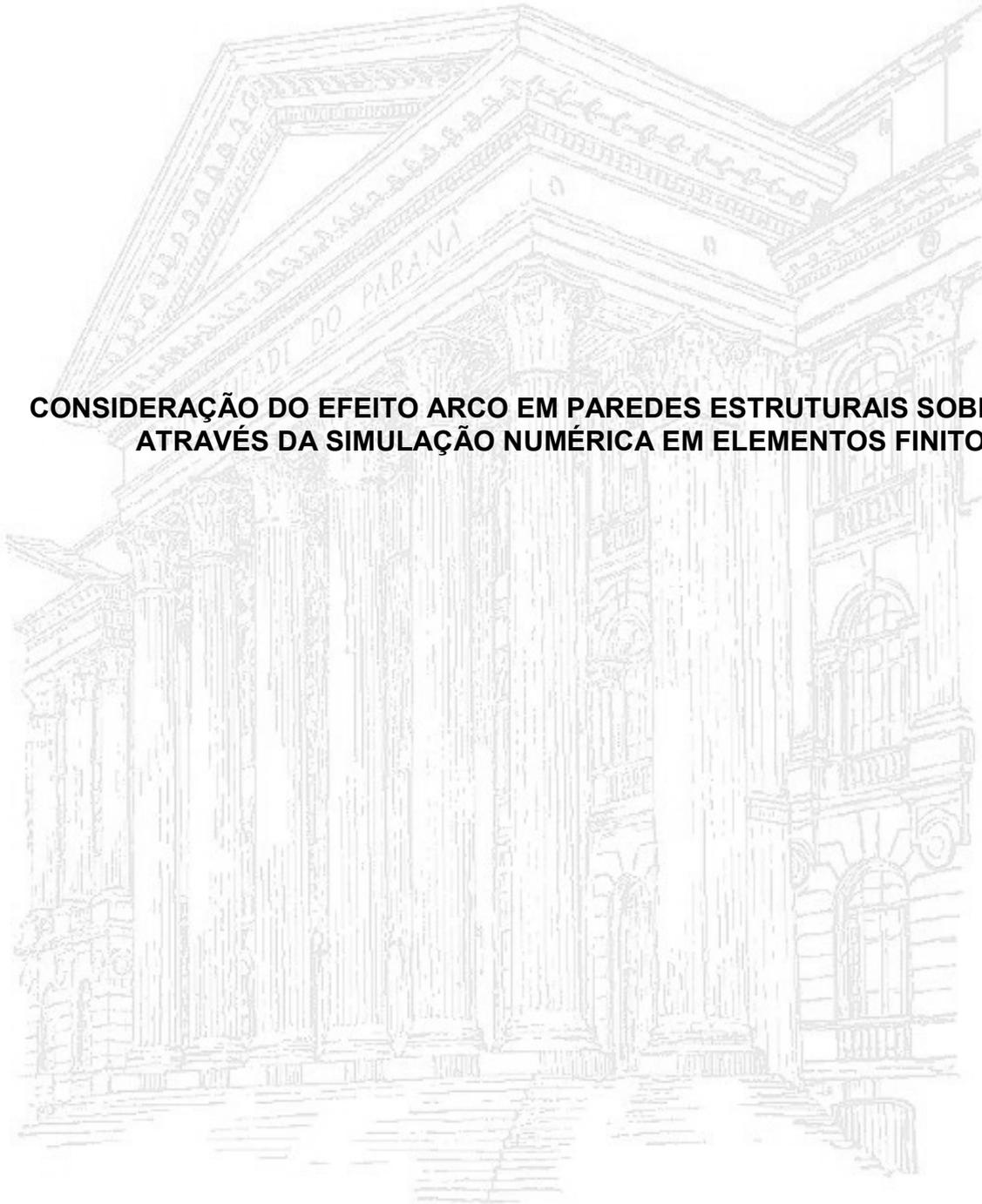


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DIEGO FELIPE ABRAHÃO CAPRARO

**CONSIDERAÇÃO DO EFEITO ARCO EM PAREDES ESTRUTURAIS SOBRE VIGAS
ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM ELEMENTOS FINITOS**



CURITIBA
2017

DIEGO FELIPE ABRAHÃO CAPRARO

**CONSIDERAÇÃO DO EFEITO ARCO EM PAREDES ESTRUTURAIS SOBRE VIGAS
ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação apresentada à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de concentração em Materiais e Estruturas, Departamento de Construção Civil, Setor de tecnologia, Universidade Federal do Paraná, para obtenção do título de mestre em engenharia de construção civil.

Orientador:

Prof. Dr. Marco André Argenta

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

C251c Capraro, Diego Felipe Abrahão
Consideração do efeito arco em paredes estruturais sobre vigas através
da simulação numérica em elementos finitos / Diego Felipe Abrahão Capraro.
– Curitiba, 2017.
82 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2017.

Orientador: Marco André Argenta .
Bibliografia: p. 76-82.

1. Vigas de concreto. 2. Paredes. 3. Alvenaria. I. Universidade Federal do
Paraná. II. Argenta, Marco André. III. Título.

CDD: 620.137

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



ATA Nº289

ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE MESTRADO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL

No dia onze de Setembro de dois mil e dezessete às 09:00 horas, na sala Auditório, CESEC, foram instalados os trabalhos de arguição do mestrando **DIEGO FELIPE ABRAHAO CAPRARO** para a Defesa Pública de sua Dissertação intitulada **Consideração do Efeito Arco em Paredes Estruturais sobre Vigas Através da Simulação Numérica em Elementos Finitos**. A Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná, foi constituída pelos seguintes Membros: MARCO ANDRE ARGENTA (UFPR), RONALDO ALVES DE MEDEIROS JUNIOR (UFPR), LUIZ ANTONIO FARANI DE SOUZA (UTFPR). Dando início à sessão, a presidência passou a palavra ao discente, para que o mesmo expusesse seu trabalho aos presentes. Em seguida, a presidência passou a palavra a cada um dos Examinadores, para suas respectivas arguições. O aluno respondeu a cada um dos arguidores. A presidência retomou a palavra para suas considerações finais. A Banca Examinadora, então, reuniu-se e, após a discussão de suas avaliações, decidiu-se pela APROVADO do aluno. O mestrando foi convidado a ingressar novamente na sala, bem como os demais assistentes, após o que a presidência fez a leitura do Parecer da Banca Examinadora. A aprovação no rito de defesa deverá ser homologada pelo Colegiado do programa, mediante o atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca dentro dos prazos regimentais do programa. A outorga do título de mestre está condicionada ao atendimento de todos os requisitos e prazos determinados no regimento do Programa de Pós-Graduação. Nada mais havendo a tratar a presidência deu por encerrada a sessão, da qual eu, MARCO ANDRE ARGENTA, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos membros da Comissão Examinadora.

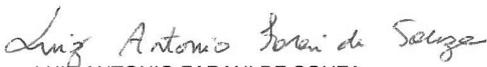
Curitiba, 11 de Setembro de 2017.


MARCO ANDRE ARGENTA

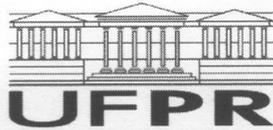
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


RONALDO ALVES DE MEDEIROS JUNIOR

Avaliador Interno (UFPR)


LUIZ ANTONIO FARANI DE SOUZA

Avaliador Externo (UTFPR)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

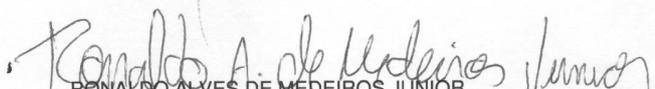
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **DIEGO FELIPE ABRAHAO CAPRARO** intitulada: **Consideração do Efeito Arco em Paredes Estruturais sobre Vigas Através da Simulação Numérica em Elementos Finitos**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

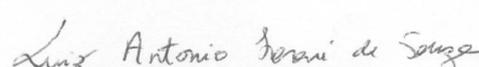
Curitiba, 11 de Setembro de 2017.


MARCO ANDRE ARGENTA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


RONALDO ALVES DE MEDEIROS JUNIOR

Avaliador Interno (UFPR)


LUIZ ANTONIO FARANI DE SOUZA

Avaliador Externo (UTFPR)

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente a minha esposa, Ana Paula Capraro, por todo o apoio e auxílio para conclusão deste trabalho.

Ao professor Doutor Marco Argenta, por toda a orientação realizada neste período.

A Universidade Federal do Paraná e ao Laboratório de Materiais e Estruturas, representados pelos técnicos Douglas e Ricardo, os quais auxiliaram no desenvolvimento da parte experimental.

Ao Professor Carlos Gustavo Marcondes, que autorizou a realização de ensaios junto a Pontifícia Universidade Católica do Paraná, bem como aos técnicos de laboratório.

Aos meus pais pelo apoio e auxílio em toda minha formação profissional e acadêmica.

Ao meu irmão, minha cunhada e ao colega Eduardo Kovalczuk que auxiliaram na parte experimental.

Agradeço aos colegas de mestrado, Lucas Peres e Gabriel Jung, pelas noites de estudo para vencer as disciplinas de estruturas.

CAPRARO, D. F. A. **Consideração Do Efeito Arco Em Paredes Estruturais Sobre Vigas Através Da Simulação Numérica Em Elementos Finitos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em engenharia de construção civil, UFPR. Curitiba, 2017.

RESUMO

Paredes estruturais, quando apoiadas em vigas sobre apoios discretos, devido a deformabilidade da viga tem seu carregamento concentrado próximo aos apoios, fenômeno conhecido como efeito arco. Esse tem por consequência a modificação dos esforços na viga suporte e acréscimo das tensões em regiões da alvenaria. Este trabalho tem por objetivo avaliar, por meio de modelagem computacional em elementos finitos, com o auxílio do programa ABAQUS, esse fenômeno no sistema alvenaria e viga suporte. Utilizou-se nas modelagens realizadas propriedades obtidas através de ensaios experimentais em prismas, blocos e argamassas. Foram realizadas diferentes análises com modelos de não-linearidade física, baseados na mecânica do dano, e com diferentes condições de aderência para as interfaces. Além disso, foi também avaliada a influencia das cargas horizontais na formação do arco. Os resultados mostraram a importância da discretização da viga com elementos planos, a consideração de cargas horizontais e a análise do acréscimo de tensões na alvenaria.

Palavras-chaves: Efeito arco, Pavimento de Transição, Modelo de Dano.

CAPRARO, D. F. A. **Consideration of the Arc Effect on Masonry supported by discrete Beam Through Numerical Simulation on Finite Elements.** Dissertation (Master of Engineering) - Graduate Program in construction engineering, UFPR. Curitiba, 2017.

ABSTRACT

Structural walls, when supported on beams on discrete supports, due to the deformability of the beam has the loading concentrated close to the supports, a phenomenon known as arch effect. That modified stresses in the support beam and increases in masonry regions. This work aims to evaluate, through computational modeling in finite elements, with the help of the ABAQUS program, this phenomenon in the masonry and support beam system. The modeling properties were obtained through experimental tests in prisms, blocks and mortars. Different analyzes were performed with physical nonlinearity models, based on the mechanics of the damage, and with different adhesion conditions for the interfaces. Further, the influence of horizontal loads on arc formation verified. The results show the importance of the discretization of the beam with plane elements, the consideration of horizontal loads and the analysis of the increase of stresses in the masonry.

Keywords: Arc effect, masonry supports, damaged models.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. PORÇÃO DA PAREDE COM FORMAÇÃO DO EFEITO ARCO.....	17
FIGURA 2. ESFORÇOS ATUANTES NA VIGA SUPORTE.	18
FIGURA 3. PAINEL DE ALVENARIA COM TRÊS APOIOS APÓS RECALQUE DO APOIO CENTRAL.....	19
FIGURA 4. MODELO ENSAIADO COM FLANGE EM UMA LATERAL.....	20
FIGURA 5. REPRESENTAÇÃO DO CRITÉRIO DE RUPTURA DE MOHR-COULOMB.....	22
FIGURA 6. LEI DE ATRITO DE COULOMB.	22
FIGURA 7. COMPOSIÇÃO DOS CRITÉRIOS VON MISES-RANKINI NO PLANO PRINCIPAL. ...	23
FIGURA 8. TÉCNICAS DE MODELAGEM DE ALVENARIA. (A) ALVENARIA (B) MICROMODELAGEM (C) MICROMODELAGEM SIMPLIFICADA (D) MACROMODELAGEM.....	24
FIGURA 9. VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO BLOCO.....	28
FIGURA 10. FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL PROPOSTO.	30
FIGURA 11. ANÁLISE DIMENSIONAL DOS BLOCOS COM PAQUÍMETRO.....	31
FIGURA 12. PROCESSO DE SECAGEM DO BLOCO DE CONCRETO.	32
FIGURA 13. ENSAIO DE COMPRESSÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO.	32
FIGURA 14. EXEMPLOS DE CORPOS DE PROVA EXTRAÍDOS DOS BLOCOS DE CONCRETO.	33
FIGURA 15. ENSAIO DE TRAÇÃO DIRETA DE ESPÉCIMES EXTRAÍDOS DO BLOCO DE CONCRETO.	34
FIGURA 16. ENSAIO DE TRAÇÃO DIRETA COM GARRAS NO CONCRETO EXTRAÍDO.....	34
FIGURA 17. MESA DE ADENSAMENTO (A) MOLDES COM FILME PLÁSTICO (B).....	37
FIGURA 18. ENSAIO DE CONSISTÊNCIA DE ARGAMASSAS.....	37
FIGURA 19. ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS (4x4x16) cm –FIGURA (A) POSICIONAMENTO DO CORPO DE PROVA; FIGURA (B) CONFIGURAÇÃO DO CORPO DE PROVA APÓS O ENSAIO	38
FIGURA 20. APLICAÇÃO DE CARGA NO ENSAIO DE COMPRESSÃO NOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS.....	39
FIGURA 21. ENSAIO DE ARRANCAMENTO DA INTERFACE BLOCO/ARGAMASSA.....	40
FIGURA 22. TIPOS DE ARGAMASSAMENTO UTILIZADOS.....	41
FIGURA 23. PRISMAS CAPEADOS COM PASTA DE CIMENTO.....	42
FIGURA 24. MOLDAGEM DOS PRISMAS SOBRE BANCADA COM DESMOLDANTE E PASTA DE CAPEAMENTO.....	42
FIGURA 25. ENSAIO DE COMPRESSÃO DOS PRISMAS.	43
FIGURA 26: FLUXOGRAMA DO PROGRAMA NUMÉRICO PROPOSTO.....	44
FIGURA 27. MODELO DA RESPOSTA DE CONCRETO PARA O CARREGAMENTO UNIAXIAL EM TENSÃO (a) E DE COMPRESSÃO (b).....	46
FIGURA 28. MODELO DO PRATO DE CARREGAMENTO.	47
FIGURA 29. SIMULAÇÕES VARIANDO O MODELO DA ALVENARIA (A) MACRO-MODELAGEM (B) MICRO-MODELAGEM 2D (C) MICRO-MODELAGEM 3D	50
FIGURA 30. MODELO COM APLICAÇÃO DE CARGA HORIZONTAL NO TOPO.	51
FIGURA 31. MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO FRESCO DAS ARGAMASSAS ESTUDADAS.	55
FIGURA 32. CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO À TRAÇÃO.....	55
FIGURA 33. GRÁFICO COM CORPORTAMENTO REOLÓGICO À COMPRESSÃO.	56
FIGURA 34. RESULTADOS DE ARRANCAMENTO PARA AS ARGAMASSAS ESTUDADAS. ...	57
FIGURA 35. PRISMAS E BLOCOS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.	58
FIGURA 36. TENSÃO- DEFORMAÇÃO DAS SIMULAÇÕES DOS PRISMAS.	60

FIGURA 37. TENSÕES PRINCIPAIS PRÓXIMAS A INTERFACE(A) NO MODELO COLADO, E ÍNICIO FISSURAÇÃO ENSAIO EXPERIMENTAL(B).	61
FIGURA 38. TENSÕES PRINCIPAIS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO RUGOSO (a) E FISSURAÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL (b).	62
FIGURA 39. TENSÕES DEVIDO A RESTRIÇÃO DA PRENSA.....	63
FIGURA 40. FISSURAÇÃO DEVIDO A CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES.....	63
FIGURA 41. DESLOCAMENTO VERTICAL (U3) DA SIMULAÇÃO COM PRATO DE ENSAIO. ..	64
FIGURA 42. TENSÕES PRINCIPAIS DE TRAÇÃO NO MODELO COM ARGAMASSAMENTO LATERAL(A) E CORRESPONTE ENSAIO EXPERIMENTAL(B)	65
FIGURA 43. GRÁFICOS DAS TENSÕES PRINCIPAIS SOLONGO DO SEPTO VERTICAL NA DIREÇÃO VERTICAL	66
FIGURA 44. DIREÇÃO DAS TENSÕES PRINCIPAIS (VIGA 1).	67
FIGURA 45. TENSÕES PRINCIPAIS DE VON MISSES (VIGA 1).....	67
FIGURA 46. COMPARAÇÃO DO CARREGAMENTO ALTERANDO-SE O TIPO DE MODELAGEM.	68
FIGURA 47. DISTRIBUIÇÕES DAS TENSÕES PRINCIPAIS, NOS MODELOS BIDIMENSIONAIS. (A)MACROMODELAGEM E (B)MICROMODELAGEM.	69
FIGURA 48. GRÁFICO COM A DISTRIBUIÇÃO DO CARREGAMENTO VERTICAL NA VIGA SUPORTE, VARIANDO A MODELAGEM DA ALVENARIA.	69
FIGURA 49. COMPARAÇÃO DO CARREGAMENTO LEVANDO EM CONTA A CARGA HORIZONTAL.....	70
FIGURA 50. COMPARAÇÃO DO CARREGAMENTO LEVADO EM CONTA A INTERAÇÃO.....	71
FIGURA 51. GRÁFICO COMPARATIVO DA DISTRIBUIÇÃO DO CARREGAMENTO.....	72
FIGURA 52. GRÁFICO COMPARATIVO RIGIDEZ.....	73

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. TRAÇOS DAS ARGAMASSAS ESTUDADAS.....	35
TABELA 2. MASSA ESPECÍFICA DA CAL E DO CIMENTO.....	35
TABELA 3. CARACTERIZAÇÃO DA AREIA.....	36
TABELA 4. PARÂMETROS DE DANO ADOTADOS.	46
TABELA 5. PROPRIEDADES CONSIDERADAS NOS MODELOS.....	52
TABELA 6. RESUMO DOS ENSAIOS MECÂNICOS.....	56
TABELA 7. CARGA ÚLTIMA DOS PRISMAS COM ARGAMASSAMENTO TOTAL.	65
TABELA 8. MOMENTOS OTIMIZADOS COM A CONSIDERAÇÃO DO EFEITO ARCO.....	72
TABELA 9. TENSÕES MÁXIMAS NA ALVENARIA.	73

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Problematização	13
1.2. Hipótese	14
1.3. Objetivo	14
1.4. Justificativa	15
1.5. Delimitação do trabalho	16
1.6. Divisão do trabalho	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. Introdução geral sobre efeito arco	17
2.2. Modelo físico dos materiais	20
2.3. Técnicas de modelagem da alvenaria estrutural	23
2.4. Modelagem de Prismas de Alvenaria	26
2.4.1. Propriedades dos materiais.....	27
2.4.2. Não-linearidade física	28
2.4.3. Modelagem Interface prismas	29
2.4.4. Pratos do ensaio	29
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	30
3.1. Blocos.....	31
3.2. Argamassa	35
3.2.1. Caracterização dos Aglomerantes	35
3.2.2. Caracterização da Areia.....	35
3.2.3. Caracterização das Argamassas	36
3.2.3.1. Índice de consistência	37
3.2.3.2. Massa Específica	38
3.2.3.3. Ensaio de Tração na Flexão.....	38
3.2.3.4. Ensaio de compressão	39
3.3. Interface Argamassa-Bloco	40
3.4. Prismas.....	40
4. PROGRAMA NUMÉRICO	44
4.1. Simulação numérica dos prismas de alvenaria	44
4.1.1. Não-linearidade dos materiais e critérios de falha	46
4.1.2. Não-linearidade de contato	47
4.1.3. Consideração da rigidez e restrição da placa de ensaio.....	47
4.1.4. Resistência da Argamassa.....	48
4.1.5. Modo de argamassamento.....	48
4.2. Modelos de conjuntos viga-parede	48
4.2.1. Tipo de elemento da viga suporte	49

4.2.2.	Tipo de modelagem da alvenaria	49
4.2.3.	Inserção de cargas horizontais.	51
4.2.4.	Interação com paredes adjacentes.	51
4.2.5.	Variação da Geometria da viga suporte	52
5.	RESULTADOS	53
5.1.	Resultados Experimentais	53
5.1.1.	Blocos de concreto.....	53
5.1.1.1.	Bloco Inteiro.....	53
5.1.1.2.	Espécimes extraídos do Bloco	53
5.1.2.	Argamassas	54
5.1.2.1.	Índice de consistência	54
5.1.2.2.	Massa específica.....	54
5.1.2.3.	Tração na Flexão.....	54
5.1.2.4.	Ensaio de Compressão	56
5.1.3.	Interface	57
5.1.4.	Prismas	57
5.2.	Resultados do Programa Numérico.....	59
5.2.1.	Simulações dos prismas	59
5.2.1.1.	Não-linearidade física	59
5.2.1.2.	Não-linearidade de contato.....	60
5.2.1.3.	Rigidez e restrição dos pratos de ensaio.....	62
5.2.1.4.	Resistência da Argamassa	64
5.2.1.5.	Modo de argamassamento	65
5.2.2.	Conjuntos viga-parede	66
5.2.2.1.	Tipo de modelagem viga suporte	68
5.2.2.2.	Tipo de Modelagem da alvenaria	68
5.2.2.3.	Inserção de cargas horizontais.....	70
5.2.2.4.	Interação Paredes adjacentes	70
5.2.2.5.	Variação da viga suporte	71
6.	CONCLUSÕES	74
6.1.	Modelagem dos Primas	74
6.2.	Modelagem do conjunto viga-parede.....	74
	REFERÊNCIAS	76

1. INTRODUÇÃO

A alvenaria estrutural é o sistema construtivo que utiliza a vedação como elemento portante da edificação (PEDREIRO, 2011).

Nos últimos anos, aumentou-se o interesse pelo sistema, devido a suas vantagens técnicas e econômicas. Por ser um método racional, têm como características marcantes: a redução de desperdícios e do número de especialidades em obra, a possibilidade de geração de uma maior flexibilidade no cronograma e de possível redução do custo total (PAES, 2008).

