

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Guilherme Dall Cortivo dos Santos**

**ANÁLISE DO EFEITO DA INTERAÇÃO VIGA-PAREDE EM  
EDIFÍCIOS DE ALVENARIA ESTRUTURAL COM PAVIMENTOS  
DE TRANSIÇÃO**

Porto Alegre  
dezembro de 2019

**GUILHERME DALL CORTIVO DOS SANTOS**

**ANÁLISE DO EFEITO DA INTERAÇÃO VIGA-PAREDE EM  
EDIFÍCIOS DE ALVENARIA ESTRUTURAL COM PAVIMENTOS  
DE TRANSIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de  
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia  
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Jean Marie Désir**

Porto Alegre  
dezembro de 2019

**GUILHERME DALL CORTIVO DOS SANTOS**

**ANÁLISE DO EFEITO DA INTERAÇÃO VIGA-PAREDE EM  
EDIFÍCIOS DE ALVENARIA ESTRUTURAL COM  
PAVIMENTOS DE TRANSIÇÃO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pela Professora Orientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2019

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Jean Marie Désir (UFRGS)**

Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Prof. Roberto Domingos Rios (UFRGS)**

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Eng. Manoel Inácio Xavier Filho (UFRGS)**

Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço imensamente ao professor Jean Marie Désir pelos ensinamentos que me transmitiu quando fui seu aluno e também durante a orientação, sempre disponível, paciente e bem humorado, facilitando minha compreensão e tornando esse trabalho possível.

Aos meu irmãos, Douglas e Débora, por serem exemplos para mim de pessoas, pais e profissionais. Obrigado por todo o tipo de ajuda que me deram.

Ao meu pai, Luiz Rheinheimer dos Santos, que desde pequeno insistiu que uma educação de qualidade seria o diferencial para uma vida melhor. Por todo o esforço que fez para dar oportunidades melhores aos filhos.

À minha mãe, Alzira Dall Cortivo dos Santos, pela companhia constante desde o vestibular, por todas as vezes que veio à Porto Alegre me ajudar, pelas orações e por todo o amor que me deu.

Por fim, agradeço ao meus amigos, que fizeram esses 6 anos e meio de faculdade terem sido uma experiência maravilhosa e que vai deixar muita saudade.

## RESUMO

Este artigo visa compreender por meio de modelagem numérica, os parâmetros influentes no efeito arco, fenômeno que surge na interação de paredes de alvenaria estrutural sobre vigas de concreto armado em apoios discretos. Entre as consequências do efeito arco está a migração das cargas atuantes para a região dos apoios, causando picos de tensões na parede e diminuindo o momento fletor atuante sobre a viga de sustentação. É apresentado um apanhado da literatura sobre o assunto, seguida pelas particularidades da modelagem em elementos finitos e as propriedades dos materiais adotados. O aumento da rigidez devido a presença da parede causou flechas na viga de ordem até 8 vezes menores que o esperado pela equação da linha elástica. Na parede, mesmo nas situações mais favoráveis, como vigas apoiadas em pilares, percebe-se um aumento das tensões atuantes em até 2,2x. Isso aponta que ao não considerar o efeito arco que pode-se estar superdimensionando a viga de suporte e expondo a parede à tensões maiores que as calculadas.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Redistribuição das tensões em situação de descolamento no centro do vão. ....	4
Figura 2 - Elementos compatíveis para as modelagens de vigas e paredes.....	7
Figura 3 - Nove primeiras situações básicas de mudanças de parâmetros .....	11
Figura 4 - Captura de tela do software durante o processo de modelagem .....	12
Figura 5 - Escala de cores para a distribuição de tensões verticais na parede.....	13
Figura 6 - Distribuição de tensões nas paredes do grupo 1 - vão = 3m - considerando as vigas: .....	14
Figura 7 - Flechas do sistema viga-parede para as vigas do grupo 1 – Vão = 3m .....	14
Figura 8 - Descolamento entre viga e parede para o grupo 1 .....	15
Figura 9 - Momento equivalente a cada flecha observada no grupo 1 .....	16
Figura 10 - Distribuição de tensões nas paredes do grupo 2 – vão = 4,6m - considerando as vigas (a) V19x45, (b) V19x65, (c) V19x85 .....	17
Figura 11 - Flechas do sistema viga-parede para as vigas do grupo 2 – Vão = 4.6m .....	18
Figura 12 - Fissuração na interface viga-parede para o grupo 2 .....	18
Figura 13 - Momento equivalente a cada flecha observada no grupo 2 .....	19
Figura 14 - Distribuição de tensões nas paredes do grupo 2 – vão = 6m - considerando as vigas (a) V19x45, (b) V19x65 e (c) V19x85 .....	20
Figura 15 - Flechas do sistema viga-parede para as vigas do grupo 3 – Vão = 6m .....	21
Figura 16 - Fissuração na interface viga-parede para o grupo 3 .....	21
Figura 17 - Momento equivalente a cada flecha observada no grupo 3 .....	22
Figura 18 - Comprimento de compressão e média das tensões atuante na região dos apoios para cada seção do grupo 3 .....	22
Figura 19 - Distribuição de tensões para o a situação 3 (Vão de 3m e V19x85) para valores de interface: (a) normais; (b) minorados em 50% e (c) majorados em 50%.....	23
Figura 20 - Distribuição de tensões para o a situação 7 (Vão de 6m e V19x45) para valores de interface: (a) normais; (b) minorados em 50% e (c) majorados em 50%.....	23
Figura 21 - Distribuição de tensões na V19x45 com vão de 3m e blocos: (a) de 20MPa e (b) de 7MPa.....	24
Figura 22 - Distribuição de tensões na V19x65 com vão de 3m e blocos: (a) de 20MPa e (b) de 7MPa.....	25
Figura 23 - Distribuição de tensões na V19x85 com vão de 3m e blocos: (a) de 20MPa e (b) de 7MPa.....	25

Figura 24 - Momento elástico equivalente observado com a alteração da resistência do bloco .....	25
Figura 25 - Vão de 3 metros - Vigas apoiadas na face inferior. (a) V19x45; (b) V19x65 e (c) V19x85 .....	27
Figura 26 - Vão de 4,6 metros - Vigas apoiadas na face inferior. (a) V19x45; (b) V19x65 e (c) V19x85 .....	27
Figura 27 - Vão de 6 metros - Vigas apoiadas na face inferior. (a) V19x45; (b) V19x65 e (c) V19x85 .....	27

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de bloco de concreto de alvenaria estrutural em função da resistência $f_{pk}$ ...	8
Tabela 2 - Valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson adotados para o concreto armado e para a alvenaria estrutural .....	8
Tabela 3 - Cargas consideradas para os pavimentos tipo (a), pavimento cobertura (b) e peso próprio das paredes (c) .....	10
Tabela 4 - Deslocamento teórico para as seções de vigas escolhidas .....	11
Tabela 5 - Valores de rigidez relativa para as vigas do grupo 1 – Vão = 3m.....	14
Tabela 6 - Comprimento de compressão e média das tensões atuante na região dos apoios para cada seção do grupo 1 .....	16
Tabela 7 - Valores de rigidez relativa para as vigas do grupo 2 - vão = 4,6m .....	17
Tabela 8 - Comprimento de compressão e média das tensões atuante na região dos apoios para cada seção do grupo 2 .....	19
Tabela 9 - Valores de rigidez relativa para as vigas do grupo 3 - vão = 6m .....	20
Tabela 10 - Influência da mudança dos coeficientes de contato para as situações menos e mais rígidas .....	24
Tabela 11 - Comparação de valores de rigidez relativa variando a resistência dos blocos nas três paredes do grupo 1.....	24
Tabela 12 - Comparação de comprimento de compressão e média das tensões atuantes próximo dos apoios devido à variação da resistência característica dos blocos nas três paredes do grupo 1 .....	26
Tabela 13 - Flechas, dimensão das fissuras, comprimento de compressão e tensão média nos apoios para situações de vigas apoiadas em comprimento de 40cm.....	28
Tabela 14 - Resistências necessárias de prisma ( $f_{pk}$ ) e de bloco ( $f_{bk}$ ) para as vigas apoiadas em nós e em faces de lado 40cm.....	29

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BSI – British Standards Institute

HIS – Habitações de Interesse Social

## LISTA DE SÍMBOLOS

$E_{ci}$  = Módulo de elasticidade

$E_{cs}$  = Módulo de deformação secante do concreto

$E_p$  = Módulo de elasticidade longitudinal da parede (KN/m<sup>2</sup>)

$E_v$  = Módulo de elasticidade longitudinal da viga (KN/m<sup>2</sup>)

$f_{pk}$  = Resistência característica de compressão simples do prisma (MPa)

$f_{bk}$  = Resistência característica de compressão simples do bloco (MPa)

$f_{ck}$  = Resistência característica à compressão do concreto (MPa)

$H$  = Altura da parede (m)

$I_v$  = Inércia da via [m<sup>4</sup>]

$K$  = Valor de rigidez relativa segundo as equações de Riddington e Stafford Smith

$L$  = Distância entre os apoios (m)

$R$  = Valor de rigidez relativa segundo as equações de Davies e Ahmed

$T_p$  = Espessura da parede (m)

$q$  = Carga linear [KN/m]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>O EFEITO ARCO .....</b>	<b>3</b>
2.1	HISTÓRIA E DEFINIÇÃO.....	3
2.2	CONCEITO DE RIGIDEZ RELATIVA DO SISTEMA PAREDE-VIGA .....	4
<b>3</b>	<b>ESTRATÉGIA DE MODELAGEM.....</b>	<b>5</b>
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O PROGRAMA UTILIZADO: ELEMENTOS, MATERIAIS E PARÂMETROS DE ANÁLISE.....	5
3.2	MODELOS ADOTADOS .....	9
3.3	TESTE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA.....	12
<b>4</b>	<b>RESULTADOS DOS MODELOS BÁSICOS.....</b>	<b>12</b>
4.1	GRUPO 1 - VÃO DE 3 METROS .....	13
4.2	GRUPO 2 - VÃO DE 4,6 METROS .....	17
4.3	GRUPO 3 - VÃO DE 6 METROS .....	19
<b>5</b>	<b>OUTRAS MUDANÇAS DE PARÂMETROS .....</b>	<b>22</b>
5.1	VARIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO CONTATO VIGA-PAREDE .....	23
5.2	MUDANÇA NA RESISTÊNCIA DO BLOCO .....	24
5.3	MUDANÇA NAS FORMAS DE APOIO.....	26
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>29</b>
<b>7</b>	<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>31</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>32</b>

# Análise do efeito da interação viga-parede em edifícios de alvenaria estrutural com pavimentos de transição

## **Resumo**

Este artigo visa compreender por meio de modelagem numérica, os parâmetros influentes no efeito arco, fenômeno que surge na interação de paredes de alvenaria estrutural sobre vigas de concreto armado em apoios discretos. Entre as consequências do efeito arco está a migração das cargas atuantes para a região dos apoios, causando picos de tensões na parede e diminuindo o momento fletor atuante sobre a viga de sustentação. É apresentado um apanhado da literatura sobre o assunto, seguida pelas particularidades da modelagem em elementos finitos e as propriedades dos materiais adotados. O aumento da rigidez devido a presença da parede causou flechas na viga de ordem até 8 vezes menores que o esperado pela equação da linha elástica. Na parede, mesmo nas situações mais favoráveis, como vigas apoiadas em pilares, percebe-se um aumento das tensões atuantes em até 2,2x. Isso aponta que ao não considerar o efeito arco que pode-se estar superdimensionando a viga de suporte e expondo a parede à tensões maiores que as calculadas.

