



## **EFEITO ARCO EM ESTRUTURAS DE ALVENARIA ESTRUTURAL**

**Rodrigo Carvalho da Mata**

**Gustavo de Freitas Vilela**

**Hellen Karoline Queiroz Ribeiro**

**Mauro Lukas Cardoso da Silva**

**Brendda Santos Rocha**

rodrigo.c@pucgoias.edu.br

gustavo\_fvilela@hotmail.com

hellenkqueiroz@gmail.com

maurolukas7@gmail.com

eng.brendda@gmail.com

Escola de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC-GO

R. 235. 76 - Setor Leste Universitário, 74605-050. Goiânia, Goiás, Brasil

**Resumo.** Visando compreender o comportamento entre painéis de alvenaria e vigas de concreto armado, este trabalho analisou, por meio de modelagem numérica, o fenômeno efeito arco. O software utilizado para a simulação das estruturas foi o Diana v.9. no qual vinte e quatro modelos numéricos foram desenvolvidos. Os resultados referentes a estas simulações mostraram que o efeito arco pode provocar um alívio das tensões verticais ao longo do vão da estrutura suporte, e com isso causar a concentração desses esforços nos apoios. Tal configuração de tensões, também permitiu notar que métodos tradicionais para análise do momento fletor nas vigas podem ser incompatíveis, já que o momento máximo pode sofrer drásticas reduções. Apesar de relatar sua existência, a ABNT NBR 15961 (2011) ainda não se atenta às mudanças causadas pelo efeito arco, o que pode acarretar, por exemplo, em um superdimensionamento da estrutura de transição em edifícios de alvenaria estrutural - pilotis. Logo, é necessário que existam mais debates e estudos a respeito do tema, para que estruturas mais econômicas e fiéis às suas solicitações sejam desenvolvidas.

**Palavras-chave:** Alvenaria estrutural, Modelagem numérica, Efeito arco, Interação parede-viga, Dimensionamento.

## INTRODUÇÃO

O surgimento da alvenaria como sistema construtivo está diretamente ligado ao surgimento da sociedade, pois desde os primórdios foi usada tanto como estrutura de vedação, quanto como estrutura de suporte. Com isso, o aumento de estudos e pesquisas aplicadas motivou pesquisadores como Wood a investigarem o comportamento deste tipo de estrutura, sendo que em um de seus estudos de 1952, observou-se que as cargas verticais aplicadas em um painel não eram transferidas de maneira uniforme para a viga em que estava apoiada. Ele descreveu que o sistema parede/viga funcionava como um arco atirantado, onde a viga assemelhava-se a um tirante e o arco se formava na parede. Com isso, a carga, que inicialmente era distribuída, passou a se concentrar nos apoios, formando assim o efeito arco.

Paes (2008) comenta que o efeito arco é um tema que tem sido bastante estudado e discutido tecnicamente, mas ainda não há um procedimento seguro e prático para se considerar em projetos. No entanto, para o estudo do comportamento de paredes de alvenaria estrutural, são utilizados modelos numéricos que otimizam os projetos, possibilitam a compreensão do desempenho estrutural e verificam a influência de fatores externos como a ação dos ventos.

Neste contexto, o presente trabalho está voltado à compreensão da interação entre paredes de alvenaria estrutural e vigas de concreto armado. Para isto, foi utilizada a modelagem computacional em *software* de simulação com base no método dos elementos finitos, avaliando-se o comportamento do diagrama de momento fletor da viga de concreto, quando submetida ao efeito arco. Posteriormente foi feita uma comparação das análises – elástica (linear) e numérica (não linear) – da distribuição de carregamento e foi discutida a importância de se desenvolver modelos fiéis e econômicos da estrutura suporte com o possível auxílio de análise numérica.

## 1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 1.1 Efeito Arco

Conforme relatos de Barbosa (2000), na interface entre a parede de alvenaria e a estrutura de suporte, surgem tensões normais verticais de tração que, quando chegam ao valor máximo suportado pela argamassa, provocam uma separação entre a parede e a viga. Desse modo, a perda deste contato faz com que a distribuição de tensões seja evidente para os apoios, aumentando a solicitação nesta região. Tal comportamento entende-se por efeito arco.

De acordo com Pereira (2016), a principal característica do efeito arco refere-se as tensões internas da “massa” de alvenaria, que se orientam para os apoios, onde a parte superior da parede sofre alteração de tensões. Ressalta-se ainda que o efeito em estruturas de transição exige apenas armadura de tração mínima, pois na região central do vão a estrutura é pouco solicitada.

Conforme relatos de Wood (1952), o comportamento da parede/viga como arco atirantado deve-se ao funcionamento da viga como tirante, que resulta na formação do arco na parede. Além disso, o arco se forma a partir de uma relação maior ou igual a 0.60 entre o comprimento da viga e a altura da parede, sendo que para valores inferiores ocorre um aumento das tensões cisalhantes na interface parede/viga. Posteriormente, Riddington et al. (1978) indicam que, para uma razão entre a altura da parede e o vão da viga ( $h/l$ ) maior que 0.7, as cargas atuantes não influenciam na formação do arco, podendo ser apenas acrescidas.