Por se tratar de um sistema construtivo de grande potencial, existe-se a necessidade de ampliar estudos científicos que orientem os projetistas no dimensionamento estrutural deste método. Isso deve ser feito a partir do entendimento do comportamento da estrutura e da definição dos melhores modelos de cálculo a serem adotados, visando equilibrar a segurança estrutural com o custo de execução e manutenção.

Tendo em vista o exposto, o presente trabalho visou contribuir com o entendimento do fenômeno do efeito arco em pavimentos de transição do sistema de alvenaria estrutural para concreto armado, de forma a permitir futuros modelos de dimensionamento para os elementos envolvidos.

1.1. Problematização

Em edifícios que empregam o sistema construtivo de alvenaria estrutural, em que as paredes não continuam até a fundação, a exemplo edifícios com pilotis ou subsolos, existe a necessidade de um pavimento de transição, usualmente com estrutura em concreto armado. Nesta transição, devido a diferença de rigidez entre os elementos suportes, ocorre uma concentração de tensões em algumas regiões da alvenaria e um alívio nos esforços solicitantes das vigas. Segundo Holanda Jr e Ramalho (2008) tal comportamento também ocorre na fundação de alvenarias apoiadas sobre vigas com estacas espaçadas.

Este efeito usualmente é desconsiderado no dimensionamento de estruturas e não há normatização específica sobre a análise do comportamento nesta transição.

Dessa forma, deseja-se avaliar: qual é o comportamento estrutural, devido a transição de cargas, da parede para a viga suporte.

1.2. Hipótese

A interação entre a parede de alvenaria e sua estrutura suporte (viga) tem comportamento relacionado a um arco atirantado. Segundo Haseltine e Moore (1981), o arco comprimido forma-se na parede e a viga suporte funciona como tirante, direcionando parte da carga vertical para as regiões de apoio da estrutura suporte. Desta forma, ocorre um acréscimo de tensões na alvenaria e um alívio nos esforços solicitantes da viga, principalmente do momento fletor, pela concentração do carregamento próximo aos apoios.

Levando em consideração o exposto, tem-se como hipótese que a redistribuição de esforços, que ocorre na transição da alvenaria com o elemento suporte em concreto armado, trará considerações diferenciadas para o dimensionamento desses elementos, principalmente do elemento em concreto armado, visto que o alívio pode contribuir para a diminuição da seção da peça ou de sua taxa de armadura.

1.3. Objetivo

O presente trabalho teve por objetivo simular diferentes modelos para a análise de um sistema viga-parede, utilizando método dos elementos finitos, para verificar o efeito arco e o comportamento das tensões no conjunto.

O trabalho ainda tem os seguintes objetivos específicos:

- Comparar a modelagem em elementos finitos da compressão de prismas com o respectivo ensaio;
- Verificar os fatores que influenciam no ensaio de prisma;
- Verificar a influencia do argamassamento no ensaio de prisma;
- Analisar os diferentes modelos e condições de contorno da modelagem na análise do sistema viga-parede.
- Verificar o acréscimo de tensões na alvenaria;
- Verificar a influencia de cargas horizontais na distribuição do carregamento vertical.

1.4. Justificativa

A alvenaria estrutural é um sistema com grande potencial de crescimento e isto se deve principalmente a sua vantagem econômica, dependendo do número de pavimentos, em relação ao usual sistema em concreto armado (KATO, 2013). Porém, a tecnologia de projeto estrutural para esse sistema ainda é muito simplificada, sendo necessário o desenvolvimento e aprimoramento dos modelos de dimensionamento dessas estruturas.

O estudo de detalhes construtivos, pontos específicos da estrutura e comportamento devido a esforços horizontais deve ser incentivado, com o intuito de gerar conhecimento e pesquisas que auxiliem no desenvolvimento da tecnologia para a execução e projeto estrutural de edifícios em alvenaria.

No pavimento de transição para concreto armado, o efeito do sistema viga-alvenaria altera a distribuição de tensões, diferentemente do que é idealizado usualmente no dimensionamento de estruturas, onde o carregamento vertical da alvenaria é distribuído uniformemente na viga.

Tal consideração vem sendo estudada por pesquisadores, como Paes (2008), com intuito de verificar o alívio do esforço solicitante na viga suporte. Dado que as cargas tendem a se direcionar para os apoios da viga devido à diferença da rigidez, ocorre uma redução do momento fletor solicitante. Conhecendo este alívio poderia ser alcançado um ganho econômico, devido a possível redução da seção desta viga ou da taxa de aço. Um exemplo disso é o trabalho de Barbosa (2000), o qual, através da simulação de um conjunto de paredes, encontrou reduções dos momentos solicitantes nas vigas próximas a 50%.

Outra vantagem com a consideração do efeito é a redução da flecha calculada das vigas pela mudança no carregamento, nos casos em que este item é um fator limitante no dimensionamento, isto poderia também gerar um ganho econômico.

O acréscimo de tensões na alvenaria, devido ao efeito arco, sem previsão em projeto, pode ocasionar fissuração excessiva. Tais manifestações patológicas merecem estudo, dado que o seu surgimento reduz a vida útil das estruturas e prejudica a operacionalidade do edifício, ou até mesmo a ruína por perda da resistência do elemento.

Para um melhor aproveitamento do potencial resistente do sistema estrutural, é ideal aperfeiçoar o desempenho de todos os elementos que o compõem, bem como de suas peculiaridades, analisando os fenômenos físicos correntes e propriedades dos materiais constituintes.

1.5. Delimitação do trabalho

O trabalho utilizou modelos específicos da geometria, modulação dos blocos, bem como vão de vigas suportes. Foi estudado a formação do efeito arco e seus efeitos na alvenaria e na viga, assim como os modelos e as condições de não-linearidade mais interessantes para realizar tal modelagem.

O trabalho não teve como foco a criação ou validação de métodos de dimensionamento de tais estruturas, nem o encontro de uma formulação analítica para a distribuição do carregamento.

1.6. Divisão do trabalho

O primeiro capítulo apresenta a problematização, hipótese, objetivo e justificativa da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica do assunto estudado, com o estado da arte em modelagem de alvenaria estrutural e análise do efeito arco.

O terceiro e quarto capítulo apresentam a metodologia do programa experimental e numérico, respectivamente, descrevendo as etapas seguidas na pesquisa, bem como as condições fixas e variáveis nos modelos e ensaios.

O quinto capítulo apresenta as discussões e resultados obtidos na pesquisa.

O sexto apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros. O sétimo e último capítulo apresenta a lista de referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

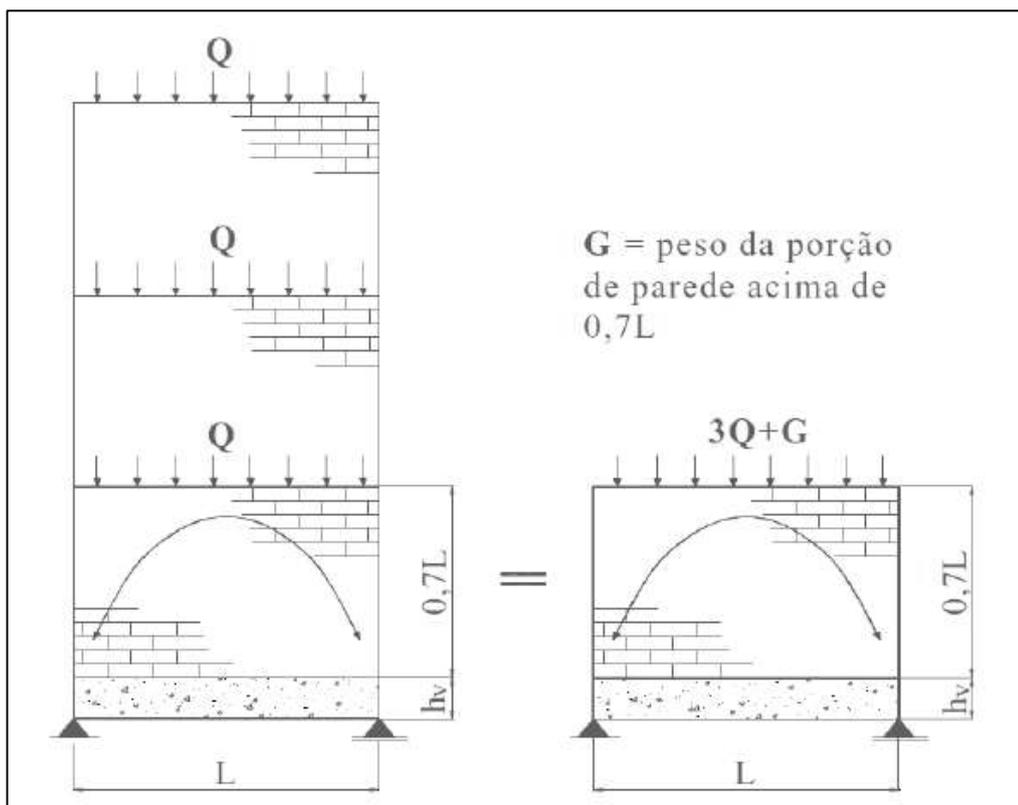
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução geral sobre efeito arco

Quando uma parede de alvenaria encontra-se sobre vigas com apoios discretos, as tensões verticais na base da parede tendem a se concentrar nas proximidades dos apoios, fenômeno conhecido como efeito arco. Segundo Wood (1952) *apud* Holanda Junior (2002), para que este efeito de arco se forme completamente, a altura da parede deve ser igual ou superior a 60% do vão entre os apoios.

Riddington e Smith (1978) propõem uma relação entre o vão da viga e a altura da parede em que ocorrerá formação do arco, conforme FIGURA 1. Nesse modelo é definida a rigidez relativa do sistema em função, principalmente, do vão da viga. Quão maior esta rigidez, maior a tendência do aparecimento deste arco.

FIGURA 1. PORÇÃO DA PAREDE COM FORMAÇÃO DO EFEITO ARCO.



FONTE: BARBOSA (2000).

A rigidez relativa de Riddington e Smith (1978) é equacionada pelo parâmetro K (EQUAÇÃO 01).

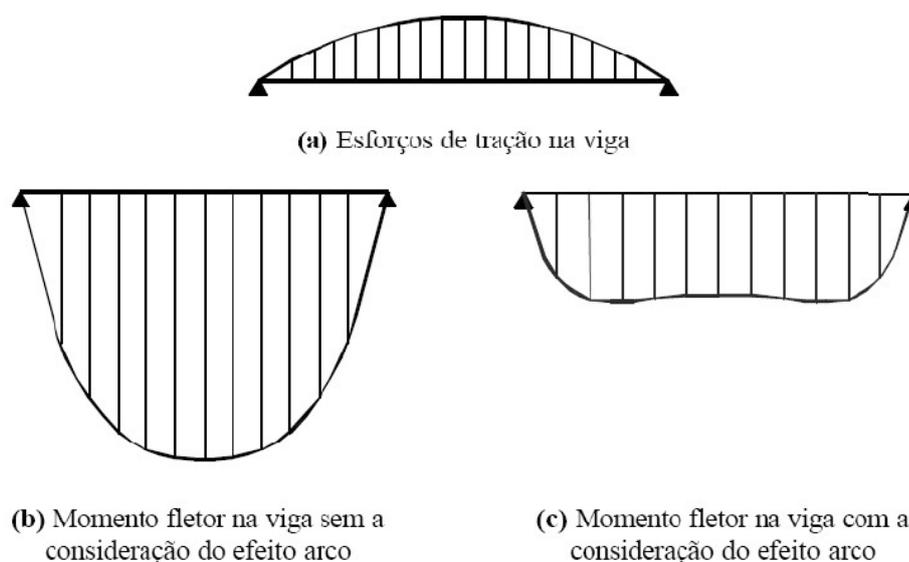
$$K = \sqrt[4]{\frac{E_P \cdot t_P \cdot L^3}{E_v \cdot I_v}} \quad (01)$$

Em que E_p, t_p, L são o módulo de elasticidade, a espessura e o comprimento da parede, respectivamente, e E_v, I_v o módulo de elasticidade e o momento de inércia da viga.

Papia (1988) confirma que quanto menor a rigidez da viga, em relação à parede, maior a tendência de uma região de descolamento no contato, e assim, próximo aos apoios, ocorre a concentração de tensões em formato de arco. O trabalho também faz uso da modelagem com o método dos Elementos de Contorno (MEC), obtendo resultados próximos do modelado em elementos finitos e do resultado experimental.

Barbosa (2000), por meio de modelagem computacional, encontrou resultados que explicitam o alívio no esforço fletor da viga suporte e surgimento de tensões axiais de tração, conforme a FIGURA 2, quando a consideração do sistema viga-parede funcionando como um arco.

FIGURA 2. ESFORÇOS ATUANTES NA VIGA SUPORTE.



FONTE: BARBOSA (2000).

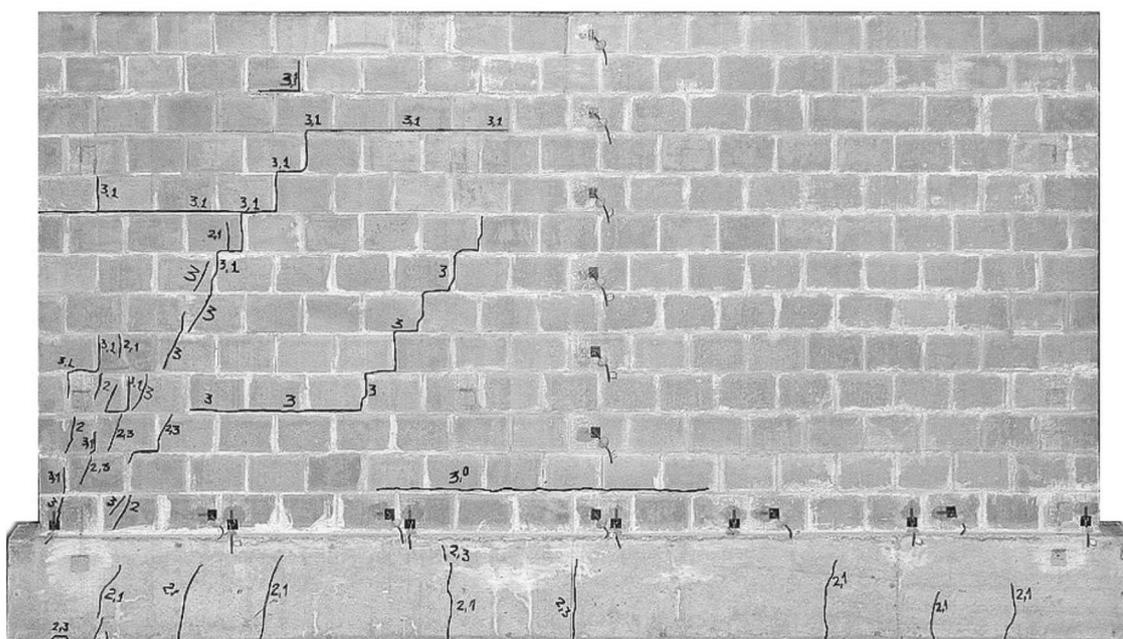
Segundo Paes (2008), a consideração do efeito arco pode acarretar na redução do momento fletor e cortante das vigas suportes. Porém, quando feita a consideração das ações horizontais nos seus modelos, a distribuição do carregamento foi alterada e conduziu a maiores esforços, em pelo menos 71% das vigas por ele analisadas. Seus modelos revelaram que o dimensionamento usual pode estar contra a segurança.

No âmbito de ensaios experimentais que avaliaram o fenômeno, destaca-se o trabalho de Rosenhaupt (1962) *apud* Barbosa (2000), que ensaiou 12 paredes de

alvenaria estrutural sobre vigas de concreto armado até atingir a ruptura, podendo verificar a ocorrência do efeito.

Holanda Junior e Ramalho (2008) realizaram ensaios experimentais simulando o comportamento de paredes estruturais sobre apoios discretos, com o intuito de avaliar a influencia do recalque na distribuição de tensões na alvenaria. A FIGURA 3 apresenta o recalque do apoio central, tal fenômeno leva a um comportamento do painel semelhante ao do efeito arco. Na imagem é possível visualizar o posicionamento das fissuras. Os pesquisadores compararam seus ensaios experimentais com os seus modelos numéricos, e confirmaram a importância da consideração da não-linearidade de contato entre a parede e a viga no modelo numérico.

FIGURA 3. PAINEL DE ALVENARIA COM TRÊS APOIOS APÓS RECALQUE DO APOIO CENTRAL.



FONTE: HOLANDA JUNIOR E RAMALHO (2008).

Tanto a NBR 15812-1 (2010), para blocos cerâmicos, quanto a NBR 15961-1 (2011), para blocos de concreto, em seus respectivos itens 9.4 e 9.6 descrevem:

“O carregamento resultante para estruturas de apoio deve ser sempre coerente com o esquema estrutural adotado para o edifício, representando a trajetória prevista para as tensões.

São proibidas reduções nos valores a serem adotados como carregamento para estruturas de apoio, baseadas na consideração do efeito arco, sem que sejam considerados todos os aspectos envolvidos nesse fenômeno, inclusive a concentração de tensões que se verifica na alvenaria.

Tendo em vista o risco de ruptura frágil, cuidados especiais devem ser tomados na verificação do cisalhamento nas estruturas de apoio.”

Tanto Paes (2008) quanto Nascimento Neto (2003), confirmaram, por meio de modelagem numérica, que a interação entre as paredes é de vital importância na capacidade resistente do sistema, bem como na distribuição de tensões nos apoios.

Carvalho (2007) realizou ensaios experimentais de painéis com flanges e isolados, com intuito de avaliar a importância da consideração da interação entre as paredes no estudo do efeito arco. No estudo foram moldados, em escala reduzida, mini-tijolos cerâmicos, formando os painéis em conjunto com as flanges, podendo ser observada a transferência do acréscimo de carregamento devido ao efeito arco para as paredes adjacentes, ilustrado na FIGURA 4. O pesquisador também faz uso da modelagem em elementos finitos para confirmar seus ensaios.

FIGURA 4. MODELO ENSAIADO COM FLANGE EM UMA LATERAL.



FONTE: CARVALHO (2007).

2.2. Modelo físico dos materiais

O comportamento, bem como a capacidade resistente da alvenaria, depende de diversos fatores, como: a geometria e a resistência do bloco, resistência da argamassa, espessura da junta, tipo de argamassamento (parcial ou total), taxa de sucção inicial do bloco, retentividade de água da argamassa, qualidade da mão de obra, condições de

cura, aderência da alvenaria, modulação dos blocos bem como a interação entre paredes adjacentes (GOMES, 2001).

Além de todos estes fatores relatados, para se obter um resultado confiável, é necessário utilizar o tipo de análise adequado.

Em análises simplificadas da estrutura, considera-se a manutenção das propriedades do material (linearidade física), assim como a manutenção das características geométricas iniciais (linearidade geométrica). Entretanto, para uma análise não-linear, considera-se mudança das propriedades físicas, da geometria inicial ou de ambas.

Nos casos em que existam elevados níveis de tensão, as hipóteses lineares não são satisfatórias. Neles, a alvenaria tem um comportamento não-linear, principalmente nas juntas, devido a ruptura local, causada por esforços de tração que geram a perda de aderência entre a argamassa e a unidade.

Além desta não-linearidade geométrica, segundo Albertini (2009), tanto o concreto, quanto a argamassa apresentam, para determinados níveis de solicitação, uma relação não-linear entre tensão e deformação. Isso se deve a capacidade de acomodar grandes deformações em relação ao acréscimo de uma pequena parcela de carregamento, e também ao surgimento de deformações irreversíveis ou plásticas.

Para simular o comportamento do bloco de concreto submetido a um estado de tensão qualquer, o critério de Mohr-Coulomb tem sido muito utilizado (ALBERTINI, 2009), sendo este uma generalização da equação de ruptura de Coulomb (EQUAÇÃO 02).

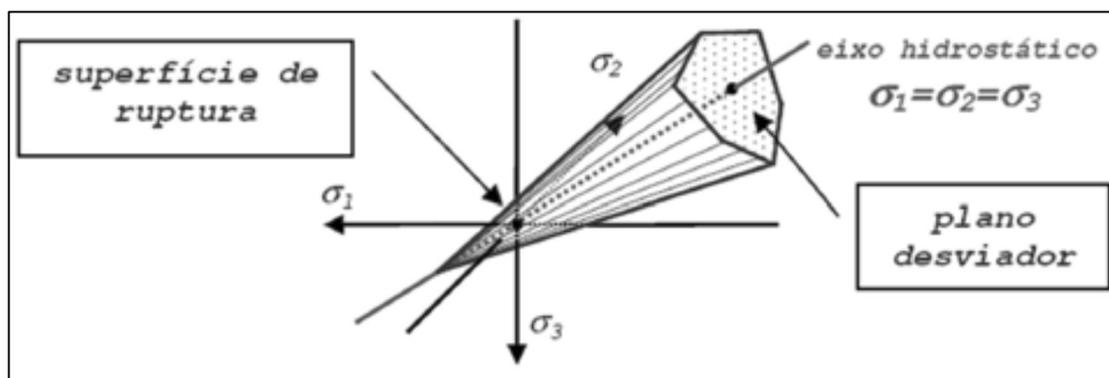
$$\tau = c - \sigma \tan \varphi \quad (02)$$

Em que τ é a tensão de cisalhamento, σ é a tensão normal, c é a coesão e φ ângulo de atrito interno do material.

A EQUAÇÃO 02 indica que há ruptura do material quando a tensão de cisalhamento, num determinado plano, supera a resistência proveniente de uma parcela da coesão outra proporcional a tensão normal atuante.

No espaço das tensões principais, o critério de Mohr-Coulomb é representado por uma pirâmide hexagonal irregular, conforme ilustra a FIGURA 5, cujo contorno define a superfície de ruptura do material.

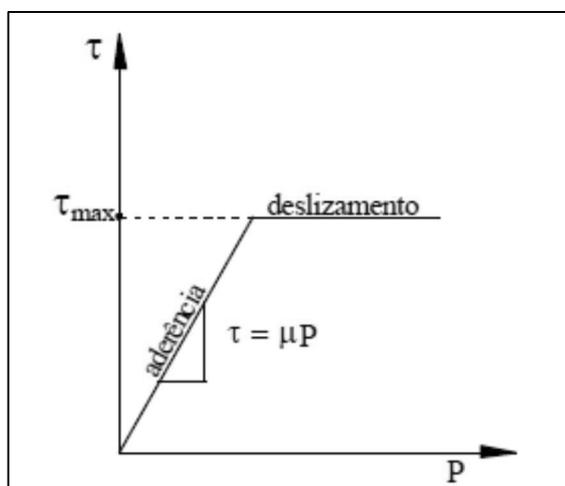
FIGURA 5. REPRESENTAÇÃO DO CRITÉRIO DE RUPTURA DE MOHR-COULOMB.