**Keywords:** *Alvenaria estrutural. Análise numérica. Efeito Arco. Interação viga-parede. Segurança estrutural.*

## **1 Introdução**

A alvenaria estrutural é uma solução interessante para a construção de edifícios por ser uma alternativa que apresenta uma série de vantagens em relação a estrutura de concreto armado convencional: menor custo, melhor logística de execução, melhor organização do canteiro entre outras. Segundo Geraldo (2017), a economia pode ser da ordem de 20% quando se considera também o ganho de cronograma. No Brasil, a construção em alvenaria estrutural já é uma técnica bastante difundida. Ainda em 2013, o parque industrial do país produzia 100 milhões de blocos mensalmente (PORTAL BRASIL ENGENHARIA, 2013), e durante o ano de 2015, só o programa Minha Casa Minha Vida utilizou 450 milhões de blocos para as novas moradias (REVISTA GRANDES CONSTRUÇÕES, 2016).

---

Apesar de ser mais comumente associada a empreendimentos de Habitações de Interesse Social (HIS), fatores como melhoria na qualidade dos blocos (SANTIAGO e BECK, 2018) e atualização das normas de projeto tais como as NBR 15812 e NBR 15961 (ABNT, 2010) criaram condições para a alvenaria estrutural ser utilizada em edificações mais altas e de padrão superior. Entretanto, indicadores de conforto associados a empreendimentos de alto padrão, como pavimento térreo amplo, áreas de lazer e vagas de garagem, são itens que não são compatíveis com a essência da alvenaria estrutural, já que uma desvantagem reconhecida desta é não conseguir vencer grandes vãos como uma estrutura de concreto armado convencional é capaz. Recorre-se então, a utilização de pavimentos de pilotis - estruturas de concreto armado convencional como transição desses primeiros pavimentos aos pavimentos tipo de apartamentos.

Nas edificações com “pavimentos de transição” a parede do primeiro pavimento tipo transfere as cargas recebidas para uma viga. O concreto armado e a alvenaria estrutural são materiais diferentes, e, portanto, se comportam de formas diferentes. A deformação da viga resulta em uma mudança na distribuição das tensões na alvenaria, fenômeno denominado de **efeito arco**. Além de pavimentos pilotis, o efeito arco pode acontecer em qualquer situação de alvenaria estrutural apoiada em vigas, como por exemplo vigas de fundações apoiadas sobre estacas.

Este trabalho tem como objetivo apresentar algumas considerações sobre o efeito arco, focando na investigação dos parâmetros que mais o influenciam, assim como nas recomendações das normas atuais. Para isso, pretende-se, através de uma análise paramétrica de algumas situações típicas presentes nos edifícios altos de Alvenaria Estrutural, investigar a sua ocorrência assim como a influência do dimensionamento das vigas no fenômeno. Dentre os parâmetros analisados estão: o vão da viga, sua inércia, a resistência da parede, o contato parede viga, e o tipo de apoio.

No desenvolvimento do trabalho, apresenta-se primeiro um apanhado da literatura sobre o efeito arco. Na sequência discute-se a melhor estratégia de modelagem, parâmetros de materiais e coeficiente de contatos. Após isso, considerações de norma sobre deformações limites de vigas, para assim escolher-se as seções interessantes e prosseguir para a análise dos resultados das modelagens.

## 2 O Efeito Arco

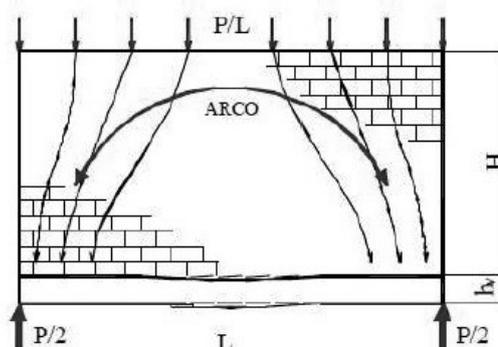
### 2.1 *História e definição*

O efeito arco foi estudado pela primeira vez por Wood (1952) quando a Alvenaria Estrutural teve um novo impulso em países da Europa. Antes disso, a solução adotada para grandes edificações como o Monadnock Building em Chicago, com 17 pavimentos e paredes no térreo com espessura de 1,80m, se tornou inviável pela perda de espaço e também pelo uso excessivo dos materiais. A alvenaria estrutural entrou em declínio sendo substituída pelo concreto armado e pelo aço estrutural, que permitiam estruturas altas muito mais esbeltas, relegando à alvenaria estrutural apenas estruturas de pequeno porte.

A Suíça foi o país pioneiro na retomada e renovação do uso da Alvenaria Estrutural em edifícios altos. Isso aconteceu depois de uma série de investimentos federais em pesquisa devido a inexistência de indústria de aço no país e a escassez generalizada de materiais após a segunda guerra mundial (HENDRY, 2002). Concomitante a isso, o Reino Unido devido a um programa público de construção de edifícios residenciais criou o primeiro código prático para construção em alvenaria estrutural (BRITISH STANDARDS INSTITUTE - BSI, 1948), melhorado ao passar dos anos para se tornar a norma BS 5628 (BSI, 2005) usada até hoje.

O efeito arco é o fenômeno de redistribuição das tensões devido a interação da alvenaria estrutural e a viga de concreto armado utilizada como elemento de transição entre as paredes e os pilotis. Quando uma parede se apoia em suporte rígido a carga tende a se distribuir de maneira uniforme. Porém, se o suporte é suscetível de deformação, o padrão de distribuição muda. É o caso de pavimentos sobre pilotis onde a deformação da viga gera tensões normais de tração na interface entre os materiais. Essas tensões são absorvidas pela argamassa de assentamento dos blocos, e quando superam o valor limite do material, provocam o descolamento entre a parede e a viga na região central do vão. Essa perda de contato entre os dois faz a carga do centro migrar para a região dos apoios, provocando dois efeitos simultâneos importantes: ocorrem na alvenaria picos de tensões nas regiões próximas aos apoios, e na viga, pela ausência de parcela de carga no centro, há uma redução do momento fletor. O esquema da figura 1 ilustra a situação:

**Figura 1 - Redistribuição das tensões em situação de descolamento no centro do vão.**



Fonte: (BARBOSA, 2000)

A redução do valor no momento máximo na viga pode variar do esperado  $P l^2 / 8$  para  $P l^2 / 20$  ou até  $P l^2 / 274$ , ou seja, uma redução de 2,5 até 34 vezes. (WOOD, 1952)

Após Wood teve-se muitos estudos sobre o método (ROSENHAUPT, 1962), (BURHOUSE, 1969) e (NAVARATNARAJAHM, 1981). Stafford Smith, Khan e Wickens (1977), entre outras contribuições, perceberam que a configuração do efeito arco é visível somente até uma altura equivalente a 70% do vão. A região da parede acima deste limite contribui apenas como acréscimo de carga, sem alterar a forma de distribuição quando comparado ao caso de um apoio rígido.

## 2.2 Conceito de rigidez relativa do sistema parede-viga

Stafford Smith e Riddington (1977) e também Davies e Ahmed, (1977) perceberam que vários parâmetros influenciam a maneira como as tensões se distribuem no sistema viga-parede, destacando entre eles: inércia e vão da viga, altura da parede, espessura da parede e módulo de elasticidade dos materiais. Eles correlacionaram todos esses fatores no conceito de rigidez relativa.

As equações (1) e (2) permitem calcular o valor da rigidez relativa de acordo com os estudos de Riddington & Stafford Smith e Davies & Ahmed, respectivamente.

$$K = \sqrt[4]{\frac{E_p t_p L^3}{E_v I_v}} \quad (\text{Equação 1})$$

$$R = \sqrt[4]{\frac{E_p t_p H^3}{E_v I_v}} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

- $E_p$  e  $E_v$  são os módulos de elasticidade longitudinais da parede e da viga respectivamente;
- $I_v$  é a inércia da viga de apoio;
- $H$  e  $t_p$  são a altura e a espessura da parede respectivamente;
- $L$  é a distância entre apoios.

Apesar de não fornecerem valores iguais, as equações de Stafford Smith & Riddington (1977) e de Davies & Ahmed (1977) fazem a mesma avaliação:

Valores de rigidez relativa baixos vêm de vigas rígidas em relação as paredes. Neste caso o efeito arco é pouco expressivo. Essas vigas rígidas provocam descolamentos pequenos no centro da parede, causando pequenas mudanças na distribuição de tensões, e tendo os valores de momento parecidos com os determinados com o cálculo teórico que desconsidera o efeito arco.

Valores de rigidez relativa altos vêm de vigas mais flexíveis. Essas vigas apresentam descolamentos maiores entre a viga e a parede, causando mudanças mais significativas na distribuição de tensões. A parede perde contato com a viga em um trecho grande na região central do vão e a transmissão de carga ocorre nas regiões próximas aos apoios, resultando em momentos bastante reduzidos em relação ao calculados teoricamente.

### **3 Estratégia de modelagem**

#### ***3.1 Considerações gerais sobre o programa utilizado: elementos, materiais e parâmetros de análise***

O Mecway é um software de elementos finitos com uma interface intuitiva e foco na resolução de alguns tipos de problemas térmicos e mecânicos, entre eles a análise de distribuição de tensões em uma estrutura devido a carregamentos diversos. O programa possui uma interface amigável que permite um aprendizado rápido para usuários não familiarizados com modelagens numéricas, mostrando-se desta forma uma ferramenta apropriada e compatível com o objetivo do trabalho.

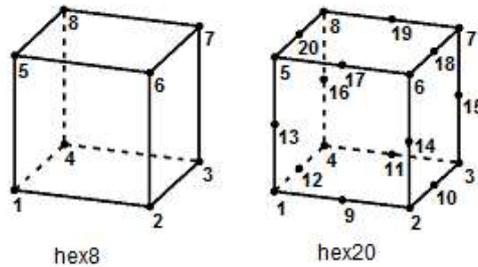
A primeira etapa de modelagem teve como objetivo verificar a qualidade dos resultados do programa para um problema conhecido. Com isso, pode-se ponderar o refinamento de malhas, testar as diferentes formas de modelagem (bi e tridimensional) e avaliar a influência de mudanças de parâmetros como: tipos e tamanho dos elementos, restrições de apoios, propriedades dos materiais, características do contato parede-viga. As observações decorrentes de tal análise nortearam na sequência a definição dos modelos utilizados para representar as diversas situações a serem estudadas.