Barbosa (2000) expõe que as concentrações de tensões de compressão verticais e cisalhantes horizontais na parede, ocorrem por transferência de carga para os apoios, como ilustra a Fig. 1-a. Usualmente, tanto as tensões verticais quanto as tensões cisalhantes são nulas na região central e crescente nos apoios, já as tensões horizontais são distribuídas em uma região de tração e outra de compressão, como ilustra a Fig. 1-b.

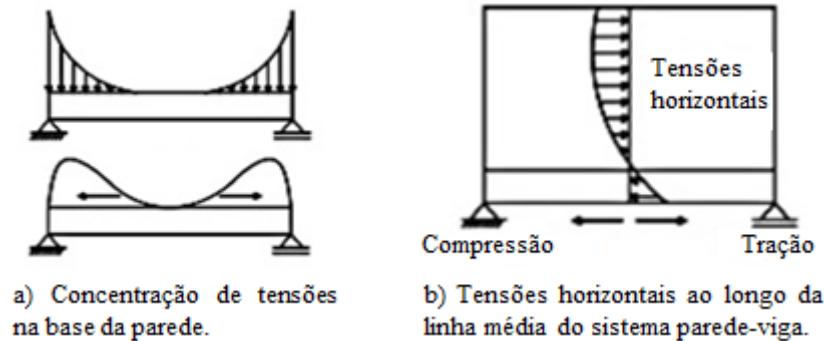


Figura 1. Distribuição de tensões no sistema parede-viga (Barbosa, 2000).

## 1.2 Rigidez Relativa do sistema parede-viga

Fatores como a inércia, o módulo de elasticidade e o comprimento do vão, influenciam na distribuição de tensões do sistema parede-viga. Tais fatores também estão diretamente relacionados ao conceito de rigidez relativa, que por sua vez é responsável por auxiliar na compreensão da distribuição destas tensões (Queiroz et al., 2016).

As equações apresentadas abaixo foram utilizadas por Riddington et al. (1978) e Davies et al. (1977) para o cálculo da rigidez relativa. Percebe-se que, altos valores para este parâmetro implicam em vigas flexíveis em relação as paredes, enquanto que baixos valores indicam vigas mais rígidas. Além disso, as zonas de separação são maiores em sistemas onde apresentam vigas flexíveis. Logo, quanto maior a zona de separação, maior a concentração de tensões na parede, e menor a parcela de carga vertical transmitida para a viga no meio do vão, o que intensificará o efeito arco.

$$R_1 = \sqrt[4]{\frac{E_p \cdot t \cdot l^3}{E_v \cdot I_z}} \quad (1)$$

$$R_2 = \sqrt[4]{\frac{E_p \cdot t \cdot h^3}{E_v \cdot I_z}} \quad (2)$$

Em que,  $R_1$  é a rigidez relativa proposta por Riddington et al. (1978),  $R_2$  é a rigidez relativa proposta por Davies et al. (1977),  $E_p$  é o módulo de elasticidade longitudinal da parede,  $t$  é a espessura da parede,  $E_v$  é o módulo de elasticidade longitudinal da viga,  $I_z$  é a inércia da viga,  $h$  é a altura da parede e  $l$  é o comprimento da parede.

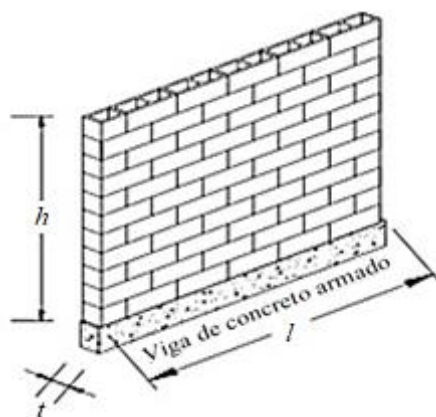
## 2 METODOLOGIA

Para o procedimento de simulação numérica foram empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos (MEF), por meio do software Diana® v. 9.3 (abreviação para Displacement Analyzer). Esta ferramenta utiliza rotinas pré-definidas de trabalho que exibem detalhadamente o comportamento de uma estrutura. Em conjunto com este programa, também foram utilizadas planilhas eletrônicas para o dimensionamento dos painéis e exibição dos dados obtidos.

### 2.1 Geometria dos painéis

A representação computacional dos modelos estudados teve início com a determinação geométrica do problema. Foram gerados vinte e quatro modelos diferentes para análise, onde estes são constituídos por uma parede de alvenaria, uma junta argamassada e uma viga de concreto armado com dois apoios nas extremidades, sendo um de primeiro e outro de segundo gênero.