FONTE: ALBERTINI (2009).

É necessário o conhecimento do coeficiente de atrito e da tensão máxima de cisalhamento nos materiais, pois, quando a força cisalhante supera uma fração da força normal, sendo essa resultante função do coeficiente de atrito, ocorre o deslizamento do material, conforme a FIGURA 6. Segundo Barbosa (2000), este comportamento, após o deslizamento, deve ser considerado na modelagem numérica, pois alteraria a distribuição de tensões.

FIGURA 6. LEI DE ATRITO DE COULOMB.



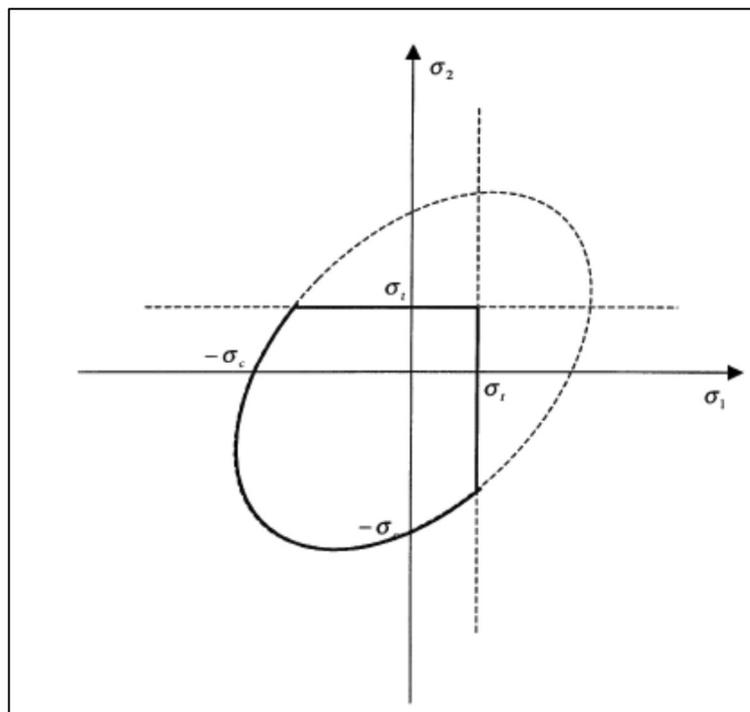
FONTE: BARBOSA (2000).

Para a previsão da ruptura, quanto à compressão pura, tanto do bloco quanto da argamassa, alguns trabalhos utilizam o critério de falha de Von Mises, em termos das tensões principais, que pode em alguns casos encontrar resultados satisfatórios (ALI, MOORE e PAGE, 1987).

Zucchini e Lourenço (2002) também utilizam o critério de Von Mises para análise da compressão do bloco e da argamassa, e consideraram o material isotrópico. Para a

descrição do comportamento de tração, os pesquisadores sugerem a adoção do critério de Rankine, em termos de tensão admissível. O trabalho dos pesquisadores procurou encontrar os planos de ruptura, utilizando uma composição dos dois critérios, conforme FIGURA 7.

FIGURA 7. COMPOSIÇÃO DOS CRITÉRIOS VON MISES-RANKINI NO PLANO PRINCIPAL.



FONTE: ZUCCHINI E LOURENÇO (2002).

O critério de ruptura para materiais frágeis disponível no programa ABAQUS é o de Drucker-Prager, formulado em 1952. Ele é uma modificação do critério de Von Mises, onde foi introduzida a influência das componentes das tensões de pressão hidrostática, portanto, é um critério de dois parâmetros (CHEN, 1982).

Tal critério de Drucker-Prager foi utilizado no programa por estar disponível no software e representar o acréscimo de resistência com o aumento da tensão hidrostática, sendo um modelo adequado para o concreto, conforme Kotsovos (2015).

2.3. Técnicas de modelagem da alvenaria estrutural

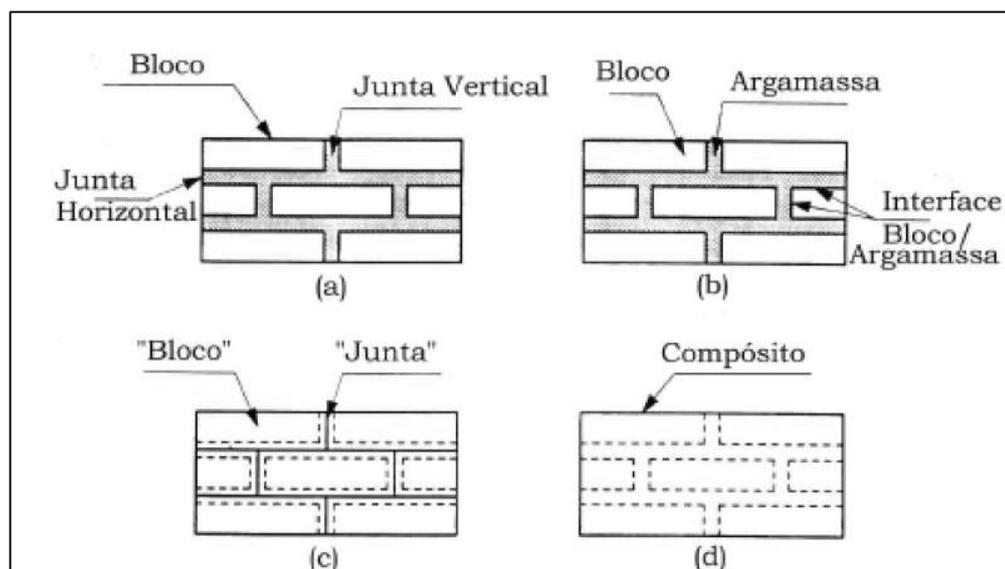
Até recentemente, para o dimensionamento da alvenaria estrutural, eram consideradas suas propriedades médias, isto é, representadas como um material homogêneo e isotrópico.

Nas últimas décadas têm se estudado diversas técnicas para a modelagem da alvenaria estrutural para representação dos painéis com aproximações compatíveis e que permitam a modelagem com um baixo custo computacional, levando em conta a sua elevada complexidade na geometria e propriedades dos materiais.

A FIGURA 8 explicita os diferentes tipos de modelagem numérica para uma parede de alvenaria, dependendo do nível de precisão e simplicidade desejada, podem ser divididas as estratégias de modelagem em:

- Micromodelagem;
- Micromodelagem simplificada
- Macromodelagem.

FIGURA 8. TÉCNICAS DE MODELAGEM DE ALVENARIA. (A) ALVENARIA (B) MICROMODELAGEM (C) MICROMODELAGEM SIMPLIFICADA (D) MACROMODELAGEM



FONTE: PELETEIRO (2002).

Riddington e Naom (1994) realizam a micromodelagem quando discretizam as unidades e a argamassa como elementos distintos, interligados por elementos de ligação de comprimento nulo e rigidez elevada. A utilização de elementos de contato ocasiona a geração de uma malha bastante refinada. Assim sendo, segundo os pesquisadores, sua aplicação fica limitada a pequenas análises, como em pequenas paredes ou prismas.

Segundo Ali e Page (1988), é possível modelar a alvenaria em elementos finitos considerando as juntas como elementos de contato entre as unidades, tal abordagem é a chamada micromodelagem simplificada. Nela o elemento junta tem baixa resistência à tração e elevada à compressão e uma resistência ao cisalhamento dependente da

aderência e da tensão de compressão atuante. Deste modo, é levado em consideração o comportamento não-linear da alvenaria, ao observar a ruptura e escorregamento das juntas.

Outro exemplo da micromodelagem simplificada, ou mesoescala, é o trabalho de Pietruszczak e Shieh-Beygi (2008), que descreve o comportamento inelástico do concreto durante uma falha progressiva, propondo uma formulação para a representação da compressão de blocos unidos por argamassa. Em suas representações os autores indicam os planos de deslizamento que são as interfaces entre as unidades e a argamassa, comparando os resultados de sua aproximação com resultados experimentais realizados por outros pesquisadores.

Pode-se citar a modelagem da interface na alvenaria, que leva em consideração o comportamento em estado biaxial de tensões e a perda de aderência na tração, nela as interfaces interagem segundo o modelo clássico de atrito de Coulomb. Segundo Nascimento Neto (2003), tal consideração não se verifica nas regiões dos lintéis dos painéis quando avaliados sobre flexo-compressão.

Pegon e Anthoine (1995) publicaram sugestões na macromodelagem, isto é, na homogeneização da alvenaria em uma estrutura uniforme, a grande dificuldade nesta homogeneização se deve a diferença de espessura entre os materiais e a existências de superfícies anisotrópicas (ZUCCHINI e LOURENÇO, 2002).

No trabalho de Pietruszczak e Ushaksaraei (2003) fez-se o uso da macromodelagem, considerando o comportamento inelástico do material e a anisotropia para descrever os estágios da deformação da alvenaria e encontrar a orientação dos planos de fissuração.

Através do ensaio de prismas, duas ou três fiadas de alvenaria, é possível obter correlações da resistência do sistema. Através de modelagens numéricas e ensaios experimentais, os trabalhos de Barbosa, Lourenço e Hanai (2010) conseguiram avaliar diferentes tipos de modelagem de prismas, concluindo que a análise não-linear tridimensional, pelos autores adotada, conseguiu representar satisfatoriamente quando comparada aos ensaios experimentais, em termos de carga última e os planos de ruptura.

Quando aplicado a problemas de análise estrutural, o conceito básico do método dos elementos finitos (MEF) é tal que o sistema estrutural contínuo pode ser modelado numericamente pela sua subdivisão em pequenas regiões, que conectados entre si, através de nós, formam o conjunto estrutural discreto. A deformação segue uma distribuição aproximada, segundo as funções de forma dos elementos selecionados.

Para problemas estáticos, a discretização, utilizando-se o MEF, resulta em um sistema de equações algébricas que são facilmente resolvidas, aplicando-se técnicas computacionais adequadas. Por ser um método numérico, a solução obtida é aproximada e para se obter uma resposta satisfatória deve-se escolher o tipo adequado de elemento finito, assim como a quantidade e a disposição geométrica do mesmo.

No campo de pesquisa da alvenaria estrutural destacam-se os trabalhos que buscam determinar a tensão admissível da alvenaria e o fator de eficiência, fator que correlaciona a resistência da alvenaria, pequenas paredes ou prismas com a unidade.

Segundo Albertini (2009), a utilização de elementos prismáticos regulares parabólicos com vinte nós, para representação da alvenaria, é recomendada, pois permite a modulação tridimensional dos prismas.

Pedreiro (2011) faz uso do Método dos Elementos Finitos utilizando elementos prismáticos triangulares lineares, com seis nós, e parabólicos com quinze nós, simulando as partes do bloco de concreto bem como as juntas de argamassa. É feita a modulação tridimensional do prisma, além de considerar, de forma separada, as características físicas de cada material citado.

2.4. Modelagem de Prismas de Alvenaria

O comportamento da alvenaria submetida à compressão, na direção normal a junta, tem uma importância crucial para efeitos de projeto e de avaliação estrutural. Isto levou vários códigos e normas a estabelecerem meios de obter a resistência à compressão da alvenaria, f_m . As recomendações sugerem que a resistência pode ser determinada a partir do método da resistência unidade-argamassa. Esse método estabelece a resistência à compressão da alvenaria a partir da resistência à compressão da unidade de alvenaria e do tipo de argamassa especificado (ENV 1996-1:2005), ou, alternativamente, a partir do método de teste de prisma (ASTM C 1314:2014, CSA S304.1:2004).

O teste de prisma é internacionalmente aceito para representar a alvenaria (ASTM C 1314: 2014, NBR 15961-1: 2011, AS37000: 2001), mas há poucos modelos não-lineares matemáticos que tentam reproduzi-lo (AHMED e SHRIVE, 1996).

Os resultados dos prismas são altamente suscetíveis a geometria dos mesmos, a técnica de teste e os detalhes de construção. A relação entre a força de prisma e força de alvenaria em estruturas é dependente da relação altura-para-espessura do prisma e da

restrição e rigidez do prato de aplicação de carga (HAMID e CHUKWUNENYE, 1986, PAGE e SHRIVE, 1988, PAGE e KLEEMAN, 1991, PAGE, SIMUNDIC e HAN XIE, 1991).

2.4.1. Propriedades dos materiais

O modo de falha de prismas depende da diferença de módulo de elasticidade entre a unidade e a argamassa. O primeiro modo de falha ocorre quando a argamassa mais rígida do que a unidade, devido a expansão lateral da argamassa sobre compressão, e devido ao atrito entre os materiais, faz com que ocorra uma restrição da deformação lateral da argamassa, que conduz a um estado de compressão triaxial na argamassa e de tração no bloco, que fatura por ter baixa resistência a tração. O segundo modo, quando a resistência da argamassa é mais baixa do que a da unidade, faz com que ocorra o esmagamento de argamassa e que inicie o processo de fissuração e posteriormente de falha (MOHAMED, LOURENÇO e ROMAN, 2006).

O modo de ruptura do prisma está diretamente ligado com a relação da resistência do bloco e da argamassa (MOHAMED, LOURENÇO e ROMAN, 2006).

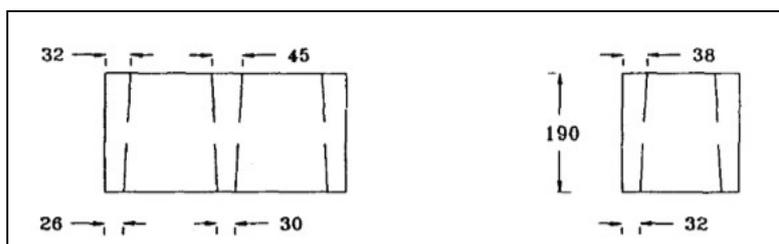
A caracterização do material do bloco, pela bibliografia consultada (BARBOSA, LOURENÇO e HANAI, 2010), pode ser realizada através da moldagem de corpos de prova com o mesmo material utilizado na moldagem do bloco. Entretanto, pela condição de fabricação do bloco, isto é, pelo processo de vibroprensagem, os resultados podem não representar de forma fiel o material.

Devido à pressão e cura inerente ao processo de fabricação, o comportamento do concreto constituinte do bloco tem diferença do concreto moldado de forma convencional com o mesmo traço (BARBOSA e HANAI, 2009, FRASSON JÚNIOR 2000).

Outra característica para o processo de produção é que ele pode atribuir um comportamento diferente nas direções do bloco, isto é, confere ao material constituinte do bloco certa anisotropia (MANGUEIRA, OLIVEIRA NETO E AZAMBUJA, 2012).

Para facilitar a desforma da unidade, os blocos de concreto, em sua maioria, têm variação da espessura das suas paredes, representada na FIGURA 9. Apenas alguns pesquisadores consideram esta variação na modelagem (AHMED E SHRIVE, 1996).

FIGURA 9. VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO BLOCO.



FONTE: AHMED E SHRIVE (1996).

2.4.2. Não-linearidade física

O bloco de concreto e a junta de argamassa são materiais frágeis e tem comportamento não-linear, com amolecimento sob elevações tensões. Dois modelos amplamente utilizados para representar esta não-linearidade é o de danificação com plastificação do concreto e o de fissuração distribuída (GOMES, 2001).

Segundo Kotsovos (2015), o uso de modelos para o concreto, baseados na teoria do dano, têm boas respostas na representação do comportamento não-linear de estruturas, com a perda de rigidez do material sob acréscimo de carregamento mecânico (KOKSAL, KARAKOÇ E YILDIRIM, 2005). Modelos danificados fornecem uma medida de degradação do material em escala micro-mecânica (CHOW e WANG, 1987).

O tensor de dano D varia de zero, que representa o material não danificado, a um, o que representa perda total de resistência. O tensor deve refletir o estado de dano do material sob uma carga de serviço, causada pela presença de microfissuras e cavidades (JANKOWIAK e LODYGOWKI, 2005).

O modelo de fissuras distribuídas para o concreto pressupõe dois modos principais de comportamento: um modo frágil em que microfissuras se aglutinam para formar microfissuras discretas, que representam as regiões de deformação altamente localizadas, e um modo dúctil, onde microfissuras se desenvolvem, mais ou menos uniformemente, por todo o material, levando à deformação distribuída.

Um dos problemas apontados neste modelo é que o tamanho da malha pode mudar o resultado e pode não chegar a uma convergência em um teste de malha (HILLERBORG, MODÉER E PETERSON, 1976).

2.4.3. Modelagem Interface prismas

No teste de compressão de prismas, a argamassa sofre esforço de compressão axial, em seguida, devido a este estado de tensão gerado, a argamassa expande lateralmente. No entanto, devido à fricção entre a argamassa e o bloco, e a diferença dos materiais no módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, ocorre uma restrição da expansão da argamassa, que leva a tensões de tração no bloco, esforço responsável pelo início da ruptura dos prismas. Assim sendo, a área de interface é extremamente importante na modelação numérica do prisma (DOMEDE *et al*, 2009).

Alguns pesquisadores consideram o critério de atrito de Coulomb para representar esta interface, para o modelo é necessário se conhecer o parâmetro de fricção e de coesão (LOURENÇO, ROTS e BLAAUWENDRAAD, 1997, HAACH, RAMALHO e CORREA, 2013).

2.4.4. Pratos do ensaio

Os ensaios efetuados em unidades de alvenaria e prismas, com uso de pratos de aplicação de carga flexíveis, podem fornecer uma resistência artificial à compressão, devido ao efeito de deformação e restrição das placas, e pode ainda mudar o modo de ruptura (PAGE e KLEEMAN, 1991).

O impacto dessa relação tem sido abordada por vários códigos, como: CSA S304.1: 2004 e ASTM C1314: 2011. Neste trabalho, somente prismas com mesma altura-espessura (h/t) foram modelados. Sugere-se que, para futuras pesquisas, ensaios com diferentes relações devem ser realizados.

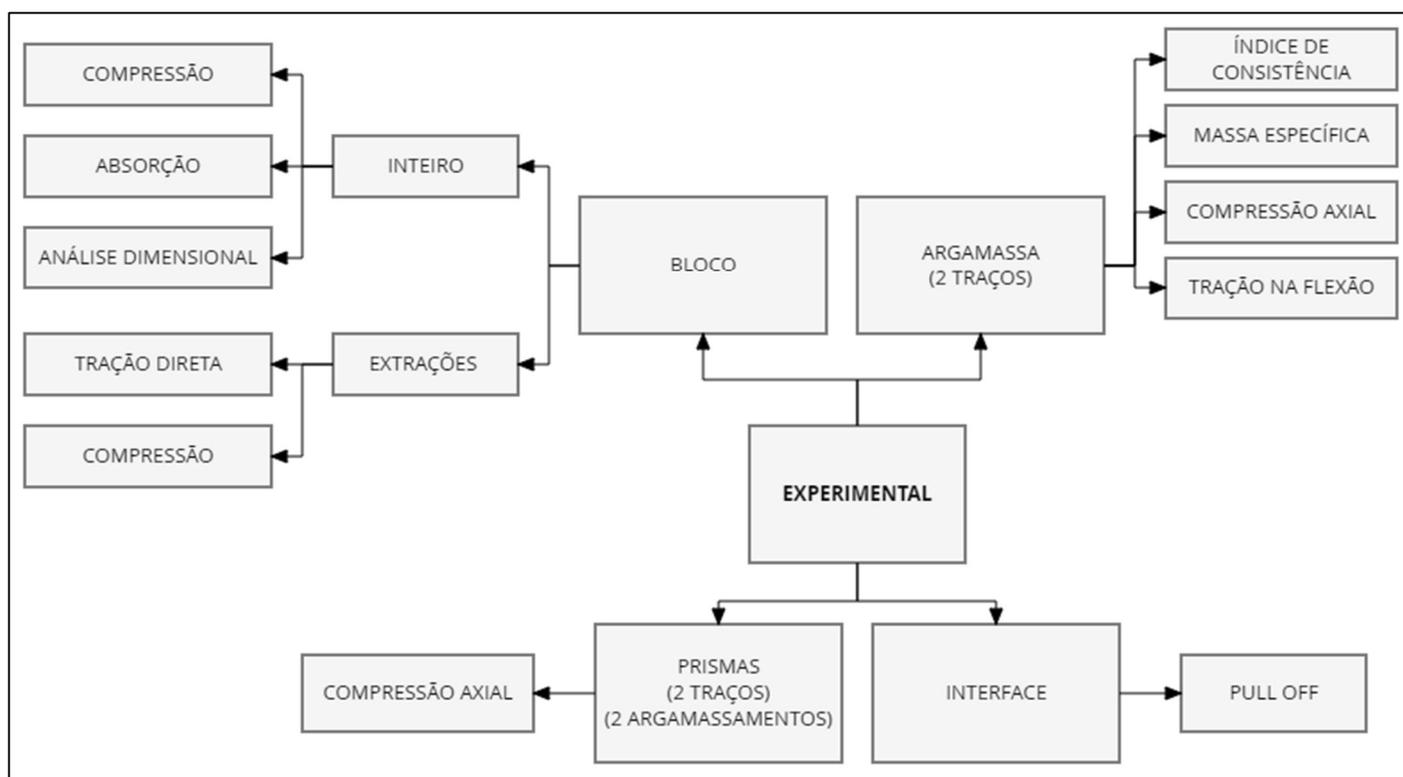
A norma brasileira exige que a espessura mínima da placa de rolamento de aço seja de 50 mm, quando as cargas são menores que 1000 kN, de 75 mm quando são menores de 2.000 kN e de pelo menos 100 mm com cargas inferiores a 3.000 kN (NBR 12118: 2013).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental realizado propõe a realização de ensaios para a caracterização e a obtenção dos parâmetros dos materiais utilizados na alvenaria a ser estudada. Essa etapa foi realizada de forma a permitir a modelagem em elementos finitos na continuidade do trabalho, uma vez que foram obtidas as propriedades mecânicas dos materiais constituintes da alvenaria. O presente capítulo descreve a metodologia proposta para a realização dos ensaios do estudo.

Para verificação e calibração dos modelos e dos materiais utilizados no programa numérico, além dos materiais constituintes da alvenaria, bloco e argamassa, também foram ensaiados prismas de alvenaria, de forma a permitir a avaliação da interface e modos de ruptura da alvenaria. O fluxograma apresentado na FIGURA 10 organiza os ensaios realizados em cada material.