A análise do efeito de arco pode ser conduzida como um problema de estado plano de tensões quando se desconsidera a excentricidade da reação das cargas em relação ao eixo da parede. Assim, tanto a parede quanto a viga podem ser consideradas como chapas. Barbosa (2000) considera adequado, para o estudo de tensões do comportamento global, que a alvenaria pode ser analisada como um material homogêneo, ou seja, sem discretizar separadamente blocos e argamassa, o que simplifica bastante o processo de modelagem. Na verdade, isso significa que é possível aplicar a alvenaria alguma técnica de homogeneização para definir suas características elásticas como apontam os trabalhos de Buhari e Felice (1997), Kuczma e Wybranowska (2005) e Lourenço e Zucchini (2006).

Em relação a discretização por elementos finitos, alguns pesquisadores como Ramalho (1990) aconselham modelar a alvenaria com elementos quadriláteros, elementos presentes em qualquer programa de análise, inclusive no Mecway.

Contudo, no caso da análise do efeito arco, é necessário analisar o contato entre parede e viga, e para este assunto o Mecway se comporta mais satisfatoriamente quando a interface é tratada como uma superfície de contato e não uma linha. Desta forma, considerou-se mais apropriada a modelagem do conjunto parede-viga como um sólido - e não chapas - e utilizar os elementos hex8 e hex20, disponíveis no Mecway e apropriados para modelagem deste tipo de problema. Estes elementos possuem 8 e 20 nós respectivamente como mostra a figura 2:

Figura 2 - Elementos compatíveis para as modelagens de vigas e paredes



Os nós intermediários presentes no hex20 permitem o uso de função de interpolações quadráticas, aumentando sua precisão em relação ao hex8. Isso resulta em menor necessidade de refinamento de malha para um mesmo grau de precisão. Dependendo do modelo em análise, isso afeta bastante o tempo de processamento.

A análise do problema foi não-linear, já que o efeito arco está associado necessariamente a uma deformação irreversível, ocorrendo a separação e o deslizamento na interface entre a parede e a viga.

Os elementos utilizados na modelagem representam os materiais estruturais e devem incorporar as características dos mesmos. Assim, é necessário definir a lei constitutiva dos materiais envolvidos. Para o problema de efeito de arco tem-se a alvenaria da parede, o concreto da viga e o contato da interface. As vigas serão de concreto armado com resistência característica ( $f_{ck}$ ) de 35 MPa enquanto a alvenaria será considerada de blocos estruturais de concreto com resistência característica ( $f_{bk}$ ) de 20MPa.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) no item 8.2.8 permite, para quando não forem realizados ensaios, estimar o módulo de elasticidade inicial de concretos em função da resistência  $f_{ck}$  para valores entre 20 e 50 MPa, usando as equações a seguir:

$$E_{ci} = \alpha_E * 5600 * \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$E_{ci}$  é o módulo de elasticidade inicial em MPa

$f_{ck}$  é a resistência característica do concreto a compressão em MPa

$\alpha_E$  é 1,0 para granitos e gnaisses

Já o módulo de deformação secante é estimado pela equação:

$$E_{cs} = \alpha_i E_{ci} \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 * \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (\text{Equação 5})$$

Como mencionado anteriormente é comum utilizar no ambiente acadêmico a técnica de homogeneização para definir as propriedades elásticas da alvenaria em função das características dos blocos e da argamassa (DÉSIR, 2012). Contudo, neste trabalho as propriedades da alvenaria estrutural são definidas a partir das recomendações da tabela 1, item 6.2.1 da NBR 15812 (ABNT, 2010) que é reproduzida a seguir:

**Tabela 1 - Propriedades de bloco de concreto de alvenaria estrutural em função da resistência f<sub>pk</sub>**

Propriedades da alvenaria	Valor	Valor máximo
Módulo de deformação longitudinal	800 f <sub>pk</sub>	16 GPa
Coefficiente de Poisson	0,2	-

A tabela 2 apresenta os valores dos módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson considerados para os dois materiais segundo o apresentado:

**Tabela 2 - Valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson adotados para o concreto armado e para a alvenaria estrutural**

	Módulo de Elasticidade	Coefficiente de Poisson
Concreto Armado f <sub>ck</sub> =35MPa	28,16 GPa	0,2
Alvenaria Estrutural 20MPa	16 GPa	0,2

Além do material, é necessário definir o comportamento da interface parede-viga. Como é uma representação fictícia, depende da estratégia de cada programa. O Mecway descreve o comportamento do contato como um conjunto de molas independentes que limitam o movimento de separação e de deslizamento entre as partes por valores de rigidez de mola normal e tangencial e um coeficiente de atrito. É muito difícil a definição destes valores pois envolvem

muitos parâmetros complexos como adesão, rugosidade e engrenamento, fundamentais na análise da aderência entre duas superfícies. Ghassan e Armin (2008) estimaram, por meio de ensaios, valores da ordem de 203,58 GPa/m para rigidez normal e 257,87GPa/m para rigidez tangencial. Adotou-se um coeficiente de atrito igual a 0,6 de acordo com a norma inglesa BS 5628 (BSI, 2005).

Para a classificação da separação na zona de contato, adotou-se a classificação da NBR 15575-2 - Edificações Habitacionais – Desempenho (ABNT, 2013):

- Aberturas até 0,6mm – Fissuras
- Aberturas maiores que 0,6mm - Trincas

### **3.2 Modelos adotados**

As equações (1) e (2) tratam da rigidez relativa como fator fundamental no aparecimento do efeito de arco e evidenciam o peso de variáveis como a inércia da viga, o comprimento do vão e a altura da parede. Esta análise paramétrica verificará a influência da variação do comprimento do vão e inércia da viga. Serão analisados três vãos diferentes: 3, 4,6 e 6 metros. Esses valores foram escolhidos por considerá-los representativos para os tamanhos de vãos usuais de edifícios.

O efeito arco se manifesta como uma perda de compatibilidade de deformação entre parede e viga de apoio. É razoável assumir que dependerá do dimensionamento individual dos dois elementos. Uma forma de pré-dimensionar as vigas consiste em limitar sua flecha de acordo com as recomendações da NBR 6118-2014. A equação 6 relaciona a equação da linha elástica para vigas biapoiadas com a recomendação da tabela 13.3 da NBR 6118-2014 para deslocamentos visíveis em elementos estruturais:

$$\frac{5ql^4}{384 EI} \leq \frac{l}{250} \quad \text{(Equação 6)}$$

$l$  é o comprimento do vão,  $E$  o módulo de elasticidade do concreto,  $I$  a inércia da viga e  $q$  é a carga aplicada para todas as situações. É importante ressaltar que por não serem usados nesse trabalho os valores de inércia equivalente, os deslocamentos aqui analisados são referentes aos deslocamentos imediatos. A análise dos deslocamentos de longo prazo são é importantíssima em uma situação real e não está sendo considerada nesse trabalho.

Considera-se a situação de uma edificação residencial de 12 pavimentos, onde após encontrando o grupo de paredes mais solicitado, foi calculada as cargas considerando os seguintes valores:

**Tabela 3 - Cargas consideradas para os pavimentos tipo (a), pavimento cobertura (b) e peso próprio das paredes (c)**

(a)

<b>Cargas de Pavimento Tipo</b>		
Permanentes (q)		
Piso	0,8	kN/m <sup>2</sup>
Peso Próprio da Laje	2,5	kN/m <sup>2</sup>
Revestimento	0,4	kN/m <sup>2</sup>
Acidental (q)		
Residencial	1,5	kN/m <sup>2</sup>

(b)

<b>Cargas Pavimento Cobertura</b>		
Permanente (q)		
Peso próprio da laje	2,5	kN/m <sup>2</sup>
Revestimento	0,4	kN/m <sup>2</sup>
Telhado	0,5	kN/m <sup>2</sup>
Forro	0,5	kN/m <sup>2</sup>
Acidental (q)		
Carga acidental para coberturas inacessíveis à pessoas	0,5	kN/m <sup>2</sup>

(c)

<b>Peso próprio das paredes</b>		
Carga do bloco	2,14	kN/m <sup>2</sup>
Revestimento	0,76	kN/m <sup>2</sup>
Carga das juntas	0,07	kN/m <sup>2</sup>
Pé direito	2,8	m
PP Alvenaria	8,32	kN/m

O valor final de carga utilizado foi de 350,89 kN/m, equivalente a uma tensão atuante de 1,85 MPa em uma seção de largura 0,19 m. Com esse valor de carga, buscou-se dimensões de de seção transversal que atenderiam as implicações da equação 6. As seções transversais escolhidas são mostrados na tabela 4 a seguir:

**Tabela 4 - Deslocamento teórico para as seções de vigas escolhidas**

Vão	Seção	Deslocamento teórico [cm]	Deslocamento permitido [cm]
3 m	0,19x0,45	0,91	1,20
4,6 m	0,19x0,65	1,67	1,84
6 m	0,19x0,85	2,16	2,40

Para avaliar a pertinência e consistência deste processo de pré-dimensionamento, idealizou-se a seguinte proposta de análise: Como o acréscimo de altura da seção para cada vão se deu de maneira regular, decidiu-se replicar cada seção para as três situações de vão. Assim tem-se 9 combinações e em cada vão seria testado um conjunto de três situações de rigidezes diferentes. No vão de três metros seria testada a seção calculada como ideal e duas mais rígidas que ela, no vão de 4,6m a seção calculada como ideal como de rigidez intermediária, tendo uma mais e outra menos rígida que ela, e o vão maior de 6m teria a seção ideal e duas menos rígidas. A figura 3 a seguir exemplifica as 9 situações:

**Figura 3 - Nove primeiras situações básicas de mudanças de parâmetros**

### 3.3 Teste de convergência de malha

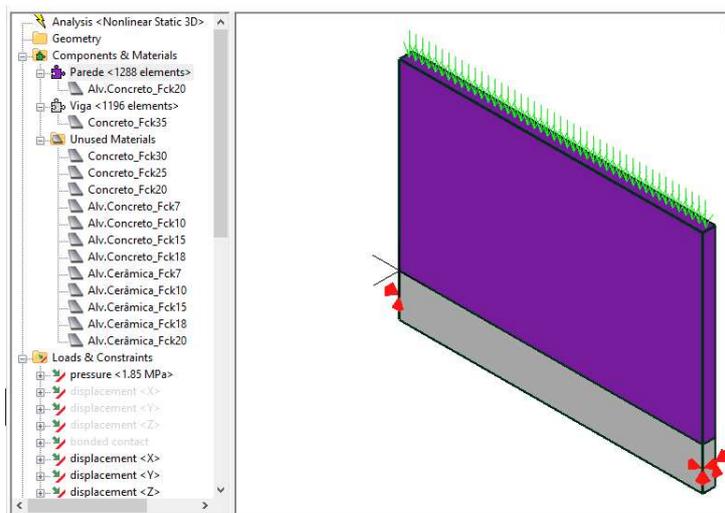
Como análise de teste, foram realizados modelos com as seções apresentadas na figura 3 e definidas de acordo com os limites de flechas teóricas apresentadas na tabela 4. Esses modelos continham apenas a viga trabalhando isoladamente com a carga apresentada.