Os painéis de alvenaria foram dimensionados com altura de 280 cm e espessura de 15 cm, porém seu comprimento foi variável entre os diferentes grupos de modelos. A viga bi apoiada, responsável por suportar a alvenaria, também teve sua geometria alternada, sendo que sua ligação com o painel se deu por meio de uma junta argamassada com espessura nula, satisfazendo o elemento finito de ligação destas peças. O modelo geométrico dos painéis pode ser visto na Fig. 2.



**Figura 2. Geometria do painel.**

Os resultados foram divididos em quatro grupos para análise, compostos por seis modelos computacionais distintos. Os grupos se distinguem quanto ao comprimento da parede, e os modelos de cada grupo se diferenciam quanto a geometria da viga de suporte. Nas Tabelas 1 e 2 são exibidas as variações geométricas às quais os modelos numéricos foram condicionados. Tal diversificação foi necessária para apresentar, por meio de combinações entre vigas e paredes, a mudança de rigidez relativa das amostras.

De fato, a observação de estudos predecessores mostrou que a condição de flexibilidade da viga em relação a parede, influencia diretamente a ocorrência do efeito arco, como descrevem Riddington et al. (1978) e Davies et al. (1977). Assim, foram caracterizados um total de vinte e quatro modelos distintos.

Tabela 1. Seção transversal das vigas.

| Seção das vigas |          |          |
|-----------------|----------|----------|
| Item            | $h$ (cm) | $b$ (cm) |
| V1              | 20       | 15       |
| V2              | 30       | 15       |
| V3              | 40       | 15       |
| V4              | 40       | 20       |
| V5              | 60       | 20       |
| V6              | 80       | 20       |

Tabela 2. Dimensões das Paredes de alvenaria.

| Dimensões das Paredes |         |         |          |
|-----------------------|---------|---------|----------|
| Item                  | $h$ (m) | $l$ (m) | $t$ (cm) |
| PAR1                  | 2.8     | 2.0     | 15       |
| PAR2                  | 2.8     | 4.0     | 15       |
| PAR3                  | 2.8     | 6.0     | 15       |
| PAR4                  | 2.8     | 8.0     | 15       |

## 2.2 Modelos numéricos

O método dos elementos finitos tem como principal estratégia de análise a discretização de um meio homogêneo em subdivisões com características idênticas. Estes elementos possuem seu comportamento descrito por equações diferenciais, sendo que o somatório de ações de cada elemento compõe, de forma geral, o comportamento da estrutura. Conforme descrito em um trabalho clássico (Yuan et al, 1985), existem três métodos para a modelagem de paredes estruturais empregando processos discretos: modelos de barras equivalentes, modelos de múltiplas barras verticais e modelos com elementos finitos planos.

O método de elementos finitos planos foi utilizado neste trabalho, para que através do procedimento de micro modelagem simplificada e macro modelagem, fosse compreendido o comportamento da interface entre a viga de concreto armado e o painel de alvenaria, unidos por junta argamassada. Na Figura 3 pode ser visto um modelo genérico dos painéis discretizados neste trabalho.

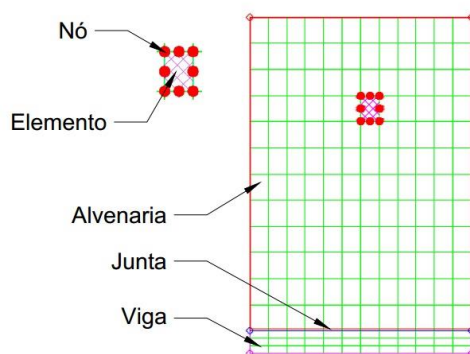


Figura 3. Modelo genérico de malha.

Para a geração da malha de elementos finitos, assim como feito por Mata (2011), definiu-se o elemento finito bidimensional isoparamétrico de estado plano de tensões e formato quadrilátero CQ16M para representar as unidades, sendo que este elemento, que pode ser visto na Fig. 4-a, possui 8 nós e 2 graus de liberdade nodal (representando as translações nas direções  $x$  e  $y$ ) com função de interpolação quadrática. Para a modelagem da junta horizontal entre a alvenaria e a viga foi utilizado o elemento de interface quadrático do tipo CL12I, que possui 6 nós, cada um com 2 graus de liberdade (representando as translações em  $x$  e  $y$ ), função de interpolação quadrática e espessura nula, sendo visto na Fig. 4-b. (TNO, 2016).

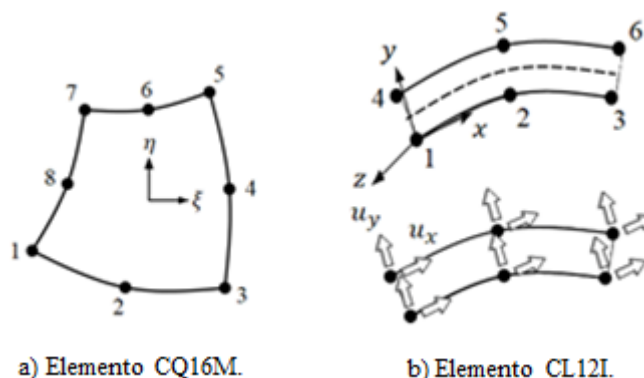


Figura 4. Elementos finitos adotados na modelagem numérica.