FIGURA 10. FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL PROPOSTO.



FONTE: O AUTOR (2017).

3.1. Blocos

Foram ensaiados blocos de concreto vazados, pré-fabricados, do fabricante Grupo GAI, com dimensões de (14x39)cm, em planta, e 19 cm de altura.

Segundo o fabricante, o bloco tem resistência característica (f_{bk}) de 6 MPa, em relação a área bruta, aos 28 dias. O tipo de cimento utilizado foi o CPV ARI RS e foi empregado o traço 1:18 (cimento : agregados), sendo utilizados como agregados: areia, pedrisco e pó de pedra. O bloco de concreto foi moldado por uma máquina vibro prensa, com tempo de ciclo de 12 segundos, formando 8 unidades por ciclo. O processo de cura deu-se em condições naturais de laboratório, sem controle de temperatura e umidade.

Primeiramente foi realizada uma análise dimensional do bloco, conforme a NBR 12118 (2013), ou seja: medição da largura, comprimento e altura em três pontos distintos, bem como as espessuras das duas faces, com o auxílio de um paquímetro de precisão conforme ilustrado na FIGURA 11.

FIGURA 11. ANÁLISE DIMENSIONAL DOS BLOCOS COM PAQUÍMETRO.



FONTE: O AUTOR (2017).

Realizou-se o ensaio de absorção de água do bloco, seguindo as recomendações da NBR 12118 (2013), na qual são tomados 6 blocos de concreto e submetidos a um processo de secagem, através do mantimento 24h em estufa a 105°C, e a um processo de saturação. A taxa de absorção é calculada pesando o bloco anteriormente ao processo de saturação e posteriormente ao mesmo. A etapa de secagem em estufa pode ser observada na FIGURA 12.

FIGURA 12. PROCESSO DE SECAGEM DO BLOCO DE CONCRETO.



FONTE: O AUTOR (2017).

Para verificar a resistência do bloco de concreto à compressão foram realizados ensaios em 6 unidades, de acordo com a NBR 12118 (2013), conforme FIGURA 13.

As rupturas dos prismas foram realizadas em uma prensa da marca SEMIG (FIGURA 13), disponível no laboratório de Engenharia Civil da PUCPR com capacidade de 100tf. O ensaio foi realizado com uma velocidade de carregamento de 150 N/s e prato metálico com espessura de 50mm, de acordo com NBR 12118 (2013)

FIGURA 13. ENSAIO DE COMPRESSÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO.



FONTE: O AUTOR (2017).

Para ensaio do material constituinte do bloco optou-se em pela extração de corpos de prova do bloco, indo de encontro ao realizado em trabalhos como o de Ganzerli *et al* (2003), Marzahn (2003) e Becica e Haris (1983).

Tal extração foi realizada através de cortes com serra circular manual, com devida marcação para se obter prismas com variação dimensional de no máximo 2mm. A dimensão do prisma ficou limitada a espessura da parede do bloco (2,6cm) e sua altura foi adotada como duas vezes a sua espessura, para se obter corpos de prova com proporção 1:2, conforme FIGURA 14.

Os corpos de prova extraídos foram submetidos a ensaios de compressão axial para se obter a curva de tensão-deformação e a carga de ruptura do material, dados necessários para a modelagem numérica.

FIGURA 14. EXEMPLOS DE CORPOS DE PROVA EXTRAÍDOS DOS BLOCOS DE CONCRETO.



FONTE: O AUTOR (2017).

Para o ensaio de tração direta foram realizadas extrações, com uma relação altura/espessura igual a 8, para evitar que a concentração de tensões nos extremos pudesse interferir na ruptura do material. As extrações foram das paredes, tanto septo transversal como lateral, na vertical, compatível com a direção do ensaio.

Foi realizada uma redução da seção central do prisma extraído, com o auxílio de uma furadeira, de forma a forçar que a ruptura acontecesse nesta seção, evitando assim a ruptura nas regiões da extremidade, que estavam coladas com adesivo Epóxi (Vedacit), de alta resistência, nos pratos da prensa. As dimensões finais foram averiguadas por meio de um paquímetro digital de precisão.

No ensaio de tração direta foi empregada uma velocidade de carregamento de 500 N/s, que era a mínima do equipamento, devido à pequena resistência do elemento a

tração, quis se evitar que perturbações devido à velocidade do carregamento alterassem a resistência última. O ensaio está ilustrado na FIGURA 15.

FIGURA 15. ENSAIO DE TRAÇÃO DIRETA DE ESPÉCIMES EXTRAÍDOS DO BLOCO DE CONCRETO.



FONTE: O AUTOR (2017).

O ensaio de tração direta também foi realizado, utilizando um equipamento com garras colados com epóxi ao espécimen, porém neste, com relação altura-espessura igual a 4, conforme FIGURA 16. Esta outra metodologia foi realizada para comparar os resultados com a anterior.

FIGURA 16. ENSAIO DE TRAÇÃO DIRETA COM GARRAS NO CONCRETO EXTRAÍDO.



FONTE: O AUTOR (2017).

3.2. Argamassa

Para o estudo da interface bloco/argamassa e com o intuito de verificar o efeito de esmagamento comentado na literatura (MOHAMED, LOURENÇO e ROMAN, 2006) foram adotados dois traços, sendo um deles considerado fraco e o outro forte (TABELA 1). Os traços adotados foram retirados de recomendações práticas retiradas de sites comerciais na internet.

TABELA 1. TRAÇOS DAS ARGAMASSAS ESTUDADAS.

Tipo da Argamassa	Traço (Cimento:Cal:Areia:Água) em volume	Traço (Cimento:Cal:Areia:Água) em massa	Consumo de Cimento (kg/m³)
Fraco	1,0 : 1,0 : 6,0 : 4,5	1 : 0,8 : 4,8 : 1,5	240
Forte	1,0 : 0,5 : 4,5 : 3,0	1 : 0,4 : 3,6 : 1,0	333

FONTE: O AUTOR (2017).

3.2.1. Caracterização dos Aglomerantes

O cimento empregado é do tipo Portland com adição de Pozolana, classificado como CP-II-Z 32R pela NBR 5736 (1999), da marca *Votorantin*, comumente utilizado em obras locais. A cal utilizada é do tipo dolomítica, classificada como CH-III pela NBR 7175 (2003) da marca *Cal Natureza*, tipo empregado para assentamento de alvenaria. As massas específicas do cimento e da cal estão dispostas na TABELA 2.

TABELA 2. MASSA ESPECÍFICA DA CAL E DO CIMENTO.

Material	Massa Específica (g/cm³)
Cal - CH-III	2,35
Cimento - CP-II-Z 32	3,00

FONTE: O AUTOR (2017).

3.2.2. Caracterização da Areia

A areia empregada é oriunda da região de São Luiz do Purunã no Paraná, e é classificada como fina pela norma NBR 7211 (2009). A areia utilizada pelo grupo de pesquisa de materiais da Universidade Federal do Paraná apresenta as propriedades na TABELA 3, conforme Capraro (2016).

TABELA 3. CARACTERIZAÇÃO DA AREIA.

Propriedade	Valor obtido no ensaio	Norma técnica
Massa Específica (g/cm ³)	2,38	NBR NM 52 (2009)
Massa Unitária Solta (g/cm ³)	1,496	NBR NM 45 (2006)
Módulo de finura	1,41	NBR NM 248 (2003)

FONTE: CAPRARO (2016).

3.2.3. Caracterização das Argamassas

O procedimento de mistura da argamassa e os ensaios de compressão axial e tração na flexão foram realizados conforme as normas brasileiras NBR 13276 (2005) e NBR 13279 (2005), respectivamente.

Para os ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão nas argamassas foram moldados corpos de prova prismáticos de dimensão (4x4x16) cm, realizando a mistura em misturador mecânico, conforme descrito na NBR 13276 (2005).

A argamassa, por ter cal em sua composição, teve que ser pré-misturada em velocidade lenta, com cal, areia e 80% da água de amassamento. Depois de misturada e pesada foi deixado descansar por 24h, para evitar hidratação tardia da cal e possível fissuração do material. Posteriormente a esse intervalo, foi pesada novamente e foi acrescida a mistura: o cimento, o restante da água e a água perdida por evaporação no período. Após os ensaios de caracterização no estado fresco (índice de consistência e massa específica) foi realizado o preenchimento dos moldes (4x4x16) cm em três camadas distintas, conforme recomendação NBR 13276 (2005).

Para retirada do ar aprisionado foi realizado o adensamento, através de mesa vibratória, conforme FIGURA 17A, que aplica 30 golpes por camada. Ao término do preenchimento do molde a seção superior foi nivelada e deixada com filme plástico para evitar perda de água, conforme FIGURA 17B.

A desforma foi realizada 48 horas depois e os corpos de prova foram armazenados em ambiente com umidade e temperatura controladas, respectivamente de 45% e 24°, até a idade de 28 dias para ruptura.

FIGURA 17. MESA DE ADENSAMENTO (A) MOLDES COM FILME PLÁSTICO (B).



FONTE: O AUTOR (2017).

A ruptura dos corpos de prova foi realizada em uma prensa com capacidade máxima de 100 kN da Marca EMIC, do LAME, Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade Federal do Paraná.

3.2.3.1. Índice de consistência

O índice de consistência das argamassas foi obtido através do ensaio flow-table, segundo NBR 13276 (2005). O procedimento consiste no preenchimento, em três camadas sucessivas seguidas de adensamentos, de um troco cônico sobre o tampo da mesa para índice de consistência. Foi realizado o arrasamento da argamassa com uma régua metálica e posteriormente o molde do troco de cone foi retirado verticalmente. Por fim, a manivela da mesa foi acionada de modo que a mesa suba e caia 30 vezes em 30 segundos. O resultado do ensaio foi obtido através da média da medição de três diâmetros (FIGURA 18).

FIGURA 18. ENSAIO DE CONSISTÊNCIA DE ARGAMASSAS.



FONTE: O AUTOR (2017).

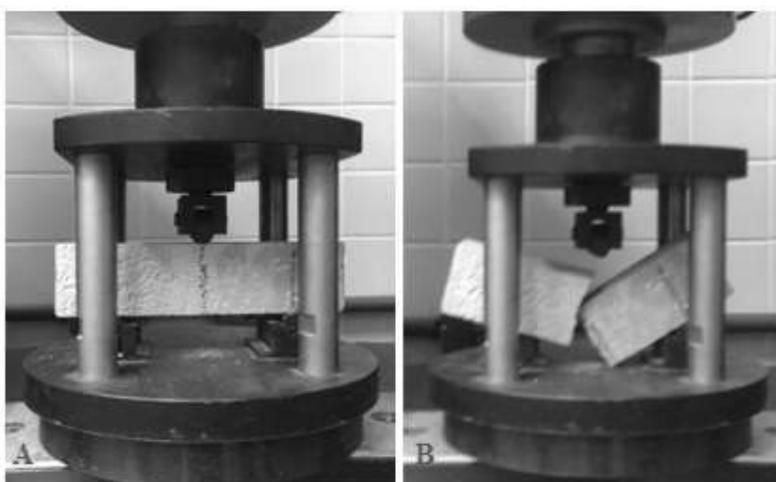
3.2.3.2. Massa Específica

Ainda, após a mistura das argamassas, foi realizado o ensaio de massa específica do material no estado fresco. O ensaio consiste no preenchimento, em 3 camadas, de um recipiente de volume conhecido, e posterior adensamento, com 20 golpes com espátula por camada. Por fim, o recipiente é pesado e a massa específica é obtida através da razão da massa de pasta e do volume do recipiente, conforme NBR 13278 (2005).

3.2.3.3. Ensaio de Tração na Flexão

Primeiramente, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração na flexão. Para cada traço eram rompidos seis corpos de prova, de modo que o resultado do ensaio foi dado pela média deles. Os procedimentos adotados como: posicionamento do corpo de prova prismático na prensa e velocidade de aplicação de carga seguiram as recomendações da NBR 13279 (2005). Na FIGURA 19A é apresentado o corpo de prova prismático para a aplicação de cargas, nela percebe-se a demarcação central para o correto posicionamento do mesmo. Na FIGURA 19B observa-se a configuração do corpo de prova ao final do ensaio.

FIGURA 19. ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS (4x4x16) cm –FIGURA (A) POSICIONAMENTO DO CORPO DE PROVA; FIGURA (B) CONFIGURAÇÃO DO CORPO DE PROVA APÓS O ENSAIO .



FONTE: O AUTOR (2017).

Cabe ressaltar que este tipo de ensaio de tração é uma medição indireta do comportamento a tração do material, e diferente do ensaio em concreto, que possui dois

pontos de aplicação de carga, tal ruptura não se dá exclusivamente pela flexão, já que só há um ponto de aplicação de carga.

Porém, para efeito de cálculo, a tensão de tração na fibra mais tracionada, devido à flexão no momento da ruptura, é tomada como resistência a tração do material. A EQUAÇÃO 03 mostra o cálculo da resistência, em função da força de ruptura deste ensaio, para seções retangulares.

$$M = \frac{F_{max} * L^2}{8} ; W = \frac{b * h^3}{12} ; \sigma = \frac{M}{W} = \frac{3 * F_{max} * L^2}{2 * b * h^3} \quad (03)$$

Em que F_{max} a força de ruptura, L a distancia entre apoios, b e h as dimensões do prisma.

3.2.3.4. Ensaio de compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado na sequência do ensaio de tração na flexão. Como os corpos de prova prismáticos foram rompidos anteriormente, neste ensaio foi feita a aplicação de carga nas metades (4x4x8cm) conforme FIGURA 20 de modo que o resultado do ensaio foi dado pela média delas. O ensaio foi realizado na mesma prensa, sendo alterado somente o aparato de apoio do corpo de prova. A velocidade de carregamento seguiu a indicada na norma, porém o critério de parada alterou-se para 50% de queda de tensão pós-pico, para se obter a curva desta fase final do ensaio, isto é curva após a tensão máxima.

FIGURA 20. APLICAÇÃO DE CARGA NO ENSAIO DE COMPRESSÃO NOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS.



FONTE: O AUTOR (2017).

3.3. Interface Argamassa-Bloco

Para se obter as propriedades mecânicas da interface, característica importante para modelagem (ALI e PAGE, 1998, ALMEIDA, LOURENÇO e BARROS, 2002), foram realizados ensaios para determinação da máxima tensão de aderência entre os elementos, através do ensaio de arrancamento, *pull-off*, de acordo com a NBR 13528 (2005) (FIGURA 21).

Foram moldadas bolachas de argamassa de seção circular, com o auxílio de moldes circulares de PVC branco, de forma a garantir a dimensão da circunferência de argamassa com diâmetro de 7cm. Depois de 24h foi colado, com adesivo epóxi, pastilhas metálicas com encaixe para o equipamento de arrancamento, na face superior das argamassas coladas no bloco. O ensaio consiste na aplicação de cargas de tração, de forma a verificar a adesão dos materiais.

FIGURA 21. ENSAIO DE ARRANCAMENTO DA INTERFACE BLOCO/ARGAMASSA.



FONTE: O AUTOR (2017).

3.4. Prismas

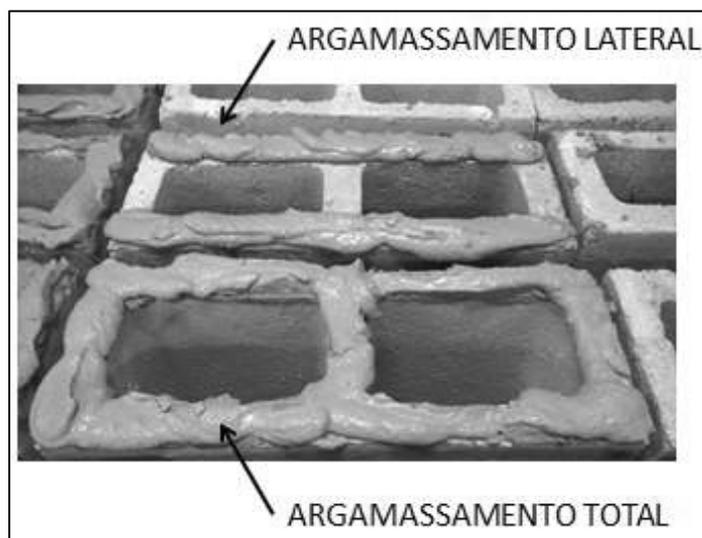
Foram ensaiados prismas de três fiadas, com blocos vazados de concreto, e dois traços de argamassa distintos, variando-se também o tipo de argamassamento entre total e lateral. Para efeito estatístico, optou-se pela moldagem de 6 prismas para cada combinação de tipo de argamassa e tipo de argamassamento, totalizando 24 prismas.

O argamassamento total é o método utilizado quando há o preenchimento de toda a área líquida do bloco na confecção do prisma, sendo este o padrão do ensaio da NBR 15961-2 (2011). Porém, é comum, em obras convencionais, o argamassamento apenas das paredes laterais do bloco, conhecido como argamassamento lateral, chamado de

face-shell bedding (MATA, 2006). Os dois argamassamentos podem ser visualizados na FIGURA 22.

A norma de projeto de alvenaria estrutural, NBR 15961-1 (2011), recomenda a redução de 20% na resistência de cálculo da alvenaria, quando se utiliza o argamassamento lateral. Devido a isto, o programa experimental também tem o intuito de verificar este efeito de redução na capacidade resistente.

FIGURA 22. TIPOS DE ARGAMASSAMENTO UTILIZADOS.



FONTE: O AUTOR (2017).

A metodologia de ensaio de resistência a compressão axial dos prismas foi embasada na NBR 15.961-2 (2011), e a espessura da junta foi restringida a 10 ± 2 mm, em ambas condições de argamassamento.

O capeamento das faces do prisma foi realizado com pasta de cimento (FIGURA 23), com relação água/cimento de 0,5, com espessura média de 2mm. Tal capeamento tem por objetivo regularizar as superfícies do carregamento do bloco e garantir o paralelismo das faces.

FIGURA 23. PRISMAS CAPEADOS COM PASTA DE CIMENTO.



FONTE: O AUTOR (2017).

Para melhor desforma dos prismas foi passado desmoldante, de origem mineral, antecipadamente, na base de uma mesa plana, onde as fiadas foram erguidas, conforme FIGURA 24.

No momento da moldagem dos prismas foi empregada uma régua de nível, para garantir o paralelismo das faces. Os prismas não foram submetidos a nenhum tipo de perturbação por até 4 dias após a execução das fiadas. Após esse período os prismas foram tombados e foi executado o procedimento de capeamento na face oposta. Eles ficaram armazenados sobre as bancadas do laboratório sem nenhum tipo de cura específica.

FIGURA 24. MOLDAGEM DOS PRISMAS SOBRE BANCADA COM DESMOLDANTE E PASTA DE CAPEAMENTO.



FONTE: O AUTOR (2017).

Na data de assentamento dos prismas, os blocos estavam com 28 dias de idade, assim sendo, no dia das rupturas, as argamassas e prismas estavam com 28 dias e os blocos com 56 dias.

As rupturas dos prismas foram realizadas em uma prensa da marca SEMIG (FIGURA 25), disponível no laboratório de Engenharia Civil da PUCPR com capacidade

de 100tf. O ensaio foi realizado com uma velocidade de carregamento de 150 N/s, conforme norma 12118 (2011) e aplicação de carga foi utilizado um prato metálico com espessura de 50mm, compatível com o mínimo exigido pela referida norma.

FIGURA 25. ENSAIO DE COMPRESSÃO DOS PRISMAS.

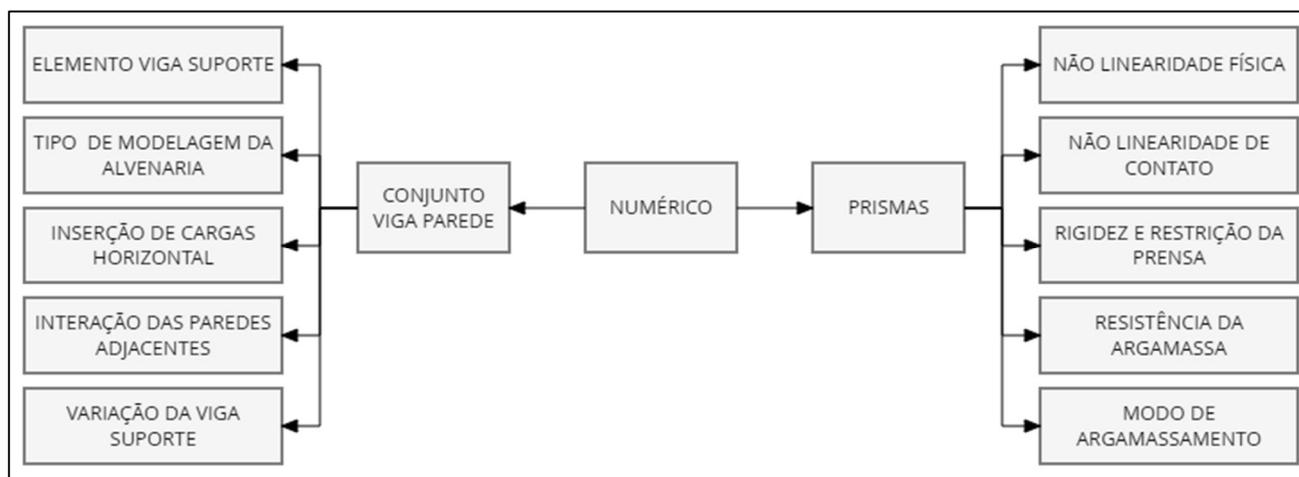


FONTE: O AUTOR (2017).

4. PROGRAMA NUMÉRICO

O presente programa numérico foi dividido em duas etapas. A primeira refere-se à simulação numérica de prismas de alvenaria, conforme o programa experimental, para validar as propriedades a serem consideradas na modelagem dos elementos constituintes da alvenaria e da interface. A segunda etapa tem por objetivo apresentar a metodologia de modelagem das paredes de alvenaria sobre vigas flexíveis, de forma a verificar a atuação do efeito arco. O fluxograma da FIGURA 26 exemplifica as etapas de modelagem.

FIGURA 26: FLUXOGRAMA DO PROGRAMA NUMÉRICO PROPOSTO.



FONTE: O AUTOR (2017).

4.1. Simulação numérica dos prismas de alvenaria

Foram simulados prismas de alvenaria com blocos de concreto vazados, conforme programa experimental, com dois modos de argamassamento e dois traços de argamassa.