Em relação a posição dos apoios, verificou-se que o programa apresenta o mesmo valor que a equação da linha elástica (equação 6) somente quando a viga é apoiada nas extremidades e no meio da sua altura. Esse caso coincide com a equação da linha elástica que é definida para flexão em torno do eixo central da seção.

Para o refinamento da malha, elementos de 5 e 10cm não apresentam grande diferença nos resultados. Contudo adotou-se uma discretização de 5x5 para as vigas e 10x10 para as paredes para conciliar desempenho computacional e extração dos resultados.

A figura abaixo mostra um exemplo de modelo antes da aplicação da carga:

**Figura 4 - Captura de tela do software durante o processo de modelagem**



## 4 Resultados dos modelos básicos

Os testes permitiram padronizar uma rotina de análise para as 9 situações modeladas.

No intuito de comparar com os valores da teoria da linha elástica, serão apresentados os resultados para as vigas apoiadas nas mesmas condições, ou seja, sobre nós na altura de seus centroides. No próximo capítulo considerações adicionais sobre os apoios serão discutidas

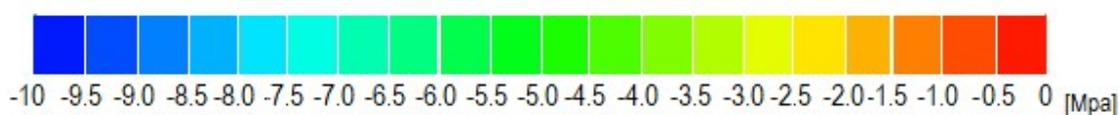
Para todos os modelos foram analisadas as imagens do software para a distribuição de tensões e medidos valores de flechas, fissuração e o comprimento de contato entre a parede e a viga. Também foram calculados o momento fletor atuante na viga e a média de tensões na parede na região próxima aos apoios. Por fim, conferiu-se o conceito de rigidez relativa, comparando a previsão teórica com a resposta do software.

O momento fletor associado a uma deformação no centro da viga pode ser calculado com uma transformação da equação 6:

$$M = f * \frac{48 * E_v I_z}{5 l^2} \quad (\text{Equação 7})$$

Para facilitar a visualização da solução apenas as tensões das paredes são mostradas. A escala de cores apresentada na figura 4 vale para todos os modelos e corresponde a um intervalo de tensões de compressão entre zero (cor vermelha) e 10 MPa (cor azul). Partes na cor preta indicam regiões com tensões que ultrapassam 10MPa

**Figura 5 - Escala de cores para a distribuição de tensões verticais na parede**

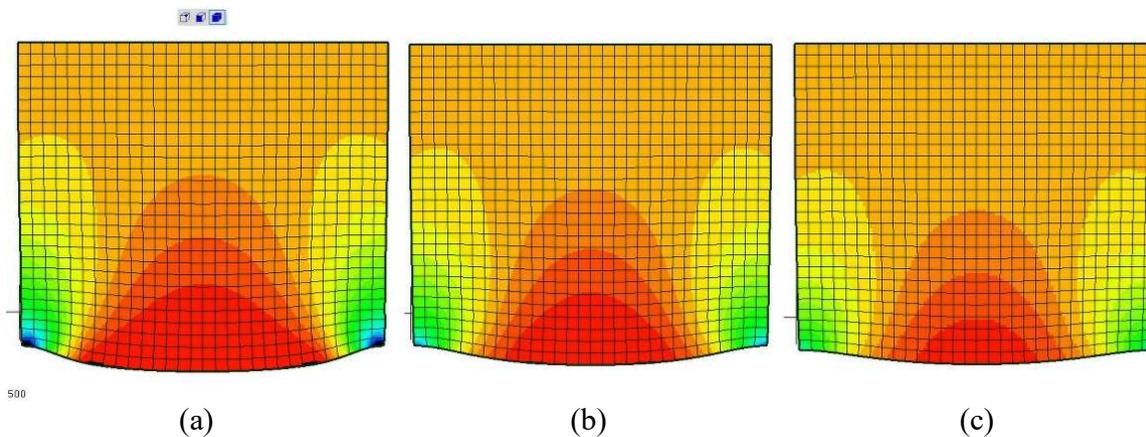


#### **4.1 Grupo 1 - Vão de 3 metros**

Para este vão foram analisadas a viga dimensionada para atender o limite de flecha da norma e dois casos mais rígidos que ela. Segundo a NBR 6118, a flecha máxima para o vão de 3m é 12mm. A equação da linha elástica para a viga V19x45, escolhida como mais representativa para esse comprimento de vão, fornece uma flecha de 9,1mm. O momento elástico associado a esse vão é de 394,75kN.m.

A figura 5 apresenta a distribuição de tensões verticais na parede apoiada nas vigas V19x45, V19x65 e V19x85 respectivamente. Percebe-se que o efeito arco diminui conforme mais rígida a viga for. A tabela 5 apresenta o valor de rigidez relativa para o sistema vigas-parede conforme as expressões de Riddington e Davies, vistas no item 2.2. A figura 6 mostra que quanto mais rígida a viga, menos expressivo o efeito arco.

**Figura 6 - Distribuição de tensões nas paredes do grupo 1 - vão = 3m - considerando as vigas:  
(a) V19x45, (b) V19x65 e (c) V19x85**

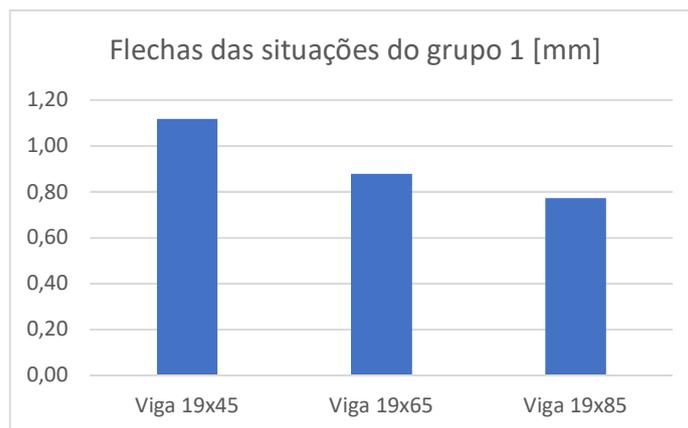


**Tabela 5 - Valores de rigidez relativa para as vigas do grupo 1 – Vão = 3m**

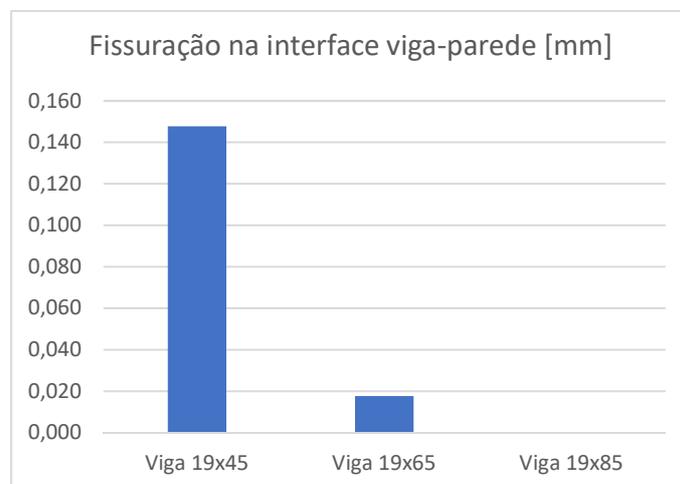
Rigidez relativa	V19x45	V19x65	V19x85
Riddington et al.	6,70	5,09	4,16
Davies et al.	6,37	4,83	3,95

A figura 6 registra a flecha observada em cada viga. A viga V19x45 que, isolada, acusava uma flecha de 9,1mm, teve, com a influência da parede, sua flecha reduzida para 1,12mm. Uma redução de 8,12x

**Figura 7 - Flechas do sistema viga-parede para as vigas do grupo 1 – Vão = 3m**



Na figura 7 temos a fissuração ocorrida na interface viga-parede no centro do vão

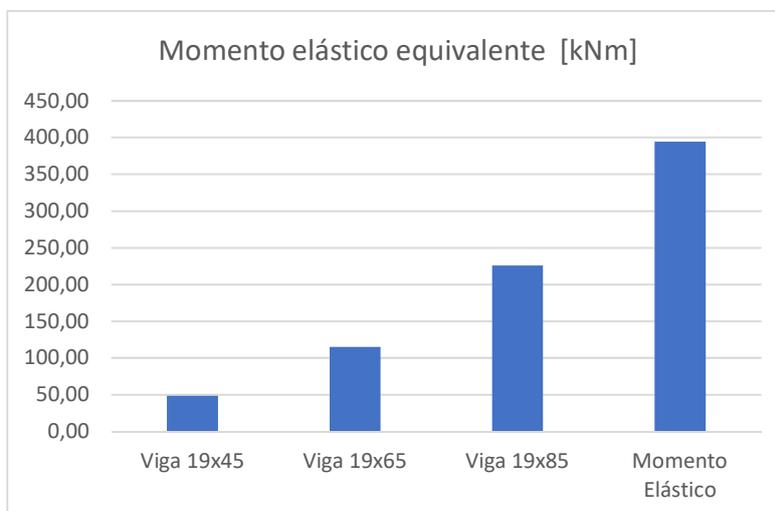
**Figura 8 - Descolamento entre viga e parede para o grupo 1**

As vigas V19x45 e V19x65 apresentaram microfissuras de 0,147 e 0,017mm respectivamente enquanto a viga V19x85 não apresentou fissuração mensurável.

Estas constatações corroboram os conceitos teóricos. Como não há descolamento, o modelo com a viga mais rígida apresenta o efeito puro da influência da rigidez da parede no travamento da viga. Percebe-se que quando se considera a contribuição da inercia da parede para a carga, esta absorve parte do momento diminuindo o absorvido pela viga.

Os outros modelos têm o efeito arco acentuado devido aos altos valores de rigidez relativa e também pela separação no contato, o que agrava a redistribuição de tensões.

A figura 8 mostra uma comparação dos momentos de flexão calculados pela equação 7 a partir das flechas. Percebe-se que quanto menor a seção da viga, menos momento ela absorveu. Para a viga V19x45 a redução de momento foi de 8,14 vezes, contra 3,44 vezes na viga V19x65. Já a viga que não causou fissuração a redução do momento foi bastante menor, 1,75 vezes.

**Figura 9 - Momento equivalente a cada flecha observada no grupo 1**

Medindo o comprimento de compressão confirma-se o esperado: a menor viga apresenta maior deslocamento no centro do vão e maior concentração de tensão próximo aos apoios. Para a situação mais crítica, neste caso a V19x45, observa-se um comprimento de 1m com uma tensão média correspondente de 5,54MPa.