## 2.3 Procedimento de cálculo

Após a modelagem numérica, foi extraído do nó central da face inferior da viga de cada modelo, a deflexão vertical máxima apresentada. Em seguida, utilizou-se a Eq. (1) para a determinação do momento equivalente a tal deflexão, sendo ela adaptada a partir da equação da linha elástica:

$$M_n = f_n \left( \frac{48 \cdot E_v \cdot I_z}{5 \cdot l^2} \right) \quad (3)$$

Em que,  $M_n$  é o momento fletor obtido a partir da modelagem numérica,  $f_n$  é a flecha numérica dos modelos,  $E_v$  é o módulo de elasticidade da viga,  $l$  é o comprimento da viga e  $I_z$

refere-se à inércia da viga suporte. Posteriormente, foi feita a comparação entre o momento fletor advindo da análise numérica ( $M_n$ ) com o momento elástico ( $M_e$ ) obtido pelas equações clássicas da literatura técnica. Uma vez feita tal comparação, a razão entre os momentos flectores forneceu uma constante ( $k$ ) referente a superioridade numérica entre os dois termos.

### 3 RESULTADOS

A seguir, estão listados os dados obtidos a partir da modelagem numérica, entre o modelo com maior rigidez relativa e o modelo com menor rigidez de cada grupo. O intuito principal da modelagem foi a obtenção da flecha máxima para realizar a comparação entre o momento numérico ( $M_n$ ) e o momento elástico ( $M_e$ ) idealizado pela literatura. Além disso, as imagens dos modelos numéricos apresentados englobam apenas os painéis de alvenaria, pois as tensões atuantes nas vigas foram superiores às que atuam nos painéis, fato que impossibilita a observação da formação do arco.

#### 3.1 Grupo PAR1 (2800 mm × 2000 mm)

Para as simulações dos seis exemplares do grupo PAR1 foram consideradas apenas quatro, pois os modelos PAR1-V5 e PAR1-V6 exibiram resultados numéricos para a flecha superiores aos fornecidos pela equação da linha elástica. Provavelmente, a alta rigidez dos dois últimos modelos de viga fez com que estas deixassem de se comportar como elementos de barra, abandonando a hipótese de Bernoulli. Além disso, a energia de deformação não seria causada, em sua maioria, pelo momento atuante e passaria a depender de maneira mais acentuada dos esforços cortantes.

A Figura 5 apresenta o gráfico com a variação dos valores referentes ao momento fletor dos modelos numéricos ( $M_n$ ), devido a constante  $k$ . É nítido que a ocorrência do efeito arco impacta diretamente sobre os valores dos esforços, pois o momento atuante é reduzido.

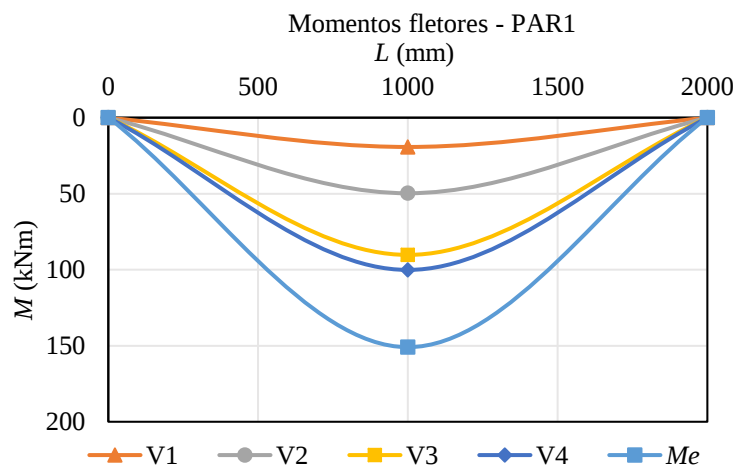
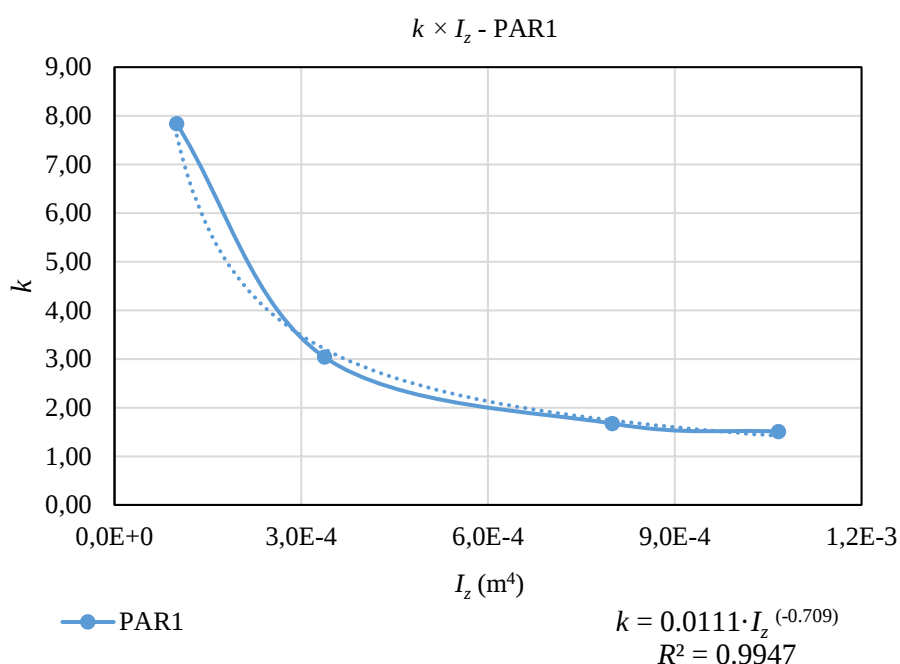


