaria participante**. 2018. 163f. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2018.

NASCIMENTO, A. C. R. do. **Estudo numérico-experimental da influência da alvenaria de vedação na rigidez de edifícios de concreto armado**. 2015. 112 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2015. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2004.

OLIVEIRA, M. F. F.; SILVA, L. T. Análise de Painéis de Alvenaria Submetidos a Recalque pelo Método dos Elementos Finitos. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, 2019, 4.1.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural**. 2a. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2013.

PEDREIRO, M. R. M. **Análise do comportamento experimental e numérico de prismas de alvenaria estrutural submetidos a ações verticais utilizando elementos finitos volumétricos**. 2011.

PEREIRA, Manuel Fernando Paulo. **Anomalias em paredes de alvenaria sem função estrutural**. 2005. Tese de Doutorado.

PITANGA, M. A. **Contribuição ao estudo de pórticos de concreto armado preenchidos com alvenaria de blocos cerâmicos**. Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

QUEIROZ, Juliana Norberto. **Análise da influência da resistência característica à compressão do concreto no dimensionamento de um edifício em concreto armado**. 2018. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Unidade Delmiro Gouveia-Campus do Sertão, Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2018.

RAMOS, L. F. **Análise experimental e numérica de estruturas históricas de alvenaria**. 2002. Tese de Doutorado.

SABBATINI, Fernando Henrique. **Tecnologias de produção de vedações verticais**. EPUSP, 2002.

SALOUSTROS, Savvas, *et al.* An enhanced finite element macro-model for the realistic simulation of localized cracks in masonry structures: a large-scale application. **International Journal of Architectural Heritage**, 2018, 12.3: 432-447.

SILVA, M. M. A. **Diretrizes para o projeto de alvenarias de vedação**. 2003. PhD Thesis. Universidade de São Paulo

SOUSA, R.; SOUSA, H. Avaliação numérica da fissuração em paredes divisórias de tijolo causada por deformação estrutural. REHABEND 2016-Patología de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio, 2016.

SPEROTTO, J. N. **Edificações multifamiliares sem dispositivo de ligação superior alvenaria-estrutura: análise do sistema construtivo**. 2009. 83f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TRAMONTIN, A. P. **Avaliação Experimental dos Métodos de Prevenção de Fissuras na Interface Alvenaria de Vedação e Pilar de Concreto**. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 160 páginas. Dissertação

THOMAZ, E.; HELENE, P. **Qualidade no projeto e na execução de alvenaria estrutural e de alvenaria de vedação em edifícios**. São Paulo, 2000. 31p. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/252.