A aplicação da expressão de verificação (equação 8) com os valores de tensões médias atuante mostraria a necessidade de uma resistência de prisma de 23,3 MPa (bloco de 35,88 MPa para uma eficiência de 0,65) na região do comprimento de compressão. Ocorreria o esmagamento do bloco.

$$\gamma_f \cdot N_k \leq \begin{cases} 1,0 & \text{paredes} \\ 0,9 & \text{pilares} \end{cases} \cdot \frac{0,7f_{pk}}{\gamma_m} \left[ 1 - \left( \frac{h_{ef}}{40 \cdot t_{ef}} \right)^3 \right] \cdot A \quad \text{Equação (8)}$$

Aplicando o procedimento as três vigas, têm-se os valores compilados na tabela 6.

**Tabela 6 - Comprimento de compressão e média das tensões atuante na região dos apoios para cada seção do grupo 1**

Vão 3m	Comprimento de compressão [m]	Tensões atuantes na região dos apoios [MPa]	f <sub>pk</sub> / f <sub>bk</sub> necessária [MPa]
V19x45	1,00	5,54	23,32 / 35,88
V19x65	1,54	3,60	15,16 / 23,32
V19x85	1,94	2,86	12,04 / 18,52

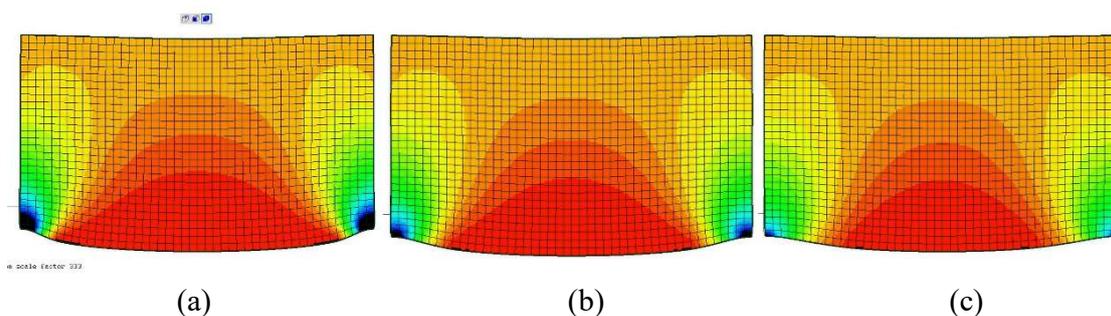
## 4.2 Grupo 2 - Vão de 4,6 metros

Para este grupo, o comprimento do vão maior faz com que os valores de rigidez relativa por Riddington sejam maiores que os anteriores, resultando na manifestação mais pronunciada do efeito arco.

A flecha máxima segundo a NBR 6118 para esse vão seria de 18,4mm. A viga que atende melhor esse valor é a V19x65 que, isolada, sofre uma deformação de 17,85mm. O momento elástico associado a esse vão é de 928,10kN.m.

A figura 9 apresenta as tensões verticais em uma parede apoiada nas vigas V19x45, V19x65, V19x85 respectivamente. Percebe-se que o efeito arco diminui conforme mais rígida a viga.

**Figura 10 - Distribuição de tensões nas paredes do grupo 2 – vão = 4,6m - considerando as vigas (a) V19x45, (b) V19x65, (c) V19x85**



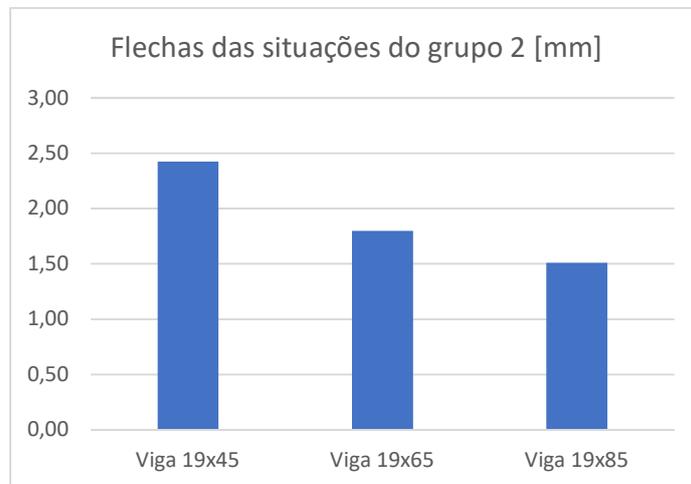
A tabela 7 apresenta o valor de rigidez relativa para o sistema vigas-parede segundo Riddington e Davies

**Tabela 7 - Valores de rigidez relativa para as vigas do grupo 2 - vão = 4,6m**

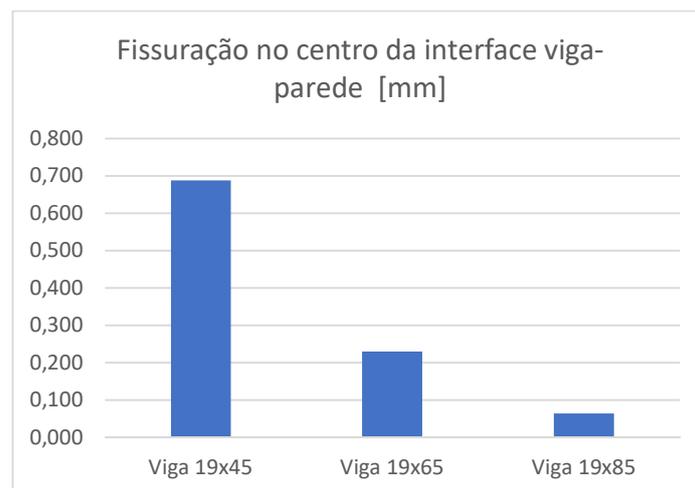
Rigidez relativa	V19x45	V19x65	V19x85
Riddington et al	9,24	7,01	5,73
Davies et al	6,37	4,83	3,95

A figura 10 mostra a flecha para cada situação enquanto a figura 11 apresenta a fissuração na interface viga-parede.

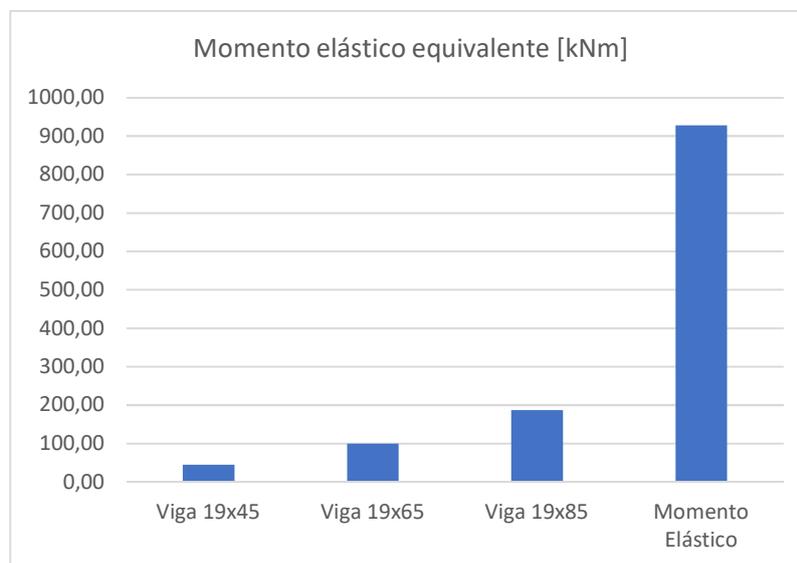
**Figura 11 - Flechas do sistema viga-parede para as vigas do grupo 2 – Vão = 4.6m**



**Figura 12 - Fissuração na interface viga-parede para o grupo 2**



O descolamento no centro do vão teve valores maiores. Para a V19x45 por exemplo, o tamanho da abertura na interface teve valores que já são classificados como trincas pela norma NBR15575.

**Figura 13 - Momento equivalente a cada flecha observada no grupo 2**

Comparando com o momento da viga isolada as reduções nos momentos (figura 12) foram bastante maiores, com valores de 20,8 vezes para a V19x45, 9,30 vezes para V19x65 e 4,95 para a V19x85.

Repedindo o procedimento comentado na análise do grupo 1 é possível determinar os valores de comprimento de compressão, da tensão correspondente e inferir a resistência de prisma/bloco que exigiriam conforme compilado na tabela 8.

**Tabela 8 - Comprimento de compressão e média das tensões atuante na região dos apoios para cada seção do grupo 2**

Vão 4,6m	Comprimento de compressão [m]	Tensões atuantes na região dos apoios [MPa]	fpk / fbk necessária [MPa]
V19x45	0,90	9,44	39,7 / 61,15
V19x65	1,45	5,86	24,67 / 37,96
V19x85	2,05	4,14	17,43 / 26,82

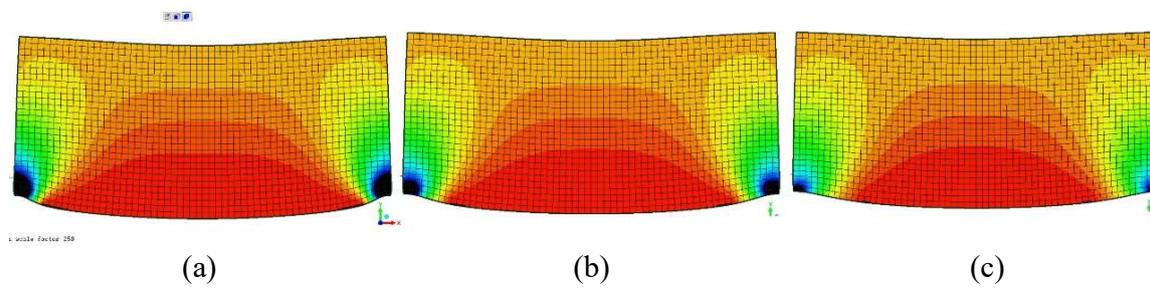
### 4.3 Grupo 3 - Vão de 6 metros

Esse grupo contém os modelos mais subdimensionados. A viga que atenderia originalmente a exigência da norma é a viga de seção 19x85. Ela teria uma flecha de 23,14mm enquanto a flecha

limite permitida é de 24mm. O momento elástico para esse vão e carga adotada é de 1579kN/m. As outras duas situações apresentam vigas de inercia menor.

A figura 13 mostra um efeito arco bastante pronunciado. É possível observar a constatação de Sttaford Smith (1977) que estabelece que o efeito arco se manifesta até uma altura de 70% do vão, já que mesmo na situação com a viga mais deficiente (lado esquerdo), a área de tensões próximas a zero fica mais larga, mas não eleva sua altura. A tabela 9 apresenta os valores de rigidez relativa.