Figura 5. Comparação entre os momentos numérico e elástico atuantes no grupo PAR1

Neste grupo, o modelo PAR1-V1 foi o que apresentou a maior redução de  $M_e$  ( $k=8$ ), pois este é o modelo que apresenta o maior valor de rigidez relativa entre a viga e a parede, sendo que o valor do momento numérico ( $M_n$ ) no vão central da viga equivale a 19.26 kNm.

Já o modelo PAR1-V4 que possui o elemento de suporte mais rígido deste grupo, apresenta uma constante  $k$  equivalente a 1.5 - uma redução do momento  $M_e$  em uma vez e meia – possuindo momento numérico ( $M_n$ ) equivalente a 100.12 kNm. Na comparação com o  $M_e$  – que neste caso equivale a 150.93 kNm – representam, respectivamente, apenas 13% e 66% deste.

Adiante, a Figura 6 apresenta o gráfico que denota a variação do parâmetro  $k$  em decorrência da variação de inércia da viga. Caracteriza-se também, a equação da curva originada pelo conjunto.



**Figura 6. Gráfico dos valores do parâmetro  $k$  ( $I_z$ ).**

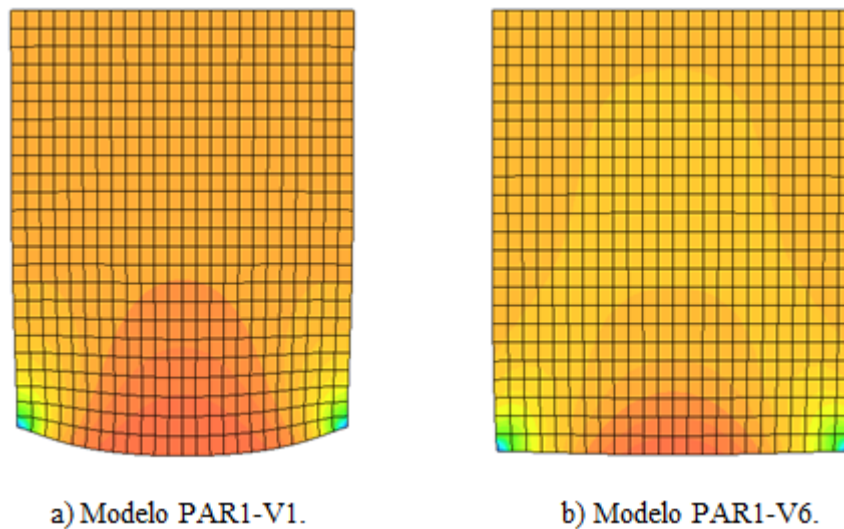
Observa-se que, quanto mais alto é o valor da inércia das vigas, menor é o fator  $k$ , fato pelo qual maiores esforços são absorvidos por ela e, em contrapartida, a influência do efeito arco é reduzida. Isso pode ser constatado comparando-se as flechas obtidas pelo software com as teóricas, nas quais a viga é tratada como uma barra simples, conforme visto na Tabela 3.

Tabela 3. Deslocamentos verticais para o grupo PAR1

| Vigas | Flecha (mm) |          |
|-------|-------------|----------|
|       | Elástica    | Numérica |
| V1    | 18.7        | 2.4      |
| V2    | 5.5         | 1.8      |
| V3    | 2.3         | 1.4      |
| V4    | 1.8         | 1.2      |

Nota-se que quanto mais rígida é a viga em que a parede PAR1 está assente, menor é a sua deflexão vertical e mais próximo é o seu comportamento junto ao que é proposto pela equação da linha elástica.