Nesta pesquisa a análise numérica foi baseada no método dos elementos finitos e utilizou-se do programa comercial ABAQUS / CAE 6.14. Foi realizado um micro-modelo de alvenaria, que consiste na discretização separada de argamassa e da unidade. O modelo consiste em um sólido tridimensional com a mesma geometria utilizada no programa experimental. Todos os elementos empregados possuíam 8 nós, com 3 graus de liberdade em cada nó e usou-se uma interpolação linear. O elemento utilizado foi o CD38R.

A malha de elementos finitos utilizada foi considerada adequada após uma convergência no teste de malha, após um refinamento tipo-h, e o tamanho final de elementos foi de aproximadamente um quarto da espessura do bloco, próximo a um cubo de 5mm. O teste consistiu na verificação das tensões principais máximas, por meio da variação dimensional da malha, o critério de parada foi quando a variação das tensões ficou menor que 5%. Totalizando 23051 elementos, sendo 2662 em cada junta de argamassa e 5909 em cada bloco de concreto.

Como condições de contorno na superfície superior do prisma foram aplicados deslocamentos monotônicos e foram restringidos deslocamentos na base do prisma.

As propriedades dos materiais foram consideradas com modelos não-lineares, de modo que um processo iterativo com base no procedimento de comprimento de arco é utilizado para alcançar a convergência do sistema, utilizando o procedimento iterativo de Newton-Raphson normal.

Não foi aplicado passos de carga e sim de deslocamentos, para possibilitar a convergência, visto que os modelos dos materiais eram não-lineares e tinham decréscimo de carga suporte ao longo de sua deformação.

Este estudo visa compreender melhor o comportamento complexo de prismas submetidos à compressão, através da análise dos principais parâmetros envolvidos e necessários a uma reprodução numérica. Com tudo, não será feita a análise da relação entre a resistência da parede de alvenaria com o teste de prisma, por esta ser uma análise que dependeria de outros fatores e dependeria de ensaios mais complexos para sua calibração.

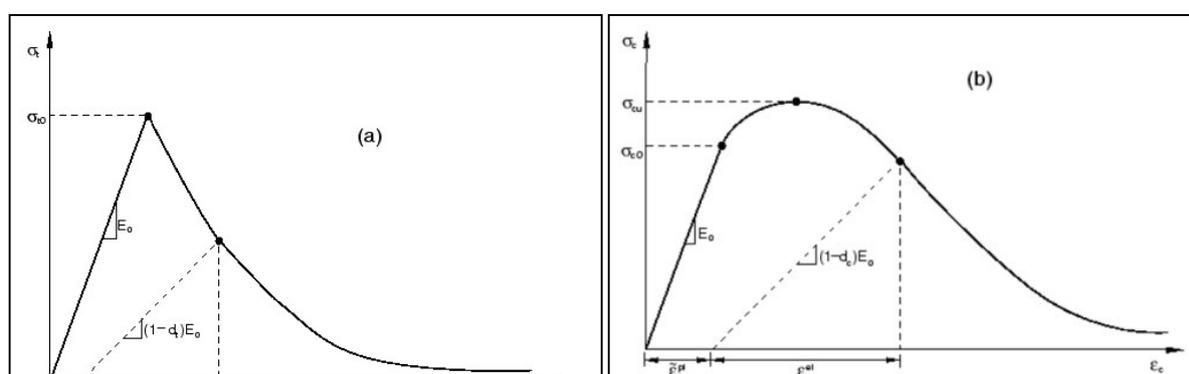
Foram avaliados, de forma separada, alguns parâmetros importantes na simulação numérica dos prismas, para verificar suas influencias no resultado final do ensaio, sendo eles:

- i. Tipo de não-linearidade física considerado e diferentes critérios de ruptura;
- ii. Não-linearidade de contato;
- iii. Consideração da rigidez e restrição dos pratos da prensa;
- iv. Resistência da argamassa;
- v. Modo de argamassamento.

4.1.1. Não-linearidade dos materiais e critérios de falha

O presente trabalho teve uma abordagem numérica não-linear simulada por meio de um modelo de dano isotrópico, com base na hipótese de deformação equivalente. Este modelo é capaz de descrever o comportamento diferente do material, sob tração e compressão, através da introdução de duas variáveis de dano independentes, conforme FIGURA 27.

FIGURA 27. MODELO DA RESPOSTA DE CONCRETO PARA O CARREGAMENTO UNIAXIAL EM TENSÃO (a) E DE COMPRESSÃO (b).



FONTE: ABAQUS MANUAL (2016).

O critério de escoamento de Drucker-Prager foi usado para descrever a falha dos materiais no modelo de dano plástico. Portanto, por ser um método que depende do estado triaxial de tensões e os ensaios realizados no programa experimental se restringirem ao uniaxial, alguns dos parâmetros do concreto foram considerados com valor igual ao encontrado por Jankowiak e Lodygowki (2005). Tais valores estão apresentados na TABELA 4.

TABELA 4. PARÂMETROS DE DANO ADOTADOS.

Propriedade do Modelo de Dano Plástico

Ângulo de Dilatação = 38°

Excentricidade = 0,1

$f_{cb}/f_{co} = 1,16$

$K = 0,6666$

FONTE: ADAPTADO DE JANKOWIAK E LODYGOWKI (2005).

4.1.2. Não-linearidade de contato

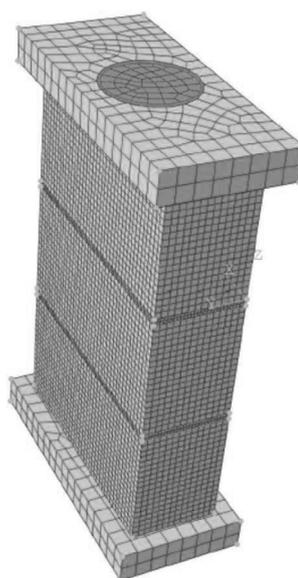
Os dados utilizados no modelo de interface entre argamassa e bloco de concreto deste trabalho foram baseadas no resultado de bibliografia, de 0,7 para o coeficiente de atrito e 0,39 MPa para a coesão, de acordo com Grilo *et al* (2012). Outra inclusão no modelo foi a consideração da tensão máxima de adesão, que é a tensão de tração máxima suportada pela interface, para isto utilizou-se os resultados do teste de arrancamento, conduzido no programa experimental.

Os modelos de interface para o comportamento tangencial disponíveis no Abaqus utilizados são o *frictionless*, *penalty* e *rough*, que representam respectivamente, modelo sem atrito, modelo com atrito de Coulomb e modelo colado.

4.1.3. Consideração da rigidez e restrição da placa de ensaio

Uma placa com elementos tridimensionais foi utilizada na modelagem como mostra a FIGURA 28. A carga foi aplicada uniformemente em uma porção central que representa a cabeça da máquina (HAMID e CHUKWUNENYE, 1986). Assim, o efeito da rigidez da placa foi examinada para estudar o comportamento dos prismas. Sendo considerado para a placa um modelo elástico com as propriedades do aço A36 ($E=205$ GPA e $\nu=0,3$).

FIGURA 28. MODELO DO PRATO DE CARREGAMENTO.



FONTE: O AUTOR (2017).

4.1.4. Resistência da Argamassa

O modo de falha dos prismas depende da diferença entre o módulo de elasticidade do bloco e da argamassa. O primeiro modo de falha ocorre quando as unidades, que são mais rígidas que a argamassa, aliadas ao atrito, restringem a deformação lateral da argamassa levando a um estado de compressão triaxial e tração biaxial no bloco. O segundo modo, quando a resistência da argamassa é menor do que as unidades, o esmagamento da argamassa inicia o processo de fissuração e falha. De acordo com o programa experimental foram modelados prismas com dois tipos de argamassa para verificar este efeito.

4.1.5. Modo de argamassamento

Dois tipos de argamassamento foram considerados para prismas ocós: argamassamento lateral e total. A norma brasileira reduz a resistência do prisma de alvenaria em 20%, quando o argamassamento lateral é realizado, assim, para o programa experimental foram modelados ambos os tipos de assentamento para verificar esse efeito.

4.2. Modelos de conjuntos viga-parede

Após a modelagem dos prismas para validação e entendimento dos métodos de modelagem da alvenaria, realizou-se uma sequência de modelos em conjuntos viga-parede, para se verificar a atuação e as variáveis envolvidas no efeito arco.

Os painéis de alvenaria modelados representam uma porção da parede, com carregamento compatível a um prédio de oito pavimentos, sobre uma viga de concreto armado com comprimento de 5 metros. Este vão é convencional em pilotis por representar duas vagas de estacionamento de 2,5m cada.

Pela bibliografia já citada, Riddington e Smith (1978), o efeito arco se formará em uma altura próxima a 3 metros, aproximadamente 60% do vão, valor próximo do pé-direito usual. Dessa forma, foi realizada a modelagem de apenas um pavimento, com uma carga distribuída no topo de 400 kN/m, correspondente aos demais pavimentos.

O foco das modelagens é encontrar a distribuição do carregamento na viga suporte, o acréscimo de tensões gerado na alvenaria e o comportamento da interface.

Dado que existem muitas variáveis envolvidas e diversos tipos de modelagem que podem ser utilizados, o presente trabalho foi dividido em algumas etapas:

- i. Tipo de elemento da viga suporte
- ii. Tipo de modelagem da alvenaria
- iii. Inserção de cargas horizontais
- iv. Interação com paredes adjacentes
- v. Variação da geometria da viga suporte

4.2.1. Tipo de elemento da viga suporte

Nesta etapa foram realizados dois modelos, variando-se o tipo de elemento da viga suporte. Primeiramente, a viga suporte foi modelada como elemento de viga, com barras unidimensionais, depois como elemento plano, com elementos bidimensionais.

Para isto, fixou-se a modelagem da alvenaria, com o uso de uma macromodelagem, isto é, sem discretização das unidades e da argamassa, representando a alvenaria como um material homogêneo e de comportamento elástico.

Foram realizadas simulações com a viga representada com o modelo unidimensional de viga de Bernoulli, com dois graus de liberdade por nó, translação vertical e rotação. As paredes foram modeladas com elementos bidimensionais com graus de liberdade nas duas direções da parede. Logo os polinômios interpoladores, da viga e da parede, são diferentes. Sendo assim, esta interface confere ao problema uma não conformidade, visto que não há compatibilidade de deformações no intervalo interno aos nós, porém é muito utilizada na literatura.

4.2.2. Tipo de modelagem da alvenaria

Para avaliar a influência do tipo de modelagem da alvenaria nas paredes, foram realizados outros três modelos.

O primeiro considerou uma macromodelagem com elementos planos bidimensionais sobre comportamento exclusivamente elástico.

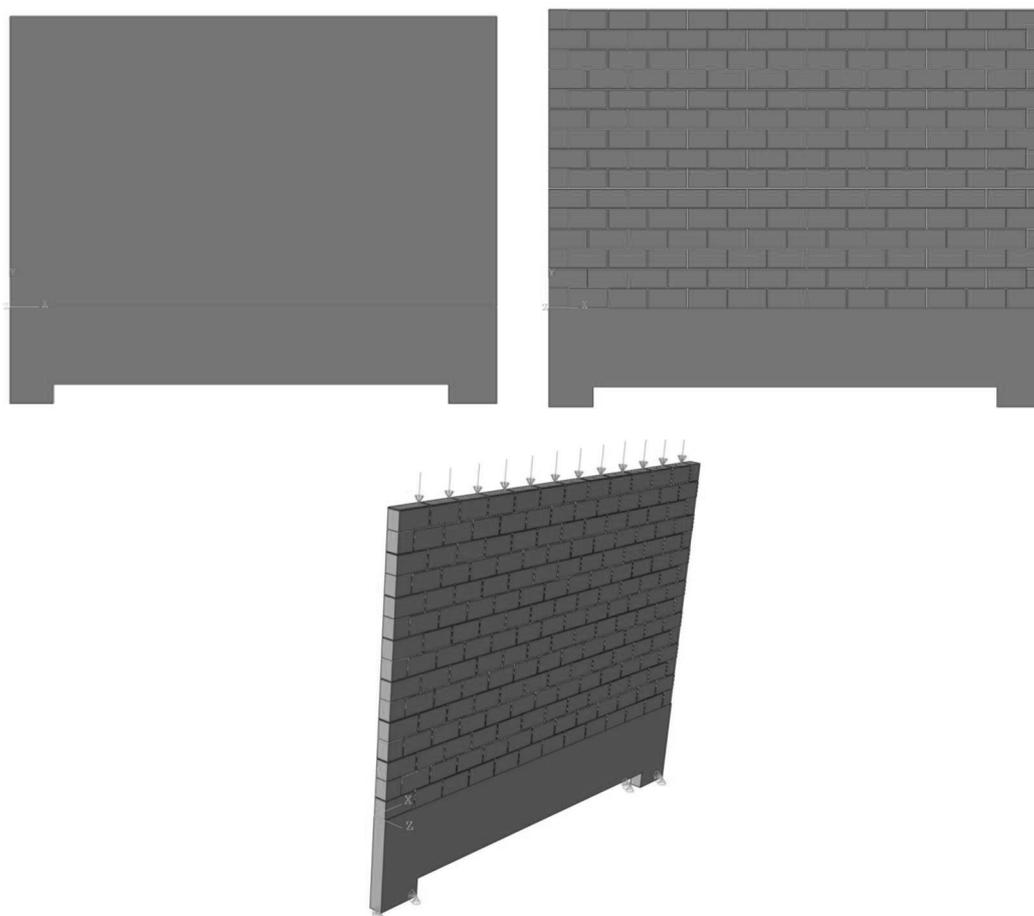
O segundo considerou uma micromodelagem bidimensional, discretizando a alvenaria conforme realizado nos prismas com comportamento elástico.

Os modelos bidimensionais utilizaram o elemento CPS4R com quatro nós, com interpolação linear para os elementos da alvenaria, e na viga elemento triangulares CPS3 com três nós, em ambos e dois graus de liberdade por nó e interpolação linear. Foram utilizados elementos triangulares na viga, devido a gerar melhor discretização e adaptação da malha na quina do apoio.

O terceiro modelo também considerou uma micromodelagem, porém tridimensional, com o intuito de avaliar a diferença de espessura e do posicionamento dos blocos e da argamassa. Apesar do alto custo computacional, hoje devido aos avanços da computação, já se vê possibilidade de tais testes. Nesta análise foram utilizados elementos tridimensionais sólidos tipo CD38R, com oito nós e três graus de liberdade por nó, também com interpolação linear.

A FIGURA 29 FIGURA 29. SIMULAÇÕES VARIANDO O MODELO DA ALVENARIA (A) MACRO-MODELAGEM (B) MICRO-MODELAGEM 2D (C) MICRO-MODELAGEM 3D apresenta a imagem com as malhas geradas para cada simulação realizada.

FIGURA 29. SIMULAÇÕES VARIANDO O MODELO DA ALVENARIA (A) MACRO-MODELAGEM (B) MICRO-MODELAGEM 2D (C) MICRO-MODELAGEM 3D

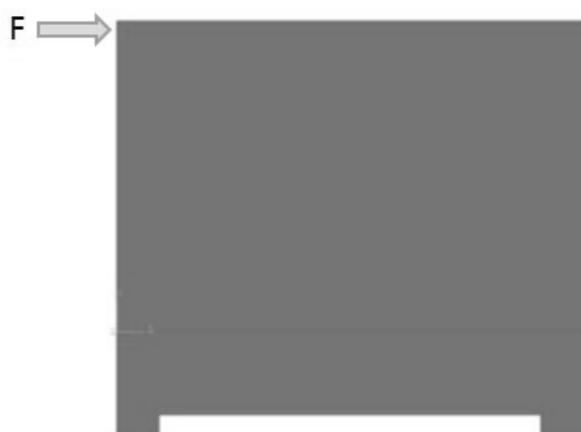


FONTE: O AUTOR (2017).

4.2.3. Inserção de cargas horizontais.

Segundo Barbosa (2000), a consideração de cargas horizontais altera significativamente a distribuição de carregamento na viga suporte. Logo foi aplicada uma carga horizontal de 80 kN, no topo da alvenaria, conforme FIGURA 30, valor proporcional ao prédio de oito pavimentos proposto. Nesta análise fixou-se a modelagem da viga e da alvenaria como macromodelagem bidimensional.

FIGURA 30. MODELO COM APLICAÇÃO DE CARGA HORIZONTAL NO TOPO.



FONTE: O AUTOR (2017).

4.2.4. Interação com paredes adjacentes.

Para considerar a interação das paredes adjacentes, que segundo Carvalho (2007) é de extrema importância na distribuição do carregamento das paredes, foram inseridas restrições, no modelo bi-dimensional, para simular tais interações, com restrição do deslocamento vertical, horizontal ou ambos nas faces laterais do modelo.

Tais hipóteses só seriam válidas se a parede adjacente tivesse rigidez suficiente para impedir tais deslocamentos e ainda estivesse sobre uma base indeformável. Além disto, o modelo despreza o carregamento da parede lateral que poderia interagir com a parede modelada.

No modelo tridimensional é possível modelar uma flange, isto é, um trecho da parede adjacente, para verificar melhor a influência desta interação. Sendo assim, coloca-se também a condição de apoio desta viga, bem como o carregamento no topo dela.

4.2.5. Variação da Geometria da viga suporte

Para verificação da influência da rigidez da viga suporte, na geração do efeito e consequentemente na distribuição do carregamento, foi modelado o exemplo com cinco seções diferentes para as vigas, dimensões usuais em edifícios residências. Na TABELA 5 estão dispostas as características geométricas. Nesta análise fixou-se a modelagem da viga e da alvenaria como macromodelagem bidimensional.

TABELA 5. PROPRIEDADES CONSIDERADAS NOS MODELOS.

Propriedades Geométricas			
Elemento	Largura(cm)	Altura(cm)	Inercia(dm⁴)
Viga 1	15	50	15,6
Viga 2	15	80	64,0
Viga 3	30	80	128,0
Viga 4	15	120	216,0
Viga 5	30	120	432,0

FONTE: O AUTOR (2017).

5. RESULTADOS

Neste item serão apresentados os resultados obtidos nos estudos experimentais e numéricos, respectivamente.

5.1. Resultados Experimentais

5.1.1. Blocos de concreto

Para apresentação dos resultados dos blocos de concreto foi realizada a divisão entre bloco inteiro e espécimes extraídos do bloco.

5.1.1.1. Bloco Inteiro

No ensaio de variação dimensional os blocos apresentaram baixa variação, não ultrapassando 1,5 mm na altura e no comprimento e 1mm na largura, menores que os limites de 3 e 2 mm previstos na NBR 6136 (2016). A espessura média encontrada foi de 27mm maior que o limite de 25mm para a Classe B do Bloco Estrutural utilizado, previsto na norma NBR 6136 (2016).

Outro ensaio realizado para caracterização do elemento foi o ensaio de absorção, o qual apresentou uma taxa média de 6,7% de absorção, com coeficiente de variação (CV) de 14%, logo a absorção ficou menor que 10% preconizado pela NBR 6136 (2016).

Os ensaios dos blocos inteiros a compressão axial, conforme a NBR 12118 (2013), resultou em uma resistência a compressão de 12,9 MPa em relação a sua área líquida, com coeficiente de variação de 3%. A resistência média encontrada, considerando sua área bruta, foi superior a resistência característica fornecida pelo fabricante, que é de 10 MPa.

5.1.1.2. Espécimes extraídos do Bloco

Os corpos de prova extraídos do bloco de concreto tiveram uma resistência média a compressão de 12,7 MPa, com coeficientes de variação de 13%. Os resultados mostraram a conformidade do ensaio de compressão das extrações com o ensaio do bloco inteiro da norma.

A resistência do corpo de prova extraído do bloco, apresentou resistência 2% inferior a resistência do bloco ensaiado, em relação a área líquida, conforme norma NBR 12118 (2013). Tal diferença não foi considerada como significativa estatisticamente pelo teste de Tukey, com grau de confiança de 95%. Isto é, podem-se considerar os ensaios equivalentes estatisticamente.

A resistência a tração axial no método com os extremos colados com epóxi e no com garras, foi de 0,7 MPa e 1,2 MPa, respectivamente. Nas duas metodologias de ensaio, devido a heterogeneidade do concreto e a pequena dimensão do corpo de prova, o desvio padrão foi elevado, sendo o coeficiente de variação 22% e 19%, respectivamente. Logo, não pode-se afirmar que existe diferença estatisticamente relevante de resultados entre os dois métodos.

5.1.2. Argamassas

5.1.2.1. Índice de consistência

A argamassa com traço forte apresentou um índice de consistência de 285 mm de acordo com o ensaio da flow table, e a argamassa com traço fraco, apresentou diâmetro de 290mm. Apesar da grande diferença do consumo de cimento e da relação água/cimento, este resultado representa ambos os traços com condição de trabalhabilidade semelhante.

5.1.2.2. Massa específica

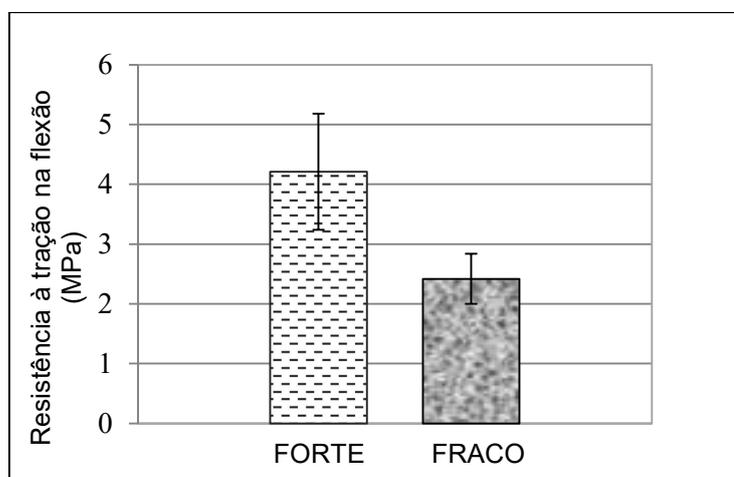
A argamassa de traço fraco resultou em uma massa específica de 1,8 kg/dm³, já na argamassa com traço forte encontrou-se um valor de 1,9 kg/dm³. O maior valor de massa específica para a argamassa com traço forte é justificado pelo maior consumo de cimento na mistura.

5.1.2.3. Tração na Flexão

A resistência média no ensaio de tração a flexão da argamassa fraca foi de 2,4 MPa, com um coeficiente de variação de 17%. A argamassa forte obteve resistência média a tração na flexão de 4,2 MPa, com um coeficiente de variação de 23%, conforme

FIGURA 31. O desvio padrão neste caso é alto quando comparado ao de compressão devido a maior variabilidade deste ensaio.