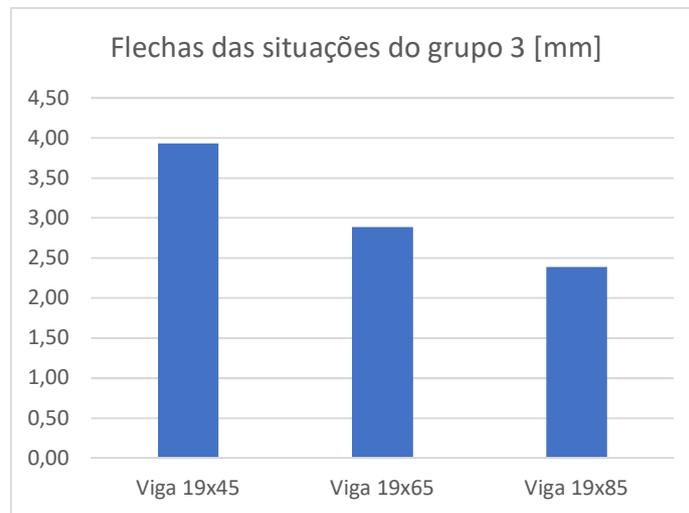
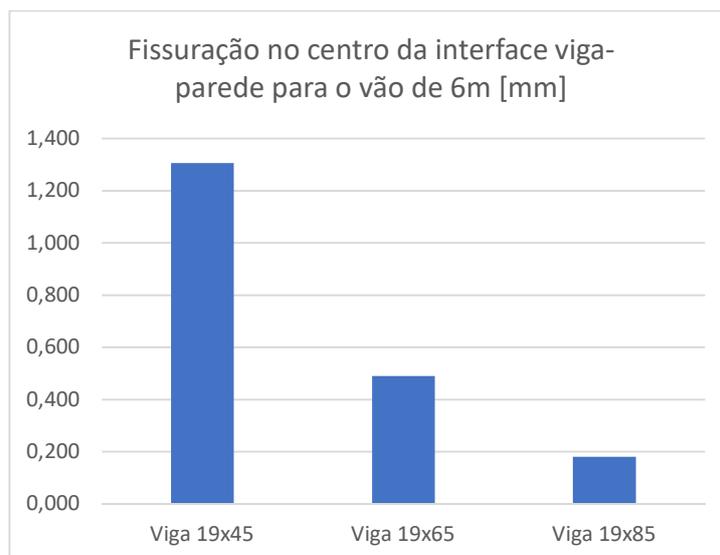
**Figura 14 - Distribuição de tensões nas paredes do grupo 2 – vão = 6m - considerando as vigas (a) V19x45, (b) V19x65 e (c) V19x85**



**Tabela 9 - Valores de rigidez relativa para as vigas do grupo 3 - vão = 6m**

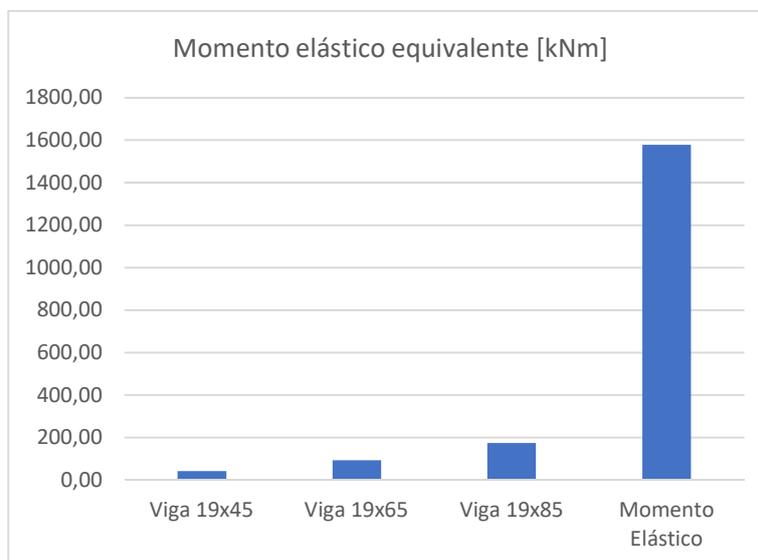
Rigidez relativa	V19x45	V19x65	V19x85
Riddington et al	11,28	8,56	7,00
Davies et al	6,37	4,83	3,95

Como nas outras situações, as figuras 14 e 15 apresentam os valores de flecha e fissuração para cada modelo deste grupo.

**Figura 15 - Flechas do sistema viga-parede para as vigas do grupo 3 – Vão = 6m****Figura 16 - Fissuração na interface viga-parede para o grupo 3**

Mesmo na situação com viga de 19x45, vista como deficiente para o vão pelo método convencional, foi constatada uma flecha que atenderia as exigências da NBR 6118 para este vão. Contudo, ocorreriam trincas significativas na interface parede e viga, em torno de 1,3mm para essa mesma situação.

A seguir a comparação de momentos e a média de tensões na região próxima aos apoios.

**Figura 17 - Momento equivalente a cada flecha observada no grupo 3**

As situações do grupo 3 mostram a mesma tendência de redução dos momentos. Quando se analisa o comprimento de compressão todas as seções exibem uma situação de compressão excessiva como mostra a tabela 9.

**Figura 18 - Comprimento de compressão e média das tensões atuante na região dos apoios para cada seção do grupo 3**

Vão 6m	Comprimento de compressão [m]	Tensões atuantes na região dos apoios [MPa]	$f_{pk}$ / $f_{bk}$ necessária [MPa]
V19x45	0,94	11,79	50,10 / 77,08
V19x65	1,45	7,64	32,18 / 49,50
V19x85	2,05	5,41	22,78 / 35,04

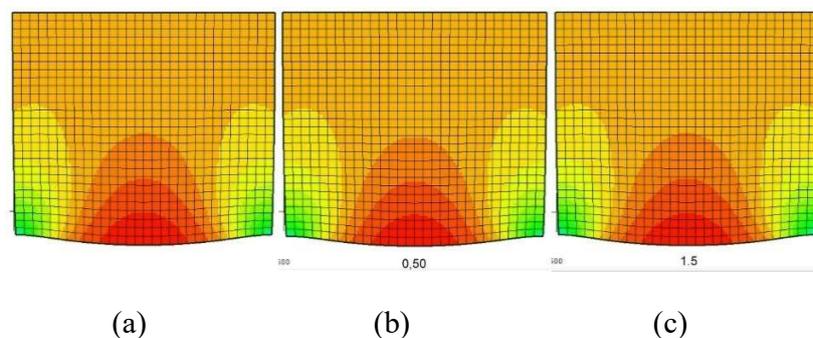
## 5 Outras mudanças de parâmetros

No capítulo anterior foram analisados 9 situações com as combinações de três comprimentos e três seções transversais diferentes. Neste capítulo, serão feitas algumas considerações complementares para as situações mais representativas do capítulo anterior. Os parâmetros adicionais estudados foram: as características da superfície de contato viga-parede, a resistência característica dos blocos e as condições de apoio. Os resultados são apresentados a seguir.

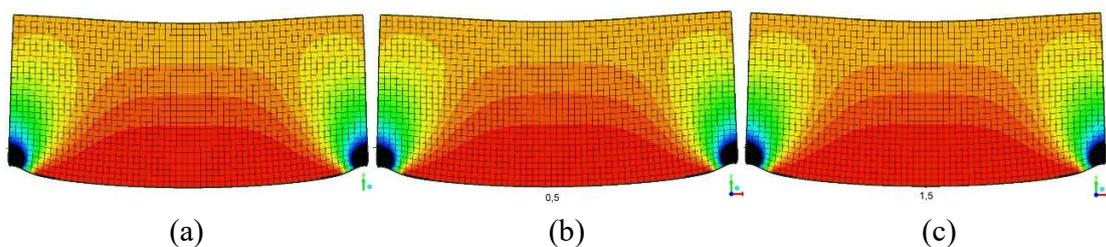
### 5.1 Variação das características do contato viga-parede

No intuito de observar a influência do contato viga-parede no efeito arco considera-se uma variação de  $\pm 50\%$  das rigidezes normal e tangencial da interface. De alguma forma estes modelos retratariam situações com uma argamassa mais ou menos resistente do que aquela utilizada anteriormente. Foram testadas duas situações extremas: a situação da V19x85 com vão de 3m e da V19x45 com vão de 6m. As imagens 18 e 19 não mostram alterações significativas na flecha e na fissuração em ambas as variações de contato adotadas.

**Figura 19 - Distribuição de tensões para o a situação 3 (Vão de 3m e V19x85) para valores de interface: (a) normais; (b) minorados em 50% e (c) majorados em 50%**



**Figura 20 - Distribuição de tensões para o a situação 7 (Vão de 6m e V19x45) para valores de interface: (a) normais; (b) minorados em 50% e (c) majorados em 50%**



A tabela 10 mostra valores praticamente idênticos par o comprimento de compressão e consequentemente, para a média das tensões na região dos apoios. Conclui-se que a resistência da argamassa de contato pouco impacta o efeito arco.

**Tabela 10 - Influência da mudança dos coeficientes de contato para as situações menos e mais rígidas**

	V19x85 - 3m			V19x45 - 6m		
	Valores Originais (VO)	0,5*(VO)	1,5*(VO)	Valores Originais (VO)	0,5*(VO)	1,5*(VO)
Comprimento de compressão [m]	1,94	1,94	1,94	0,94	0,90	0,95
Tensão Média região dos apoios [Mpa]	2,86	2,86	2,86	11,79	12,31	11,66

### 5.2 Mudança na resistência do bloco

Blocos com menor resistência a compressão tem também modulo de elasticidade menor, o que diminui os valores de rigidez relativa. As vigas ficam mais rígidas em relação as paredes, absorvendo mais momento e diminuindo o efeito arco. Este teste foi realizado com as três situações do grupo 1 e o resultado das simulações (figuras 20, 21 e 22) confirmou o esperado pelos valores de rigidez relativa apresentados na tabela 11.