Como ilustração dos resultados apresentados acima, seguem as imagens dos modelos numéricos, com a definição da malha e espectro de tensões, além da deformação do painel. Foram escolhidos os modelos mais representativos, ou seja, correspondentes à viga de suporte mais flexível (V1) e a mais rígida (V6).



**Figura 7. Tensões verticais atuantes no painel de alvenaria.**

Nota-se que a formação do arco é nitidamente mais presente no primeiro modelo, isto já era esperado, pois conforme relatos de Davies et al. (1977) e Riddington et al. (1978), sistemas com vigas mais flexíveis (consequentemente altos valores de rigidez relativa) tem os esforços em sua maioria suportados pela parede de alvenaria, sendo estes transmitidos de forma acentuada aos apoios. Além disso, conforme relatado por Wood (1952), a tendência da viga nesses casos é de suportar maiores esforços de tração e se comportar como um tirante.

Por outro lado, a medida em que a rigidez relativa diminui em decorrência de vigas mais rígidas, os esforços passam a ser transferidos com maior uniformidade e a concentração de tensões na região dos apoios é aliviada, como relatam Davies et al. (1977).

### 3.2 Grupo PAR2 (2800 mm × 4000 mm)

Neste grupo apresenta-se a primeira variação no comprimento da parede. Nele são aplicadas as mesmas combinações realizadas com os modelos geométricos de vigas já apresentadas. O aumento do comprimento dos painéis e das vigas suporte provoca maior flexibilidade à esta última.

Analisando o gráfico de momentos presente na Fig. 8 e comparando-o com os resultados apresentados pelos modelos anteriores, nota-se uma menor variação dos valores entre os resultados. Porém, os momentos numéricos ( $M_n$ ) continuam inferiores aos elásticos.

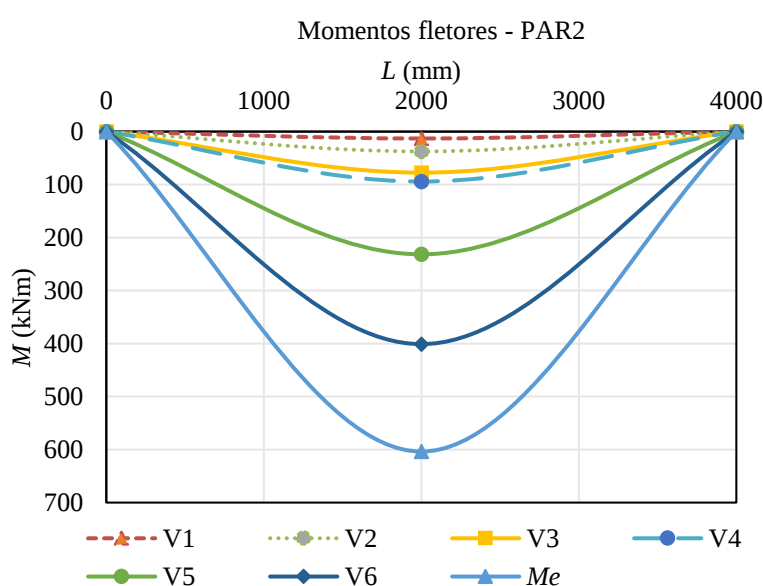
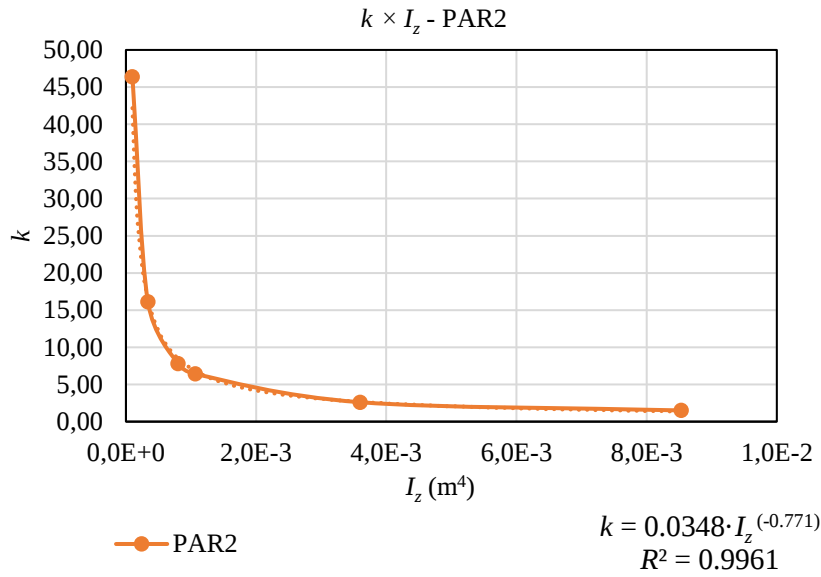


Figura 8. Comparação entre os momentos numérico e elástico, atuantes no grupo PAR2

Para este grupo, o momento fletor  $M_e$  foi equivalente a 603.70 kNm. Já o modelo de viga mais flexível (V1), apresenta um momento numérico ( $M_n$ ) igual a 13.02 kNm, enquanto que a viga mais rígida (V6), apresenta um momento equivalente a 401.01 kNm. Tais dados representam respectivamente, 2% e 66% do momento elástico.