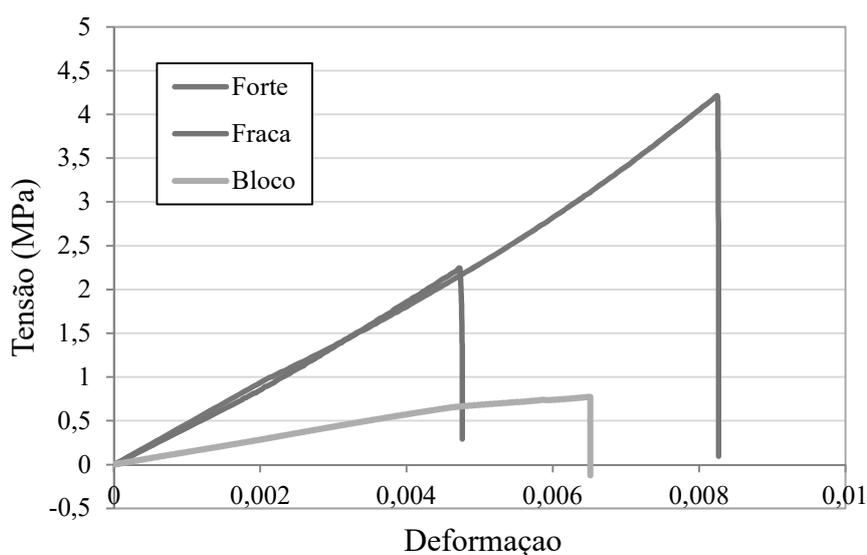
FIGURA 31. MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO FRESCO DAS ARGAMASSAS ESTUDADAS.



FONTE: O AUTOR (2017).

A FIGURA 32 representa o gráfico do ensaio de tração tensão x deformação dos materiais ensaiados, representando a queda brusca de tensão devido a ruptura à tração. O gráfico do ensaio a tração pela segunda metodologia do material extraído do bloco também está plotado na imagem, mostrando a menor resistência a tração do mesmo, quando comparado as argamassas. Isto se deve principalmente a existência de agregado graúdo, que causa uma descontinuidade no meio, facilitando a propagação da fissuração.

FIGURA 32. CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO À TRAÇÃO.



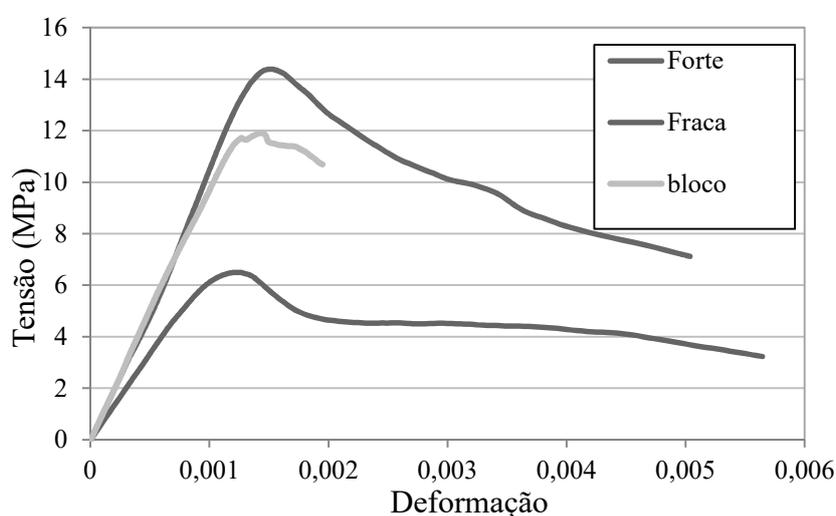
FONTE: O AUTOR (2017).

5.1.2.4. Ensaio de Compressão

As argamassas ensaiadas, com traço forte e fraco, obtiveram resistência a compressão de 14,1 MPa e 6,1 MPa, com um coeficiente de variação de 8% e 14%, respectivamente. O resultado confirmou uma argamassa com resistência superior a resistência do bloco de concreto e uma argamassa inferior.

Na FIGURA 33 são apresentadas as curvas tensão-deformação, nelas destaca-se o amolecimento, isto é a perda de rigidez antes e após a carga máxima, confirmando os modelos da bibliografia. O gráfico também apresenta o ensaio à compressão do material extraído do bloco para servir de referencia de resistência.

FIGURA 33. GRÁFICO COM CORPORTAMENTO REOLÓGICO À COMPRESSÃO.



FONTE: O AUTOR (2017).

A TABELA 6 a seguir mostra a síntese dos resultados dos ensaios mecânicos de resistência a compressão (F_c) e à tração (F_t).

TABELA 6. RESUMO DOS ENSAIOS MECÂNICOS.

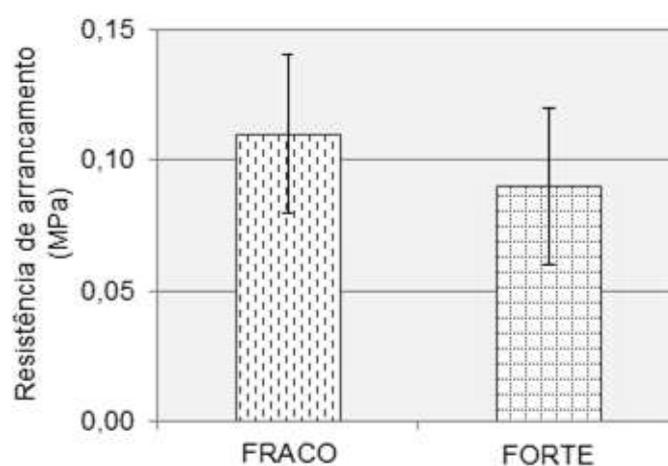
Material	F_c (MPa) – CV	F_t (MPa) – CV
Extração do Bloco	12,7 - 13%	0,7 -22%
Bloco (A. Liquida)	12,9 - 3%	-
Argamassa Forte	14,1 - 9%	4,2 - 23%
Argamassa Fraca	6,1 - 14%	2,4 - 17%

FONTE: O AUTOR (2017).

5.1.3. Interface

Quanto ao ensaio de arrancamento, *pull-off*, a ruptura ocorreu na interface argamassa-bloco, de forma que o valor encontrado pode caracterizar a máxima tensão de aderência entre os materiais, conforme FIGURA 34. Foram obtidos valores de 0,09 e 0,11 MPa, para as argamassas de maior e menor resistência, respectivamente. Analisando os resultados pelo método de Tukey, não foi possível afirmar que existe diferença de aderência, significativa estatisticamente, entre as argamassas.

FIGURA 34. RESULTADOS DE ARRANCAMENTO PARA AS ARGAMASSAS ESTUDADAS.

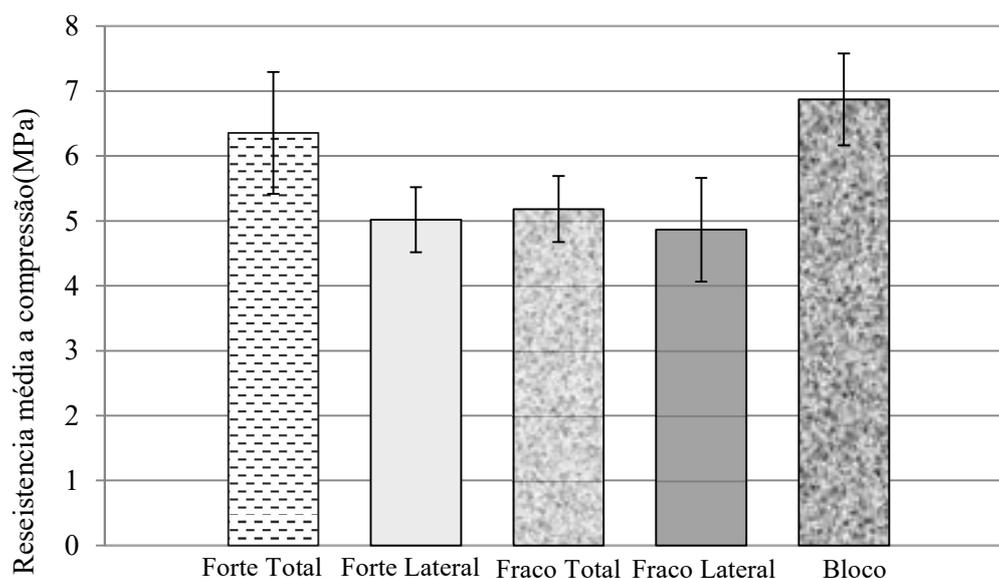


FONTE: O AUTOR (2017).

5.1.4. Prismas

O gráfico, apresentado na FIGURA 35, mostra as resistências médias à compressão obtidas nos ensaios dos prismas e do bloco em relação à área bruta.

FIGURA 35. PRISMAS E BLOCOS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.



FONTE: O AUTOR (2017).

Analisando o tipo de argamassa, foi possível observar que, nos casos de argamassamento total, a resistência dos prismas com a argamassa forte foi superior em 22%, quando comparada a argamassa fraca. Estes resultados apontam que o acréscimo de resistência da argamassa aumenta a carga de ruptura do prisma. Tal diferença também foi validada com o teste estatístico de Tukey.

Já no argamassamento lateral, a diferença entre a resistência dos prismas, utilizando as diferentes argamassas, ficou em torno de 3%, indicando que, neste caso, a ruptura se dá nas paredes do bloco, e não depende significativamente da resistência da argamassa.

A resistência do prisma, com argamassamento total, e com a argamassa mais fraca que o bloco, tipo recomendado pela norma, apresentou um fator de eficiência de 0,75, entre a resistência do prisma e a do bloco.

Os testes experimentais de prismas, com argamassa mais forte que o bloco, apresentaram carga de ruptura 21% menor no argamassamento lateral, quando este foi comprado ao total. Considerando os prismas com a argamassa fraca, essa diferença foi de 7%.

Os resultados obtidos indicam que, nos casos em que a ruptura inicial do prisma está na argamassa, o tipo de argamassamento não influencia tanto quanto naquele em que a ruptura está no bloco. Ainda, por meio do teste estatístico de Tukey, pode-se

afirmar que existe diferença significativa entre as médias das amostras. Assim os resultados indicam com os dois traços de argamassa, a perda de resistência de prismas com argamassamento lateral. Resultado de acordo com a norma brasileira de projeto que recomenda uma redução em 20% na resistência da alvenaria com argamassamento lateral.

5.2. Resultados do Programa Numérico

5.2.1. Simulações dos prismas

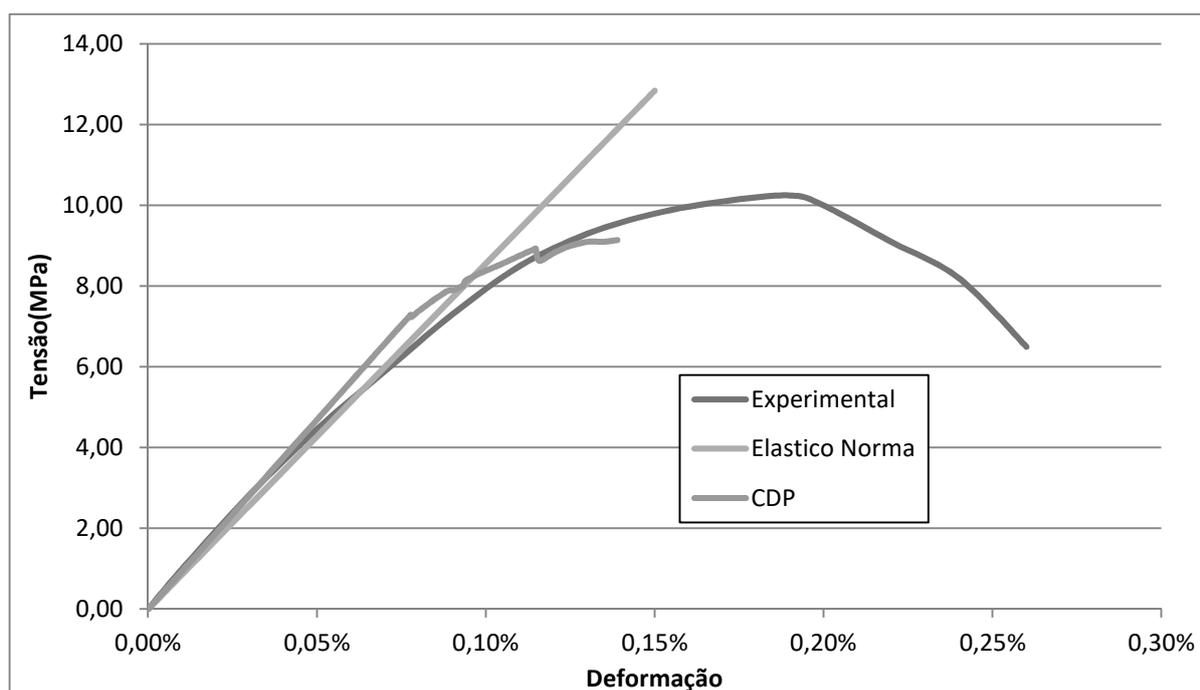
5.2.1.1. Não-linearidade física

As análises realizadas com diferentes modelos de não-linearidade encontraram resultados semelhantes de carga última, porém o comportamento pós pico apresenta uma pequena variação. Na FIGURA 36 é possível observar as curvas tensão-deformação dos diferentes modelos, em comparação com o ensaio experimental. Nesta modelagem foi fixado o argamassamento como total e utilizado a argamassa mais fraca, tal simplificação, representa o caso mais comum, recomendado pela norma de projeto. No gráfico também está plotado a curva elástica com módulo de elasticidade igual a 800 vezes a resistência do prisma, logo 8.560 MPa.

Observa-se que o modelo de plastificação do concreto (CDP) apresenta um comportamento semelhante ao resultado experimental, conseguindo representar a perda de rigidez ao longo do carregamento.

A curva do CDP apresentou uma curva de certa forma descompassada, isto é, apresentou quebras mais descontínuas. Isto ocorreu, pois a mesma, não representou o comportamento de um elemento, e sim da soma das forças resultantes de todos os elementos da face superior do prisma, a cada passo de deformação da prensa.

FIGURA 36. TENSÃO- DEFORMAÇÃO DAS SIMULAÇÕES DOS PRISMAS.



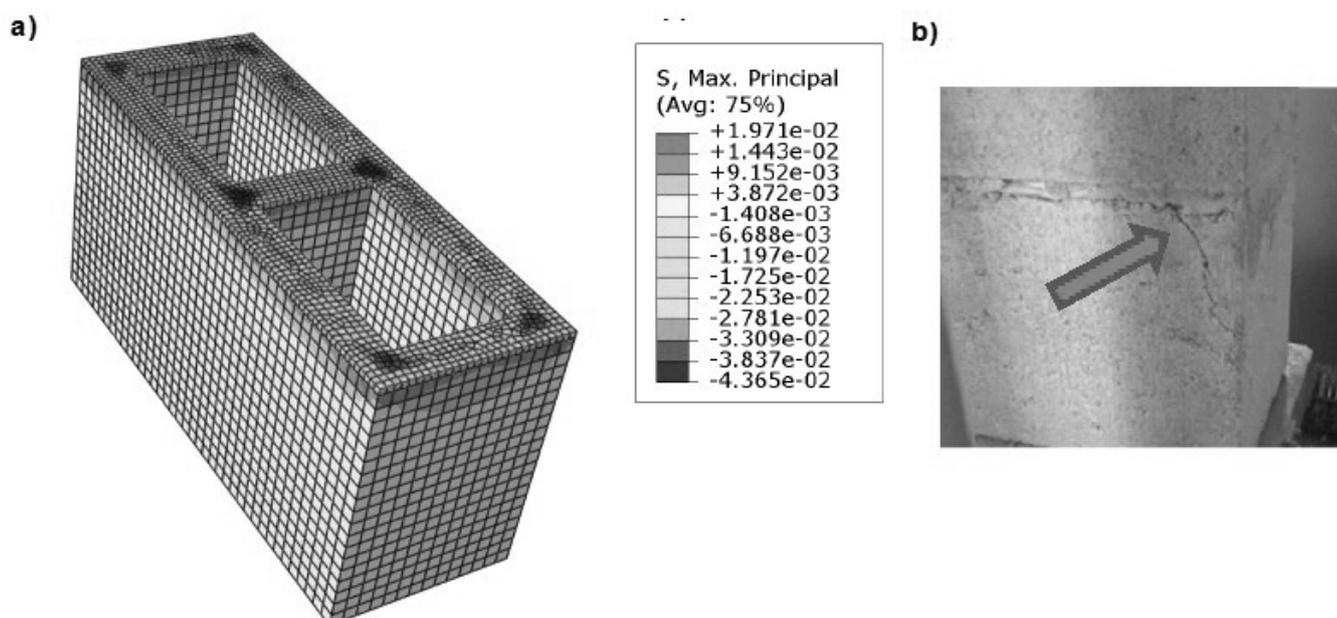
FONTE: O AUTOR (2017).

5.2.1.2. Não-linearidade de contato

Os modelos realizados, variando-se a condição na interface argamassa/bloco, permitiram confirmar que a condição de atrito entre os elementos é de grande importância no modo de ruptura dos prismas.

No modelo com a consideração de interface colada (cast) isto é, sem deslocamento relativo entre as superfícies, pela compressão do bloco sobre a junta, a argamassa tenderia a expandir, porém pela restrição do deslocamento, cria-se tensões de compressão (azul) elevadas no centro da argamassa, conforme apresentado na FIGURA 37A. Na mesma imagem é possível observar tensões de tração (vermelho) no bloco próximo a interface, onde, conforme ensaios experimentais se iniciava a fissuração, conforme FIGURA 37B.

FIGURA 37. TENSÕES PRINCIPAIS PRÓXIMAS A INTERFACE(A) NO MODELO COLADO, E ÍNICO FISSURAÇÃO ENSAIO EXPERIMENTAL(B).



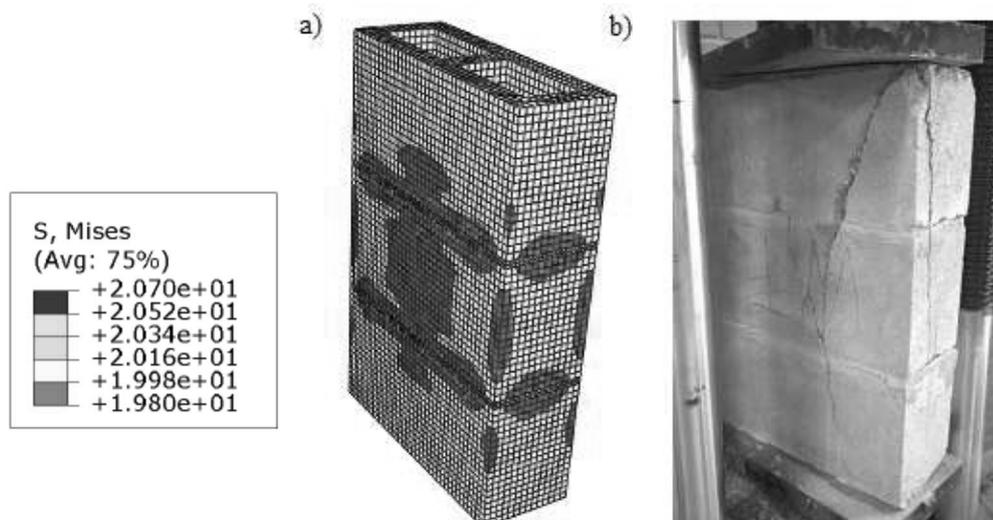
FONTE: O AUTOR (2017).

Os modelos sem atrito (*frictionless*) não convergiram e a argamassa teve uma parte expulsa na interface com o bloco, devido a expansão sem restrição alguma. Com isto, ocorreram tensões elevadas nestas argamassas que perderam o contato, o que resultou na não conformidade do modelo.

Para verificar a influência do atrito no resultado foram considerados diferentes coeficientes de atrito, variando de 0,001 a 0,7, valor recomendado por Grilo *et al* (2012). A diferença na tensão máxima de compressão foi de no máximo 5%, porém com o menor atrito chegou a valores próximos a zero de carga de tração no bloco, diferente do modelo colado, quando chegou a valores de tensão de tração próximos a 0,8 MPa, próximo a resistência a tração do bloco.

A Figura 38 apresenta as fissuras do ensaio experimental (a) nas posições de máxima tensão de tração encontradas no modelo com atrito (b).

FIGURA 38. TENSÕES PRINCIPAIS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO RUGOSO (a) E FISSURAÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL (b).



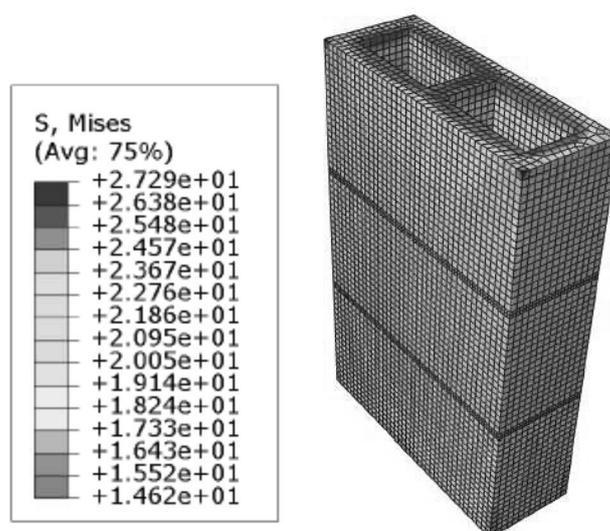
FONTE: O AUTOR (2017).

5.2.1.3. Rigidez e restrição dos pratos de ensaio

A restrição devido ao atrito do prato com a prensa altera significativamente os resultados em termos de tensão de tração. No modelo em que se restringe os três graus de liberdade de translação nas faces do prisma ou no modelo que faz a modelagem do prato e se insere uma propriedade para a interface, acarretam-se concentrações de tensões nos extremos do prisma. A FIGURA 39 apresenta essa situação, em que, devido a restrição da expansão do prisma, tensões transversais ocorrem próximo a interface e os cantos acabam estando sobre um estado de compressão triaxial.

Nesta análise estavam definidas as propriedades dos materiais com o CDP(Concrete Damaged Plasticity), a prensa com material elástico, e a interface bloco-argamassa com o modelo de atrito com coeficiente 0,73.