**Tabela 11 - Comparação de valores de rigidez relativa variando a resistência dos blocos nas três paredes do grupo 1**

	V19x45		V19x65		V19x85	
	20MPa	7MPa	20MPa	7MPa	20MPa	7MPa
Rigidez Relativa Riddington et al	6,70	5,16	5,09	3,91	4,16	3,20
Rigidez Relativa Davies et al	6,37	4,90	4,83	3,72	3,95	3,04

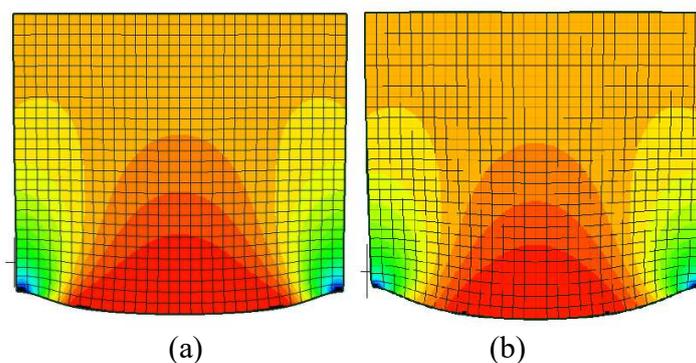
**Figura 21 - Distribuição de tensões na V19x45 com vão de 3m e blocos: (a) de 20MPa e (b) de 7MPa**

Figura 22 - Distribuição de tensões na V19x65 com vão de 3m e blocos: (a) de 20MPa e (b) de 7MPa

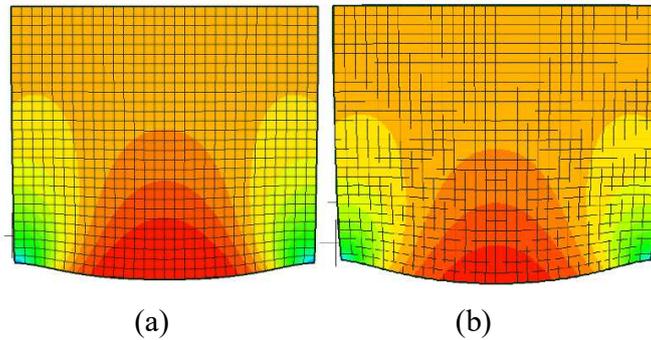
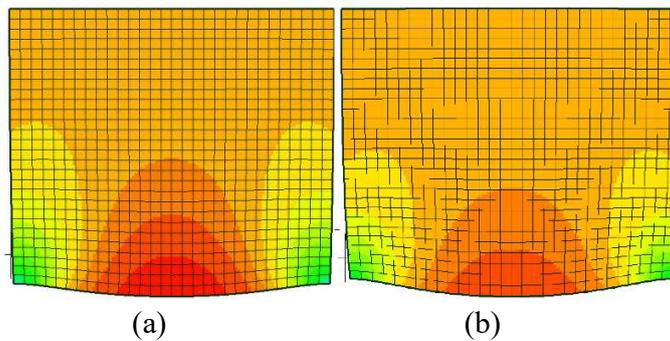
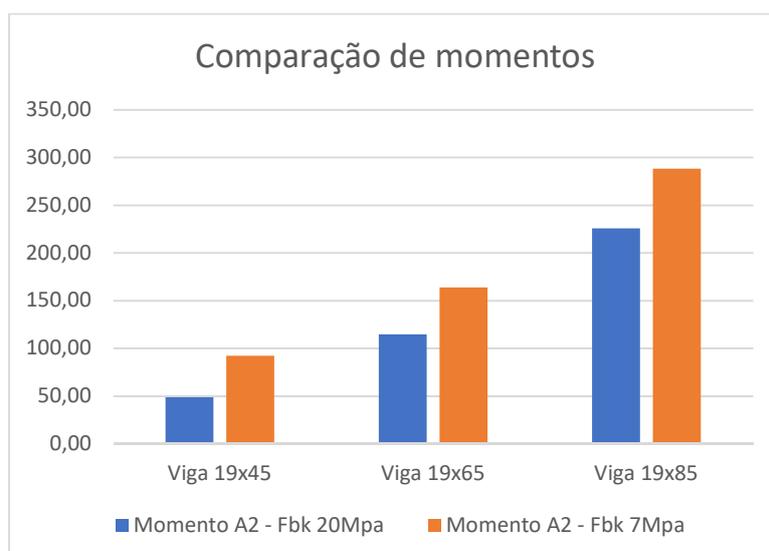


Figura 23 - Distribuição de tensões na V19x85 com vão de 3m e blocos: (a) de 20MPa e (b) de 7MPa



A figura 23 mostra que o momento absorvido pela viga foi maior em todas as situações de paredes com menor resistência.

Figura 24 - Momento elástico equivalente observado com a alteração da resistência do bloco



A tabela abaixo mostra qual foi a média de tensões em função do comprimento de compressão para cada situação:

**Tabela 12 - Comparação de comprimento de compressão e média das tensões atuantes próximo dos apoios devido à variação da resistência característica dos blocos nas três paredes do grupo 1**

	V19x45		V19x65		V19x85	
	20MPa	7MPa	20MPa	7MPa	20MPa	7MPa
Comprimento de compressão [m]	1,00	1,34	1,54	1,90	1,94	3,00
Tensões Média na região dos apoios [Mpa]	5,54	4,13	3,60	2,92	2,86	1,85

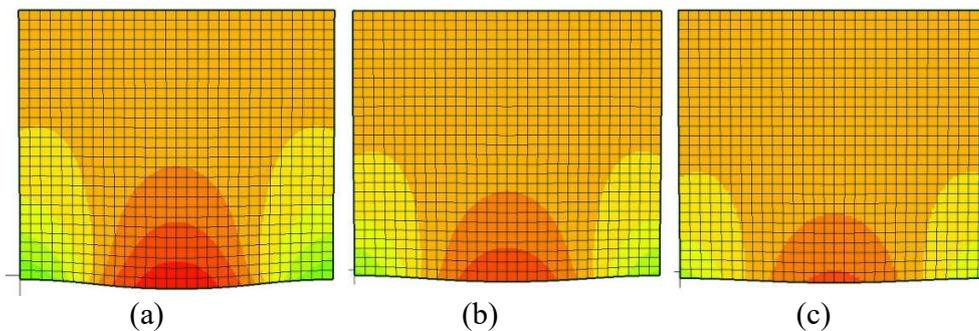
Apesar de o bloco de 7 Mpa não resistir as tensões de compressão atuante, esses modelos serviram para mostrar que paredes menos rígidas acompanham melhor a deformação da viga: apesar de flechas maiores, as trincas na interface foram menores que a situação de blocos de 20Mpa. O comprimento de compressão entre as situações equivalentes aumentou até 54% nas vigas menos rígidas, mostrando que paredes demasiadamente rígidas podem não trabalhar tão bem sobre um apoio suscetível a deformação. As vigas responderam de forma mais próxima da situação em que elas trabalham sozinha. A redução do momento foi de apenas 1,40x na V19x85.

### **5.3 Mudança nas formas de apoio**

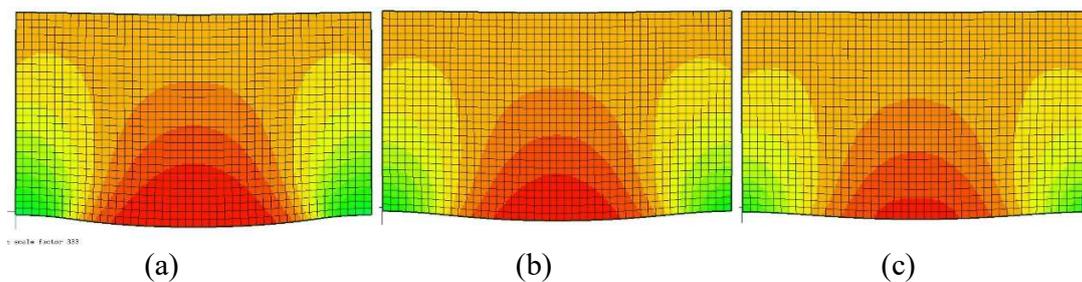
Todos os modelos apresentados até então consideram que a viga está apoiada em nós localizados na altura do seu centroide. Esta abordagem tem por objetivo respeitar as condições de apoio pressuposto no pré-dimensionamento que considera uma viga elástica. Assim, é mais fácil comparar modelos com sistema monolítico viga-parede com o cálculo teórico de uma viga isolada recebendo a mesma carga. Contudo, sabe-se que em situação real a viga é apoiada em pilares. Essa configuração tende a reduzir o efeito arco, já que o pilar permite uma área maior de apoio e as deformações serão menores devido ao eixo de inércia estar na base da viga.

As imagens das figuras 24 a 26 ilustram as distribuições de tensões observadas nas paredes dos três grupos considerando as vigas apoiadas em um comprimento de 40cm, que corresponde a uma das dimensões dos pilares.

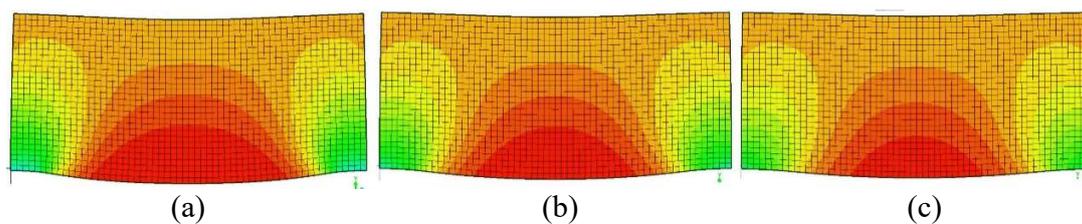
**Figura 25 - Vão de 3 metros - Vigas apoiadas na face inferior. (a) V19x45; (b) V19x65 e (c) V19x85**



**Figura 26 - Vão de 4,6 metros - Vigas apoiadas na face inferior. (a) V19x45; (b) V19x65 e (c) V19x85**



**Figura 27 - Vão de 6 metros - Vigas apoiadas na face inferior. (a) V19x45; (b) V19x65 e (c) V19x85**



É nítida a diminuição do efeito arco se compararmos aos modelos equivalentes das seções 4.1, 4.2 e 4.3 (figuras 5, 9 e 13)

A tabela abaixo resume os valores de flechas, dimensão das fissuras, comprimento de compressão e tensão média na área comprimida para todos os modelos apoiados em faces.

**Tabela 13 - Flechas, dimensão das fissuras, comprimento de compressão e tensão média nos apoios para situações de vigas apoiadas em comprimento de 40cm**

		Flecha [mm]	Fissuração [mm]	Comprimento de compressão [m]	Tensão média nos apoios [Mpa]
Grupo 1: Vão 3m	V19X45	0,259	0,000	2,20	2,52
	V19X65	0,222	0,000	3,00	1,85
	V19X85	0,204	0,000	3,00	1,85
Grupo 2: Vão 4,6m	V19X45	0,600	0,008	2,50	3,40
	V19X65	0,554	0,000	2,90	2,93
	V19X85	0,483	0,000	3,42	2,46
Grupo 3: Vão 6m	V19X45	1,068	0,035	2,70	4,10
	V19X65	0,940	0,001	3,25	3,41
	V19X85	0,852	0,000	3,75	2,95

Quando se compara cada valor, percebe-se que todas as flechas são reduzidas à valores entre 23,15% (V19x45 – Grupo 1) a 35,68% (V19x85 – Grupo 3) da flecha observadas nas mesmas situações do capítulo 4.

Só houve fissuração nos modelos subdimensionados. Mesmo assim as fissuras são muito menores do que nas situações equivalentes ao capítulo anteriores. A maior abertura seria de uma microfissura de 0,035mm na situação V19x45 – Grupo 3.

Os comprimentos de compressão aumentaram de 54% (V19X85 – Grupo 1) à 87% (V19x45 – Grupo 3). Já o valor das tensões médias atuantes na região de apoio chegou a 4,10Mpa, bastante menor que os 11,79Mpa quando se consideram as vigas apoiadas em nós.

A tabela 14 complementa a análise da sobrecarga na região dos apoios com os valores de resistência de prisma e de bloco necessários. São recapitulados os valores já apresentados para as situações de vigas apoiadas em nós para a melhor comparação.