Como apresentado nos modelos anteriores, o gráfico da constante  $k$  presente na Fig. 9 exibe o mesmo comportamento diante do aumento da inércia  $I_z$ . Além disso, a medida que se aumenta a altura das vigas, os valores deste parâmetro são reduzidos e, conseqüentemente, os dados encontrados para os momentos fletores também sofrem alterações. O modelo mais flexível apresenta um parâmetro  $k$  equivalente a 46.38 enquanto que o modelo mais rígido apresenta um parâmetro  $k$  equivalente a 1.52.



**Figura 9. Gráfico dos valores do parâmetro  $k$  ( $I_z$ ).**

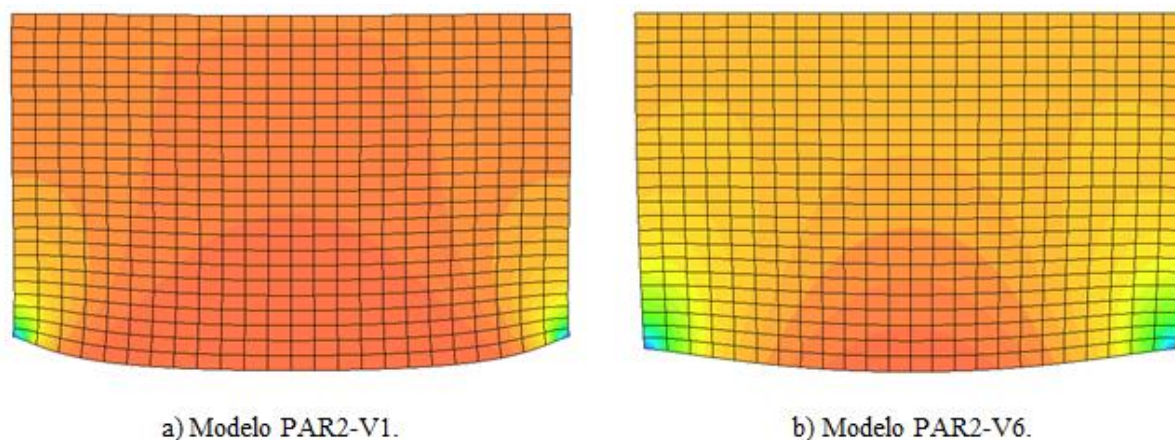
Para os seis modelos deste grupo, os valores de deflexão vertical referentes a linha elástica foram maiores que os valores do grupo PAR1. Porém, a tendência de proximidade destes com os valores numéricos, ainda se mantêm. Conforme visto na Tabela 4.

**Tabela 4. Deslocamentos verticais para o grupo PAR2**

| Vigas | Flecha (mm) |          |
|-------|-------------|----------|
|       | Elástica    | Numérica |
| V1    | 299.546     | 6.457    |
| V2    | 88.728      | 5.505    |
| V3    | 37.432      | 4.802    |
| V4    | 28.074      | 4.380    |
| V5    | 8.318       | 3.191    |
| V6    | 3.509       | 2.331    |

Com base na análise do gráfico, é evidente a influência da variação de comprimento sobre o comportamento das vigas. O modelo mais flexível do grupo PAR1 possui extensão de 2.0 m e deflexão prevista – segundo a equação da flecha máxima – no valor de 18.716 mm. Já o primeiro modelo deste grupo (PAR2), com o dobro de comprimento, apresentou um aumento de 280.744 mm no deslocamento vertical.

Abaixo seguem as imagens dos modelos numéricos, com a definição da malha e espectro de tensões, além da deformação do painel. Foram escolhidos os modelos mais representativos, ou seja, correspondentes à viga de suporte mais flexível (V1) e a mais rígida (V6).



**Figura 10. Tensões verticais atuantes no painel de alvenaria.**

Por análise das imagens, percebe-se que o comportamento é semelhante ao notado no grupo PAR1 havendo a formação do arco no painel e a transmissão de esforços para os apoios.

Porém, as solicitações do painel de alvenaria são mais exigentes, já que a duplicação do comprimento em relação a PAR1 torna as vigas mais flexíveis.

### **3.3 Grupo PAR3 (2800 mm × 6000 mm)**

Em seu trabalho Wood (1952) diz que a formação do arco obedece a relação de altura da parede e comprimento da viga ( $h/l$ ), igual ou superior a 0.6, enquanto que, para valores menores a este, as tensões de cisalhamento são elevadas e a região de conexão entre a viga e a parede pode ser desfeita.

Por outro lado, Smith et al. (1977) chegaram a um valor de 0.7 para esta relação. Além disso, conforme relatado por Medeiros (2015), para que este comportamento seja alterado, são necessários vãos superiores a quatro metros.