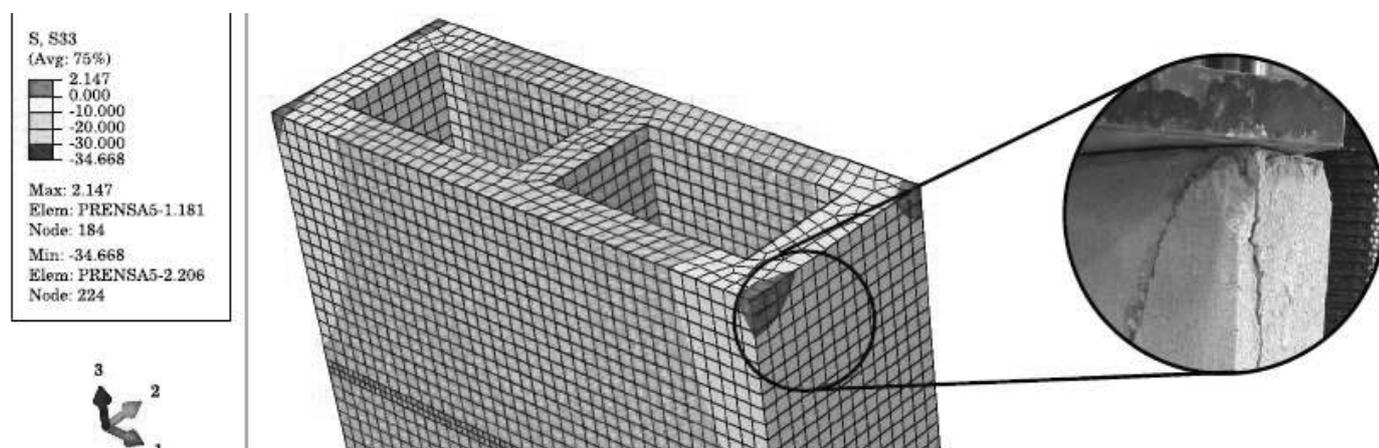
FIGURA 39. TENSÕES DEVIDO A RESTRIÇÃO DA PRENSA.



FONTE: O AUTOR (2017).

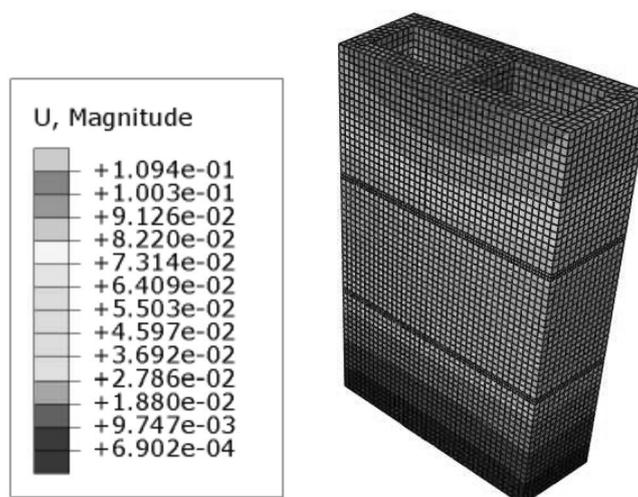
A FIGURA 40 apresenta a comparação das fissuras do ensaio experimental com a concentração de tensões encontradas no modelo numérico.

FIGURA 40. FISSURAÇÃO DEVIDO A CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES.



Outro efeito observado, através da modelagem dos pratos do ensaio e a aplicação do carregamento conforme ensaio experimental na região central do prato, é que, apesar de alta rigidez e pequena deformação, o prato não é capaz de distribuir de maneira completamente uniforme o carregamento. Na FIGURA 41 a seguir é possível observar o deslocamento diferencial devido a concentração do carregamento na região central.

FIGURA 41. DESLOCAMENTO VERTICAL (U3) DA SIMULAÇÃO COM PRATO DE ENSAIO.



FONTE: O AUTOR (2017).

5.2.1.4. Resistência da Argamassa

Os modelos numéricos com implementação de critérios de ruptura mostraram o início da fissuração de acordo com o tipo de argamassa utilizada. Com a argamassa mais fraca a tensão solicitante superou a resistente, primeiramente no interior da argamassa, devido a restrição do deslocamento comentada no item anterior. O modelo com argamassa forte começou sua fissuração no bloco próximo a região da interface, porém devido a tensões de tração.

A ruptura dos prismas com argamassa forte ocorreu com níveis de tensões maiores de carregamento em relação ao prisma de argamassa fraca. Portanto, conforme a literatura e os ensaios experimentais realizados, a resistência da argamassa é importante na carga ultima do ensaio de prisma. A TABELA 7 indica os valores de resistência dos modelos em comparação com os ensaios experimentais.

TABELA 7. CARGA ÚLTIMA DOS PRISMAS COM ARGAMASSAMENTO TOTAL.

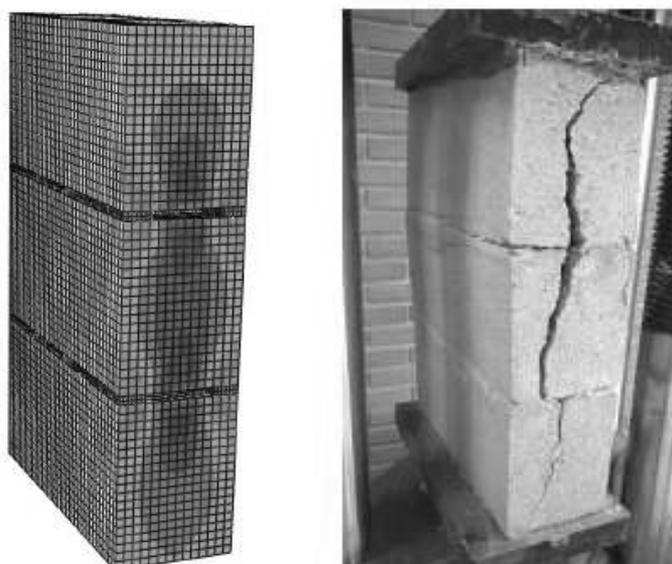
	Experimental	Numérico
Prisma com Argamassa Forte	6,35	6,60
Prisma com Argamassa Fraca	5,18	6,10
Diferença	-18%	-9%

FONTE: O AUTOR (2017).

5.2.1.5. Modo de argamassamento

Nos prismas com argamassamento lateral a tensão vertical S33 ao longo dos septos (webs) formam um arco de tensões em direção as faces argamassadas. O fenômeno causa a propagação de tensões de tração horizontal na região próxima a interface, devido a componente horizontal das tensões inclinadas, que chegam na interface e tendem a tracionar a base do arco semelhante ao comportamento de vigas paredes. Nesta posição, conforme modelo numérico e ensaios experimentais realizados é onde se iniciam os processos de fissuração e levam o bloco a ruptura, conforme Figura 42.

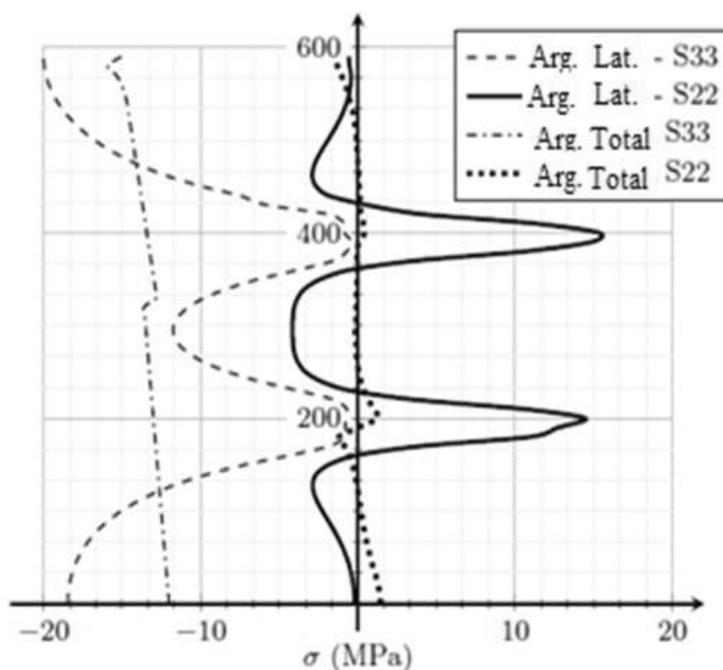
FIGURA 42. TENSÕES PRINCIPAIS DE TRAÇÃO NO MODELO COM ARGAMASSAMENTO LATERAL(A) E CORRESPONTE ENSAIO EXPERIMENTAL(B)



FONTE: O AUTOR (2017).

A FIGURA 43 indica o comportamento das tensões máximas principais (tração) nas webs do prisma com argamassamento lateral. É notório o aparecimento de tensões de tração elevadas na região final do bloco antes da interface.

FIGURA 43. GRÁFICOS DAS TENSÕES PRINCIPAIS SOLONGO DO SEPTO VERTICAL NA DIREÇÃO VERTICAL



FONTE: O AUTOR (2017)

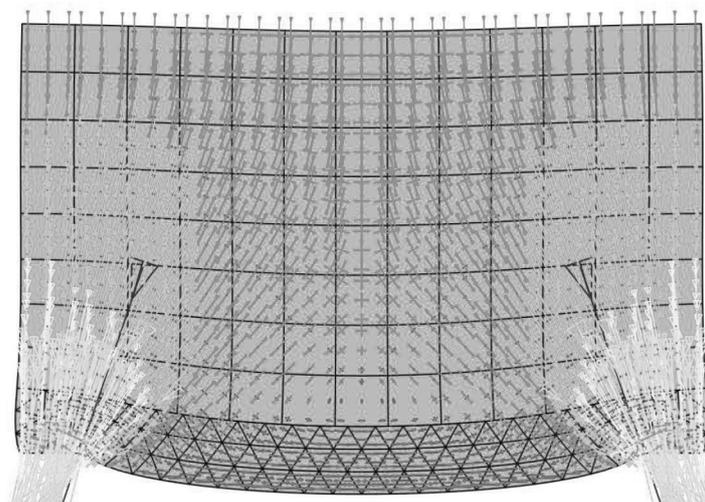
5.2.2. Conjuntos viga-parede

O subcapítulo a seguir apresentará as diferentes simulações realizadas em conjuntos viga-parede para verificar a ocorrência do efeito arco e as principais variáveis envolvidas na modelagem que podem alterar os resultados e a distribuição de carregamento na viga suporte.

Na FIGURA 44 a seguir é possível observar a distribuição de tensões do sistema. É verificado um comportamento semelhante ao de uma viga-parede, e ainda, é visualizado notoriamente o arco de tensões gerado na alvenaria. Na imagem observa-se que a partir de uma altura as tensões na alvenaria continuam uniformes, assim sendo, confirma-se a não necessidade da modelagem de toda a parede, e sim de apenas uma parcela proporcional ao vão da viga.

Com as direções das tensões principais geradas pode-se observar as tensões horizontais de tração geradas na viga, devido a tendência do arco abrir. Dessa forma, as vigas deveriam ser dimensionadas a flexo-tração.

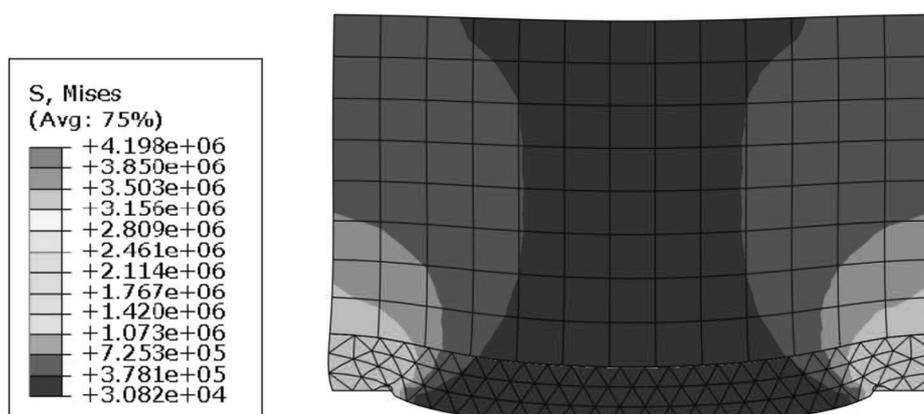
FIGURA 44. DIREÇÃO DAS TENSÕES PRINCIPAIS (VIGA 1).



FONTE: O AUTOR (2017).

A FIGURA 45 mostra a distribuição das tensões principais de Von Mises, nela são observadas as regiões com concentração de tensões. Houve acréscimos de tensões nas alvenarias, chegando até três vezes o valor de quando comparada a uma distribuição uniforme.

FIGURA 45. TENSÕES PRINCIPAIS DE VON MISSES (VIGA 1).



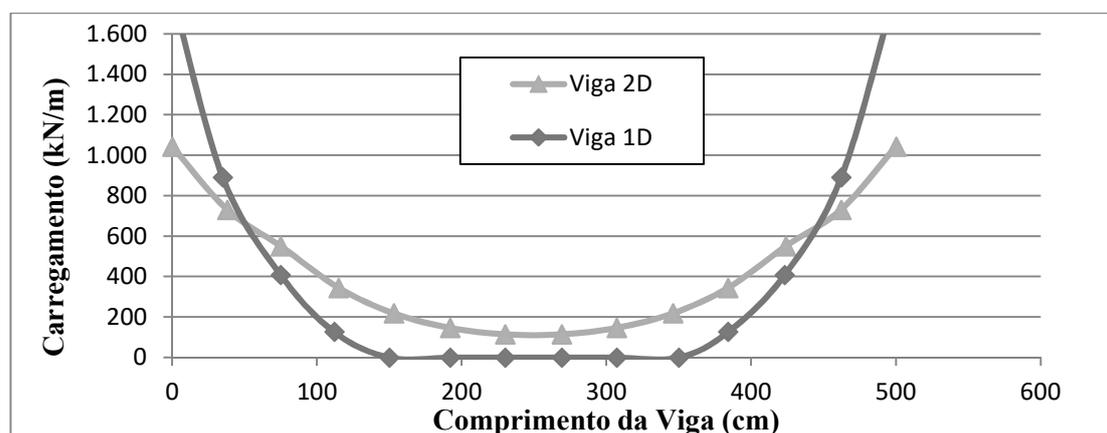
FONTE: O AUTOR (2017).

5.2.2.1. Tipo de modelagem viga suporte

Na modelagem em que se variou o tipo de elemento de viga encontraram-se diferentes configurações de carregamento, visto que, a biela formada pelo efeito de viga-parede se formou somente na parede. Assim sendo, no modelo com a viga unidimensional mobilizou-se uma região menor da parede e encontrou tensões de tração no meio do vão na interface parede-viga, conforme FIGURA 46 neste caso representando um possível descolamento da parede, por isto representado como carregamento nulo.

Logo, a simulação que utiliza a viga como elemento de barra verificou ineficiente na determinação da distribuição do carregamento, visto que o problema tem influencia da altura da seção da viga na formação e posicionamento do arco.

FIGURA 46. COMPARAÇÃO DO CARREGAMENTO ALTERANDO-SE O TIPO DE MODELAGEM.



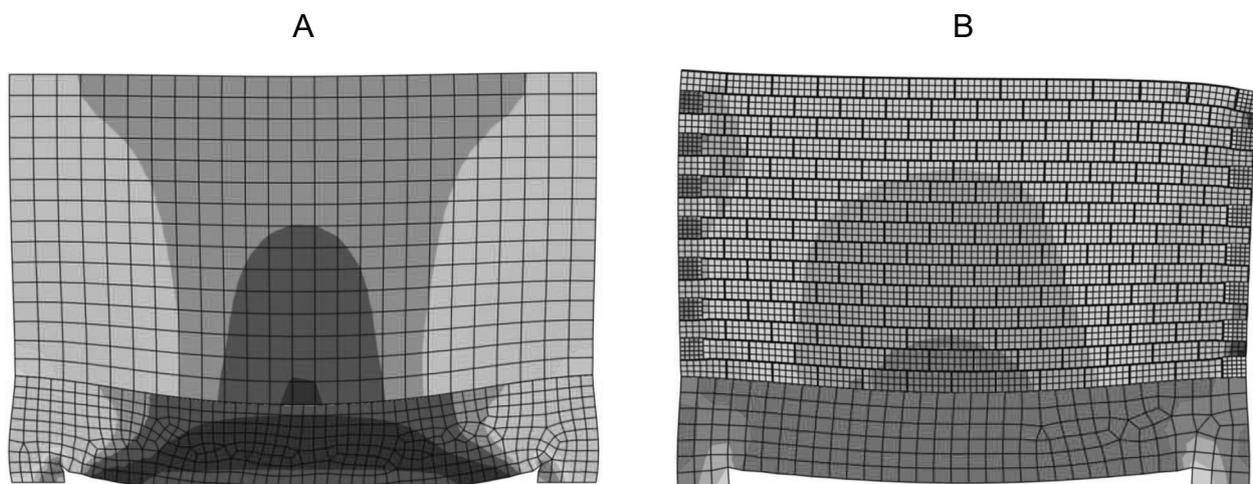
FONTE: O AUTOR (2017).

5.2.2.2. Tipo de Modelagem da alvenaria

Foram avaliadas diferentes técnicas de modelagem da alvenaria nos sistemas viga-parede, de forma a encontrar a variação na distribuição do carregamento na viga suporte. A FIGURA 47 a seguir apresenta a distribuição das tensões principais no conjunto, com a macromodelagem (A) e com a micromodelagem bidimensional (B).

Na FIGURA 47B também é possível observar uma assimetria, devido a modulação da alvenaria, isto é, como o comprimento da viga não é múltiplo de 40cm (comprimento do bloco), logo teve-se que utilizar meio bloco no final da primeira fiada e no início da segunda.

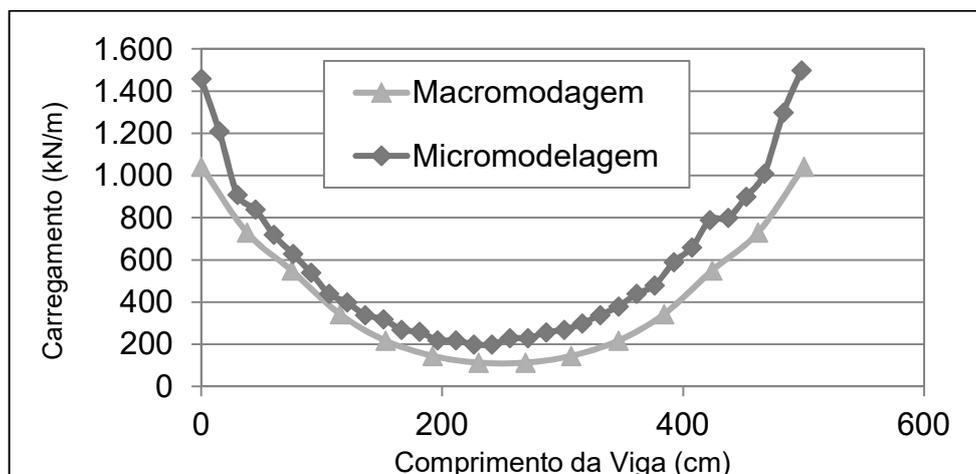
FIGURA 47. DISTRIBUIÇÕES DAS TENSÕES PRINCIPAIS, NOS MODELOS BIDIMENSIONAIS. (A)MACROMODELAGEM E (B)MICROMODELAGEM.



FONTE: O AUTOR (2017)

A FIGURA 48 apresenta os gráficos com a distribuição do carregamento vertical na interface, avaliando os diferentes tipos de modelagens da alvenaria.

FIGURA 48. GRÁFICO COM A DISTRIBUIÇÃO DO CARREGAMENTO VERTICAL NA VIGA SUPORTE, VARIANDO A MODELAGEM DA ALVENARIA.



FONTE: O AUTOR (2017)

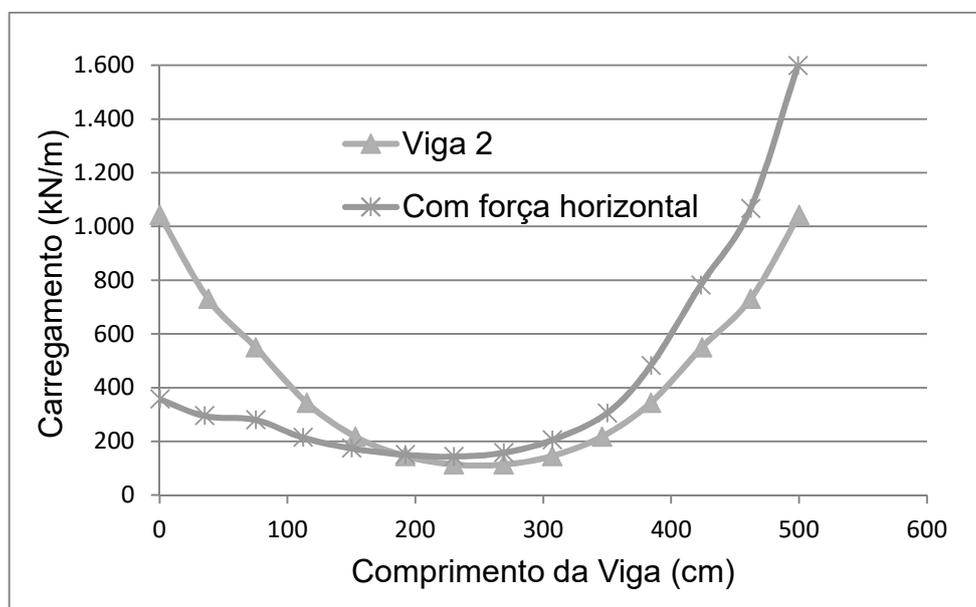
Pode-se observar uma maior concentração do carregamento próximo aos apoios nos modelos realizados, porém, os modelos com a micromodelagem apresentam carregamentos mais elevados na região do apoio. Esta acentuação na concentração do carregamento pode ter sido ocasionada pela maior rigidez da alvenaria, devido a discretização das juntas, isto é, quando a rigidez da alvenaria é mais próxima da rigidez da viga, o carregamento tende a ser mais uniforme.

Pode-se observar também que a micromodelagem apresenta carregamentos assimétricos, isto se deve, conforme dito anteriormente a assimetria na modulação dos blocos.

5.2.2.3. Inserção de cargas horizontais

A carga horizontal alterou significativamente a distribuição do carregamento, devido ao momento gerado. O lado oposto ao carregamento fica mais comprimido e no lado aplicado tem-se um alívio no carregamento, conforme visto na FIGURA 49. A dimensão da viga para esta análise fixou-se como 15x80 conforme denominado no capítulo da metodologia como Viga 2.