**Tabela 14 - Resistências necessárias de prisma (f<sub>pk</sub>) e de bloco (f<sub>bk</sub>) para as vigas apoiadas em nós e em faces de lado 40cm**

		Apoio em nós		Apoio em faces	
		f <sub>pk</sub>	f <sub>bk</sub>	f <sub>pk</sub>	f <sub>bk</sub>
Vão 3m	V19X45	23,32	35,88	10,61	16,32
	V19X65	15,16	23,32	7,78	11,98
	V19X85	12,04	18,52	7,78	11,89
Vão 4,6m	V19X45	39,7	61,15	14,31	<b>22,02</b>
	V19X65	24,67	37,96	12,33	19
	V19X85	17,43	26,82	10,35	15,96
Vão 6m	V19X45	50,1	77,08	17,26	<b>26,55</b>
	V19X65	32,18	49,5	14,35	<b>22,08</b>
	V19X85	22,78	35,04	12,42	19,1

Percebe-se que a menor ocorrência do efeito arco nas situações de vigas sobre pilares diminui bastante o número de situações que teriam o esmagamento da parede. Apenas as situações de vigas subdimensionadas geram média de tensões superiores aos 20 Mpa do bloco. Contudo, é importante relembrar que esses valores de tensões podem ser agravados, já que esse valor é uma média, podendo os blocos das extremidades terem tensões ainda maiores, e também por este trabalho estar considerando apenas as forças de compressão, ignorando as forças resultantes da ação do vento e do desaprumo.

## 6 Considerações finais

Neste trabalho procurou-se analisar a influência de alguns parâmetros de dimensionamento no processo de redistribuição das tensões de compressão em paredes de alvenaria estrutural quando apoiadas sobre um elemento de transição com comportamento a flexão predominante.

A proposta de análise paramétrica foi dividida em duas partes: Primeiramente foram consideradas como variáveis o comprimento do vão da viga e a altura da seção. Todas as vigas eram apoiadas em nós localizados na sua altura média. O objetivo disso era perceber a influência da parede na rigidez do conjunto, e comparar os resultados com o dimensionamento usual elástico. Observou-se claramente a redução dos deslocamentos na viga e conseqüentemente menores valores de momentos absorvidos por ela. Nas paredes, percebeu-se que o comprimento

de compressão perto do apoio diminui com o comprimento da viga e aumenta com a altura da seção, confirmando sua dependência em relação a rigidez relativa do sistema viga-parede.

As simulações mostram que, quando o pré-dimensionamento é feita a luz das deformações limites permitidas pela norma, o comprimento de compressão perto do apoio é da ordem de  $1/3$  do vão. Esta abordagem levou ao esmagamento da parede em todas as situações, porém, deve-se estar cientes que esses valores foram em partes tão altos devido as considerações de apoio adotadas. Quando consideramos a viga apoiada em nós, a flexão dela é maior e a área descolada é maior que uma situação real, quando a viga é apoiada em pilares.

Por isso, no segundo grupo de mudanças de parâmetros, uma das situações propostas foi a alteração das condições de apoio. Quando considera-se vigas apoiadas em pilares, os três parâmetros que governam o efeito arco (abertura de fissura, comprimento de compressão e tensão média na região comprimida) tendem a diminuir. No caso em análise, os valores calculados para a resistência de bloco necessária mostram que haveria esmagamento apenas nas vigas subdimensionadas com o conceito de linha elástica. Contudo, apesar das outras situações não ultrapassarem o valor de resistência do bloco, nelas também houve migração das tensões nos apoios. Como este trabalho não considera ações de vento e desaprumo, é necessário um olhar atento nestas situações, pois a reserva de resistência pode ser importante já que se tem uma sobrecarga nas paredes.

Outros parâmetros avaliados foram a qualidade de contato e a mudança de resistência dos blocos. O tipo de contato, que poderia ser interpretado como a influência da resistência característica da argamassa, não influencia quase em nada o fenômeno do efeito arco. Quando alterna-se a resistência dos blocos, altera-se também o módulo de elasticidade da parede, influenciando a rigidez da alvenaria que condiciona a porcentagem de momento absorvida por ela. As paredes menos rígidas acompanharam melhor a deformação da viga: apesar de flechas maiores, as trincas na interface foram menores que a situação de blocos de 20Mpa. O comprimento de compressão para situações equivalentes aumentou até 54% e as vigas trabalharam de forma mais próxima da situação em que elas trabalham sozinha., mostrando que paredes demasiadamente rígidas podem não trabalhar tão bem quando apoiadas em um apoio discreto, como uma viga.

Este estudo limitou-se a análise da situação de viga simplesmente apoiada que apresenta maior flecha em relação a uma viga contínua. Entretanto, seria importante avaliar a influência de alguns outros aspectos como a presença de aberturas na parede, o efeito de cargas laterais que podem se mostrar relevante e também a consideração dos esforços de cisalhamento nas estruturas de apoio.

## **7 Agradecimentos**

Agradeço imensamente ao professor Jean Marie Desir pelos ensinamentos que me transmitiu quando fui seu aluno e também durante a orientação, sempre disponível, paciente e bem humorado, facilitando minha compreensão e tornando esse trabalho possível.

Aos meu irmãos, Douglas e Débora, por serem exemplos para mim de pessoas, pais e profissionais. Obrigado por todo o tipo de ajuda que me deram.

Ao meu pai, Luiz Rheinheimer dos Santos, que desde pequeno insistiu que uma educação de qualidade seria o diferencial para uma vida melhor. Por todo o esforço que fez para dar oportunidades melhores aos filhos.

À minha mãe, Alzira Dall Cortivo dos Santos, pela companhia constante desde o vestibular, por todas as vezes que veio à Porto Alegre me ajudar, pelas orações e por todo o amor que me deu.

Por fim, agradeço aos meus amigos, que fizeram esses 6 anos e meio de faculdade terem sido uma experiência maravilhosa e que vai deixar muita saudade.

---

## 8 Referências

ABNT. **NBR 15812 - Alvenaria Estrutural - Blocos Cerâmicos**. [S.l.]: [s.n.], 2010. ISBN ISBN 978-85-207-01978-7.

ABNT. **NBR 15961 - Alvenaria Estrutural - Blocos de Concreto**. [S.l.]: [s.n.], 2010. ISBN ISBN 978-85-07-02916-8.

ABNT. **NBR 15575 - Edificações habitacionais - Desempenho**. [S.l.]: [s.n.], 2013.

ABNT. **NBR 6118 - Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**. [S.l.]: [s.n.], 2014.

BARBOSA, P. C. **Interação entre paredes de alvenaria estrutural e vigas e concreto armado**. São Carlos: [s.n.], 2000.

BRITISH STANDARDS INSTITUTE - BSI. Structural recommendations for loadbearing walls (CP 111), n. 1, 1948. ISSN ASIN: B00ZIMS9TO.

BSI. **BS 5628 - Code of practice for use of masonry**. [S.l.]: [s.n.], 2005.

BUHAN, P. D.; FELICE, G. D. A homogenization approach to the ultimate strength of brick masonry. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 45, n. 7, p. 1085-1104, Julho 1997. ISSN [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(97\)00002-1](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(97)00002-1).

BURHOUSE, P. Composite action between brick penal wall and their supporting beams. **Proceedings of the institution of Civil Engineers**, v. 43, p. 175-194, Junho 1969.

DAVIES, S. R.; AHMED, A. E. An approximate method for analysing composite walls/beams. **International Symposium On Load-Bearing Brickwork**, London, p. 305-320, 1977.

DÉSIR, J. M. Analysis of the contribution of masonry infill in the overall stiffness of concrete frames. **15th International Brick and Block Masonry Conference**, Florianópolis, 2012.

GERALDO, B. J. Comparativo de custo entre alvenaria estrutural e estrutura convencional de concreto em edifícios de habitações populares. **Especialize On-line IPOG**, Goiânia, v. I, n. 14, p. 1-19, Dezembro 2017. ISSN ISSN 2179-5568.

---

GHASSAN, K.; ARMIN, M. Constitutive Models for Nonlinear Finite Element Analysis of Masonry Prisms and Infill Walls. **Us Army Corps of Engineers - Engineer Research and Development Center**, Washington, DC, Março 2008. ISSN ERDC/CERL TR-08-19.

HENDRY, A. W. Engineered design of masonry buildings: fifty years development in Europe. **Progress in Structural Engineering and Materials**, Edinburgh, n. 4, p. 291-300, 2002. ISSN DOI: 10.1002/pse.118.

KUCZMA, M.; WYBRANOWSKA, K. Numerical homogenization of elastic brick masonry. **Civil and Environmental Engineering Reports**, Zielona Góra, n. 1, p. 135-152, 2005. ISSN ISBN 83-89712-71-7.

LOURENÇO, P. B.; ZUCCHINI, A. Homogenisation Approaches for Structural Analysis of Masonry Buildings. **Structural Analysis of Historical Constructions**, New Delhi, p. 59-76, 2006.

NAVARATNARAJAHM, V. Composite action of brick walls supported on beams. **International Seminar/Workshop on planning, desing, construction of load-bearing brick buildings for developing countries**, New Delphi, p. 204-225, 1981.

PORTAL BRASIL ENGENHARIA. Portal Brasil Engenharia - Indústria de blocos tem capacidade para produzir 83 mil casas por mês. **Portal Brasil Engenharia**, 2013. Disponível em: <<http://www.brasilengenharia.com/portal/noticias/noticias-da-engenharia/4428-industria-de-blocos-tem-capacidade-para-produzir-83-mil-casas-por-mes>>. Acesso em: 8 Dezembro 2019.

RAMALHO, M. A. **Sistema para análise de estruturas considerando itneração com o meio elástico**. São Carlos: [s.n.], 1990.

REVISTA GRANDES CONSTRUÇÕES. Seguindo em bloco para um futuro concreto. **Revista Grandes Construções**, 2016. Disponível em: <<http://www.grandesconstrucoes.com.br/Materias/Exibir/seguindo-em-bloco-para-um-futuro-concreto>>. Acesso em: 8 dez. 2019.

ROSENHAUPT, S. Experimental study of masonry walls on beams. **Journal Of The Structural Division**, v. 88, p. 137-166, Junho 1962.

SANTIAGO, W. C.; BECK, A. T. Estudo da conformidade de blocos estruturais vazados de concreto simples fabricados no Brasil. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. XI, n. 4, p. 662-672, Agosto 2018. ISSN ISSN 1983-4195.

STAFFORD SMITH, B.; KHAN, M. A. H.; WICKENS, H. G. Test on wall-beam structures. **International Symposium On Load-Bearing Brickwork**, London, p. 289-603, 1977.

STAFFORD SMITH, B.; RIDDINGTON, J. R. The Composite Behaviour of Elastic Wall-Beam systems. **Proceedings of the Institutio of Civil Engineers**, p. 377-391, Junho 1977.

WOOD, R. H. The Composite Action of Brick Panel Walls Supported on Reinforced. **National Building Studies/HMSO**, London, n. 13, 1952.