FIGURA 49. COMPARAÇÃO DO CARREGAMENTO LEVANDO EM CONTA A CARGA HORIZONTAL.



FONTE: O AUTOR (2017)

Logo, conforme já verificado por PAES (2008) e pelo gráfico apresentado quando há a consideração de cargas horizontais existe uma alteração com alta sensibilidade na distribuição do carregamento. Inclusive segundo a pesquisadora, em casos de vigas contínuas até o sinal do momento fletor pode ser alterado, devido a ação destas cargas.

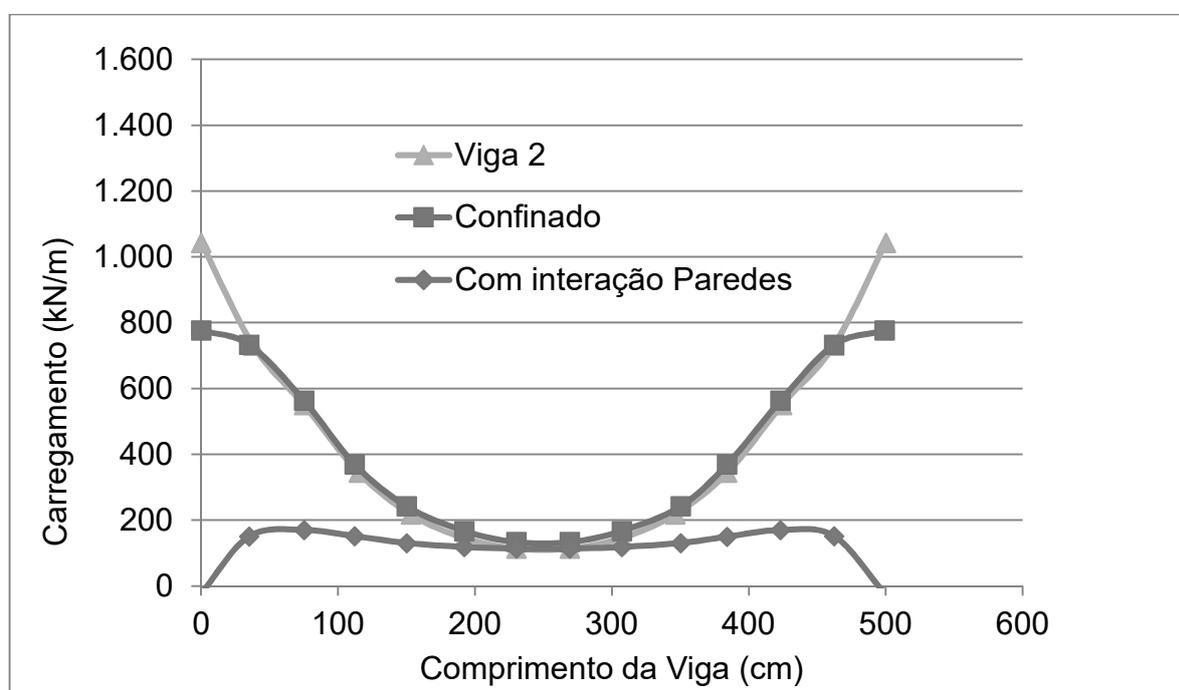
5.2.2.4. Interação Paredes adjacentes

Para avaliar a influência dos enrijecedores laterais, devido à existência de paredes adjacentes no efeito arco, foi realizado o modelo restringindo os deslocamentos nas faces

laterais. Na FIGURA 50 é possível observar a variação no carregamento considerando estas restrições. A dimensão da viga para esta análise fixou-se como 15x80 conforme denominado no capítulo da metodologia como Viga 2.

O gráfico da FIGURA 50 mostra a pouca influência do confinamento na distribuição do carregamento e mostra a grande redução no carregamento total quando considerado restrições laterais nas duas direções, porém de fato, para isto ocorrer, a parede adjacente deve ser rígida suficiente e estar sobre uma base indeformável. Este último modelo também desconsidera o acréscimo de carregamento proveniente das paredes adjacentes. Logo o modelo com restrições nas faces não é recomendado para análise do efeito arco.

FIGURA 50. COMPARAÇÃO DO CARREGAMENTO LEVADO EM CONTA A INTERAÇÃO.



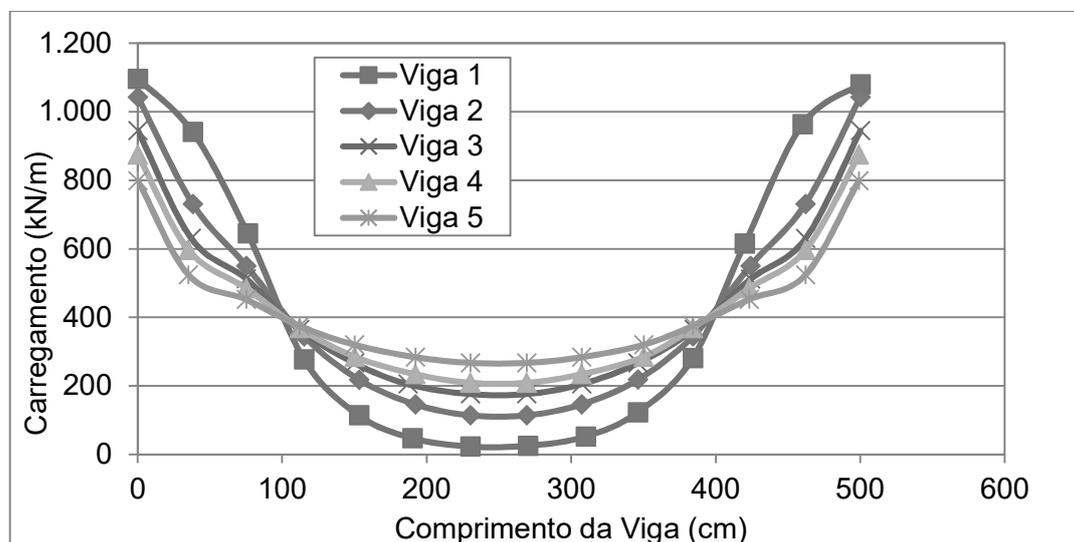
FONTE: O AUTOR (2017)

5.2.2.5. Variação da viga suporte

Na FIGURA 51 é apresentada a distribuição do carregamento vertical ao longo das vigas. O gráfico foi obtido através da tensão vertical ao longo do contato. Pode-se observar claramente que, com o acréscimo da rigidez da viga suporte, a distribuição tende a ser aproximar do valor de 400 kN/m, carregamento aplicado uniformemente no topo da alvenaria. No gráfico também é possível verificar carregamentos próximos à zero no meio do vão das vigas mais flexíveis. Isto confirma que a consideração do descolamento na interface no meio do vão não alteraria muito o diagrama, pois mesmo nas mais flexíveis o

carregamento ainda não chegou a zero. As distribuições encontradas tem formato semelhante ao de PAES(2008) e BARBOSA (2000).

FIGURA 51. GRÁFICO COMPARATIVO DA DISTRIBUIÇÃO DO CARREGAMENTO.



FONTE: O AUTOR (2017).

Aplicando estes gráficos de carregamento na viga, através do método dos Elementos Finitos, encontraram-se os valores de momento máximo apresentados na TABELA 8. A tabela também apresenta a porcentagem de redução do momento quando comparado ao carregamento uniforme de 400 kN/m, que resulta em um momento máximo de 1250 kN.m. Pode-se notar que em todos os casos, devido ao carregamento concentrado próximo ao apoio, ocorrerem reduções no momento fletor máximo.

TABELA 8. MOMENTOS OTIMIZADOS COM A CONSIDERAÇÃO DO EFEITO ARCO.

	Momento Máximo	Redução
Referência	1250 kNm	-
Viga 1	631 kNm	49%
Viga 2	787 kNm	37%
Viga 3	901 kNm	28%
Viga 4	965 kNm	23%
Viga 5	1043 kNm	17%

FONTE: O AUTOR (2017).

Em todos os casos, houveram concentrações de tensões na alvenaria, isto é, o carregamento migrou para a região próximo aos apoios, o acréscimo de tensões na alvenaria pode ser observado na TABELA 9. A referencia indicada, representa a tensão aplicada no topo da alvenaria, que se estivesse sobre uma base rígida, iria se manter uniforme na alvenaria.

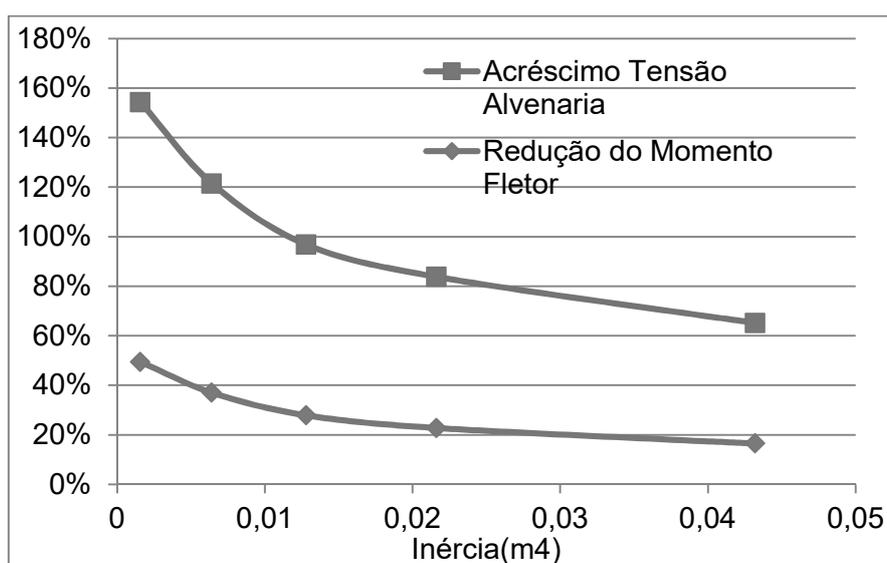
TABELA 9. TENSÕES MÁXIMAS NA ALVENARIA.

	Tensão	Acréscimo
Referência	2,86 MPa	-
Viga 1	7,27 MPa	154%
Viga 2	6,34 MPa	122%
Viga 3	5,63 MPa	97%
Viga 4	5,26 MPa	84%
Viga 5	4,72 MPa	65%

FONTE: O AUTOR (2017).

Na FIGURA 52, foi plotado em um gráfico os resultados apresentados na TABELA 8 e 9 no eixo y e a inercia da viga no eixo x, de forma que podemos observar que a variação do carregamento, é proporcional a rigidez da viga.

FIGURA 52. GRÁFICO COMPARATIVO RIGIDEZ.



FONTE: O AUTOR (2017).

6. CONCLUSÕES

6.1. Modelagem dos Primas

Os modelos não-lineares representam um comportamento mais aproximado dos materiais constituintes da alvenaria. Assim, suas curvas de tensão-deformação aproximam-se mais do teste experimental do que a análise elástica.

Os modelos numéricos, considerando a fricção na interface, apresentam boa representação do modelo de fissuras observado nos testes experimentais. Devido à diferença de rigidez e fricção entre os materiais, são geradas altas tensões de tração próximas à interface, onde começa a fissuração de acordo com o programa experimental.

A restrição da prensa altera a distribuição de tensões em prismas de concreto, especialmente perto das extremidades, e foi confirmada, mesmo com a espessura recomendada pela norma brasileira, para a placa, que a distribuição do carregamento no prisma não é uniforme.

A resistência da argamassa pode influenciar o tipo de falha e a resistência máxima à carga do ensaio de prisma, evidentemente em prismas com argamassamento total.

A ruptura de prismas de argamassamento lateral ocorre por altas tensões de tração na alma, o aparecimento de fissuras e ruptura ocorre nesta região. Devido à discretização das almas, a análise tridimensional é essencial para prever a falha inicial de prismas com argamassamento lateral.

Portanto, conclui-se que modelos numéricos que contemplem a não-linearidade física dos materiais e não-linearidade geométrica das interfaces podem ser ótimas ferramentas para avaliar o comportamento de prismas de alvenaria.

Para pesquisas futuras é sugerido para um modelo mais preciso, que se realizem ensaios para se obter o coeficiente de Poisson dos materiais. Além disso todos estes aspectos devem ser discutidos para os prismas grauteados e para outras relações de altura-espessura.

6.2. Modelagem do conjunto viga-parede.

Pela bibliografia e pelos modelos realizados é possível verificar o real acontecimento do efeito arco em sistemas vigas-parede, ocasionado pela diferença de rigidez entre os elementos. Neste efeito o carregamento da parede sobre a viga tende a se concentrar

próximos aos apoios, solução esta, diferente do empregado nos principais métodos de dimensionamento.

Este alívio no carregamento das vigas acarreta em uma possível redução na seção da viga ou da taxa de aço utilizada, ambas podem gerar grande vantagem econômica. Foi verificada também a importância das demais variáveis envolvidas no sistema, como por exemplo, a interação entre as paredes vizinhas e a presença de cargas horizontais, bem como características geométricas do sistema, presença de aberturas e continuidade da viga suporte.

Confirmou-se a influência da rigidez da viga suporte na distribuição do carregamento e o expressivo acréscimo de tensões na alvenaria próximo aos apoios. Cabe ainda ressaltar que a parede é usualmente dimensionada para resistir aos esforços de compressão, considerando uma distribuição uniforme de tensões, sendo assim é nítida a importância desta verificação à compressão quando considerado a atuação do efeito arco.

Para pesquisas futuras, sugere-se que analisem a interação entre paredes adjacentes através da modelagem numérica de todo um pavimento de transição, incluindo no modelo a ação das cargas horizontais.

REFERÊNCIAS

ABAQUS MANUAL. User's Manual ABAQUS/CAE 6.14. By Simulia.

AHMED, E. Y; SHRIVE, N. V. Nonlinear finite-element model of hollow masonry. **Journal of Structural Engineering**. 122(6) 683-690. 1996.

ALMEIDA J. C; LOURENÇO, P. B; BARROS, J. A; Characterization of brick and brick-mortar interface under uniaxial tension. **VII International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries**. Belo Horizonte, 2002.

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

ALI, S; PAGE, A. W. Finite Element Model for Masonry subjected to concentrated Loads. **Journal of Structural Engineering**. Vol. 114:1761-1784. 1988.

ALI, S; MOORE, D; PAGE, A. W. Substructuring technique in nonlinear analysis of brick masonry subject to concentrated load. **Computers & Structures**. Vol. 27. No. 3.pp. 417-425. 1987

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1314**. Standard test method for compressive strength of masonry prisms. ASTM Internacional, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1999.

_____. **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos – Requisitos . Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7175:** Cal hidratada para argamassas – Requisitos . Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 12118:** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13278:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13528:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15812:1** Alvenaria estrutural – blocos cerâmicos – Parte 2: Projetos. Rio de Janeiro, 2010.

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

_____. **NBR 15961:2:** Alvenaria estrutural – blocos de concreto – Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

BARBOSA, P. **Estudo da interação de paredes de alvenaria estrutural com vigas de concreto armado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

BARBOSA, C. S; HANAI, J. B. Strength and deformability of hollow concrete blocks: correlation of block and cylindrical sample test results. **Ibracon Structures and Materials Journal**. Volume 2, Number 1, p. 85-99. 2009

BARBOSA, C. S; LOURENÇO, P. B; HANAI, J. B. On the compressive strength prediction for concrete masonry prisms. **Materials and Structures**. V43. Pp 331–344. 2010

BECICA, I. J., and HARRIS, H. G. Behavior of hollow concrete masonry prisms under axial loads and bending. **The Masonry Society Journal**. V.2, N.2 pp. T1-T26. 1983.

CARVALHO, J. D. N. **A Contribuição de Enrijecedores Laterais para o Efeito Arco na Alvenaria Estrutural.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

CAPRARO, A. P. B. **Mudanças nas Propriedades Microestruturais e Mecânicas de Pastas e Argamassas dosadas com Diferentes Teores de Contaminação por Sulfetos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION- **CSA S304.1.** Design of Masonry Structures. Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario, Canada, 2004.

CHOW, C. L; WANG, J. An anisotropic theory of elasticity for continuum damage mechanics. **International Journal of Fracture**. N. 33:3-16. 1987

CHEN, W. F. **Plasticity in reinforced concrete.** McGraw-Hill, New York, 1982.

DOMEDE, N; PONS, G; SELLIER, A; FRITIH, Y. Mechanical Behaviour of ancient masonry. **Materials and Structures**. N. 42:123:133. 2009.

EUROCODE 6. **ENV 1996-1-1**. Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures, Brussels, 2005.

FRASSON JUNIOR, A. F. **Metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para a alvenaria estrutural**. 146p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

GANZERLI, S; ROSSLOW, J; YOUNG, T, KREBS, K; MUJUMDAR, V; Compression Strength Testing for Nonstandard Concrete Masonry Units.

North American Masonry Conference 9, Clemson, USA. pp. 60-70. 2003

GOMES, I. R; **Simulação Numérica do ensaio de compressão de prismas de alvenaria pelo método dos elementos finitos com comportamento de Interface**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

GRILO, I; MARQUES, H; GOUVEIA, J. P; JULIO, E. Resistência ao corte de paredes de alvenaria com blocos de betão e com blocos cerâmicos. **Encontro Nacional de Betão Estrutural**. 2012.

HAACH, V. G; RAMALHO, M. A; CORRÊA, M. R. S. Parametrical study of unreinforced flanged masonry walls subjected to horizontal loading through numerical modeling. **Engineering Structures**. 56 pp 207-217. 2013.

HAMID, A. A; CHUKWUNENYE, A. O. Compression Behavior of Concrete Masonry Prisms. **Journal of Structural Engineering**. Vol 112 n. 3 pp 605-613. 1986.

HASELTINE, B.A.; MOORE, J.F.A. **Handbook to BS-5628: structural use of masonry. Part 1: Unreinforced masonry**. The Brick Development Association, 1981.

HILLEBORG, A; MODÉER M; PETERSSON P. E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete mechanics and finite elements. **Cement Concrete Research**; Vol. 6:773-82,1976.

HOLANDA JUNIOR, O; RAMALHO, M. Influência de recalques em edifícios em alvenaria estrutural. **Caderno de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, V10 n° 44, p.95-128. 2008.

HOLANDA JUNIOR, O. **Influencia de Recalques em edifícios de Alvenaria Estrutural**. 2002. 242f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

JANKOWIAK, T; LODYGOWKI, T. Identification of parameters of concrete Damaged Plasticity Constitutive Model. **Foundations of Civil and Environmental Engineering**, 2005.

KATO, C. S. **Método para estimar custos diretos da execução de Edifícios: Aplicação à Alvenaria Estrutural**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

KOTSOVOS, M. D. Finite-Element Modelling of Structural Concrete-Short-Term Static and Dynamic Loading Conditions. New York, 2015.

KOKSAL, H, O; KARAKOÇ, C; YILDIRIM, H. Compression Behavior and Failure Mechanisms of Concrete Masonry Prisms. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 17(1) pp 107-115. 2005.

LOURENÇO, P. B; ROTS, J. G; BLAAUWENDRAAD, J. Continuum Model for Masonry: Parameter Estimation and Validation. **Journal of Structural Engineering**. Vol 112 n. 3 pp 605-613. 1986.

MANGUEIRA, F.B.; OLIVEIRA NETO, L.; AZAMBUJA, M.A. Determination of the Numerical Parameters of a Continuous Damage Model for the Structural Analysis of Clay Brick Masonry. **Materials Research**. Vol. 15(6): 1013-1021. 2012

MARZAHN, G. A. Extended investigation of mechanical properties of masonry units. **North American Masonry Conference 9**, Clemson, USA. pp. 813-824. 2003.

MATA, R. C. Influência do padrão de argamassamento na resistência à compressão de prismas e mini-parede de alvenaria Estrutural de Blocos de Concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

MOHAMAD, G; LOURENÇO, P. B; ROMAN, H. Mechanics of hollow concrete block Masonry Prisms under compression: Review and prospects. **Cement & Concrete Composites**. N. 29 pp. 181-192. 2007.

NASCIMENTO NETO, J.A. **Estudos de Painéis de Alvenaria constituídos por alvenaria estrutural de blocos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

PAES, M. **Interação entre edifício de alvenaria estrutural e pavimento em concreto armado considerando-se o efeito arco com a atuação de cargas verticais e ações horizontais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

PAGE, A. W; SHRIVE, N. G. A critical assessment of compression tests for hollow block masonry. **Masonry International journal**.N. 2, v2, p. 64-70. 1988.

PAGE, A.W. and KLEEMAN, P.W., The Influence of Capping Material and Platen Restraint on the Failure of Hollow Masonry Units and Prisms Loaded in Compression. **Proc 9th international brick/block masonry conference**, Berlin, October, 1991.

PAGE, A. W; SIMUNDIC, G. e HAN XIE. A study of the relationship between unit, prism and wall strength for hollow masonry loaded in compression. **Proc 9th international brick/block masonry conference**, Berlin. Proceeding. v1, p. 236-243. 1991.

PAPIA, M. An alternative analysis model for composite wall-beam systems. **Computers & Structures** Vol. 32. No. 1. pp. 149-155. 1988.

PEDREIRO, M. R. **Análise do comportamento experimental e numérico de prismas de alvenaria estrutural submetidos a ações verticais utilizando elementos finitos volumétricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

PEGON, P; ANTHOINE A. Numerical strategies for solving continuum damage problems with softening: application to the homogenization of masonry. **Computers and Structures**. Vol 64: 623-642. 1997

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

PIETRUSZCZAK, S; USHAKSARAEI, R. Description of inelastic behaviour of structural masonry. **International Journal of Solids and Structures**. Vol. 40. 4003-4019. 2003.

PIETRUSZCZAK, S; SHIEH-BEYGI, S. Numerical analysis of structural masonry: mesoscale approach. **Computers and Structures**. Vol. 8 pp 1958–1973. 2008.

RIDDINGTON, J. R; NAOM, N. F. Finite element prediction of masonry compressive strength. **Computers & Structures** Vol. 52 pp113-119, 1994.

RIDDINGTON, J.R; STAFFORD SMITH, B. Composite method of design for heavily loaded wall-beam structures. In: **Institutional of Civil Engineers Proceedings**. Part 1, v.64, p.137-151. 1978.

STANDARDS AUSTRALIA. **AS3700**. Australian Standards for Masonry Structures, Sydney, 2011.

ZUCCHINI, A.; LOURENÇO, P. B. A micro-mechanical model for the homogenisation of masonry. **International Journal of Solids and Structures**. Vol39 , pp 3233-3255. 2002.