Entretanto, verifica-se que mesmo os modelos do presente grupo apresentando uma relação de altura da parede e comprimento da viga ( $h/l$ ) com valores distintos aos propostos pelos autores citados ( $h/l = 0.47$ ), não se nota a diferenciação quanto a influência do efeito arco no decréscimo dos valores de  $M_n$ . Conforme visto no gráfico presente na Fig. 11.

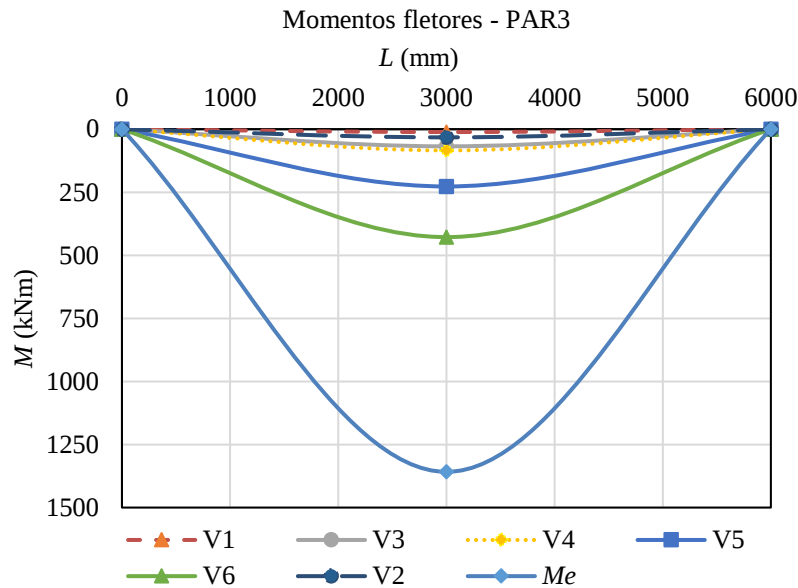


Figura 11. Comparação entre os momentos numérico e elástico, atuantes no grupo PAR3

A constante  $k$  também não apresentou alterações em seu padrão comportamental, possuindo valores decrescentes ao passo que as vigas se enrijeciam. Conforme visto no gráfico presente na Fig. 12.

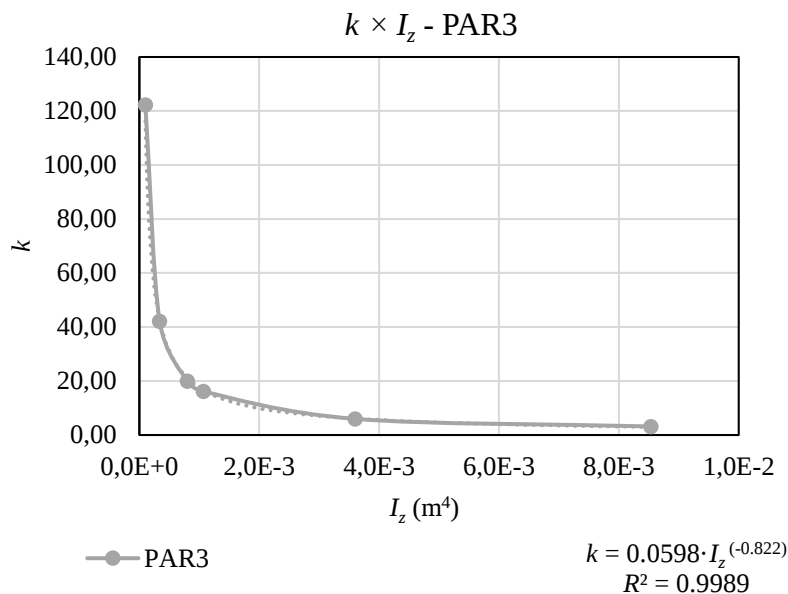


Figura 12. Gráfico dos valores do parâmetro  $k$  ( $I_z$ ).

A flecha teórica continuou assumindo valores extremamente altos, enquanto a numérica (assim como nos outros modelos) permaneceu dentro dos padrões limitantes pela norma ABNT NBR 6118 (2014). Conforme visto na Tabela 5.

Tabela 5. Deslocamentos verticais para o grupo PAR3

| Vigas | Flecha (mm) |          |
|-------|-------------|----------|
|       | Elástica    | Numérica |
| V1    | 1515.998    | 12.400   |
| V2    | 449.185     | 10.665   |
| V3    | 189.500     | 9.462    |
| V4    | 142.125     | 8.797    |
| V5    | 42.111      | 7.034    |
| V6    | 17.766      | 5.595    |

Abaixo seguem as imagens dos modelos numéricos, com a definição da malha e espectro de tensões, além da deformação do painel. Foram escolhidos os modelos mais representativos, ou seja, correspondentes à viga de suporte mais flexível (V1) e a mais rígida (V6).

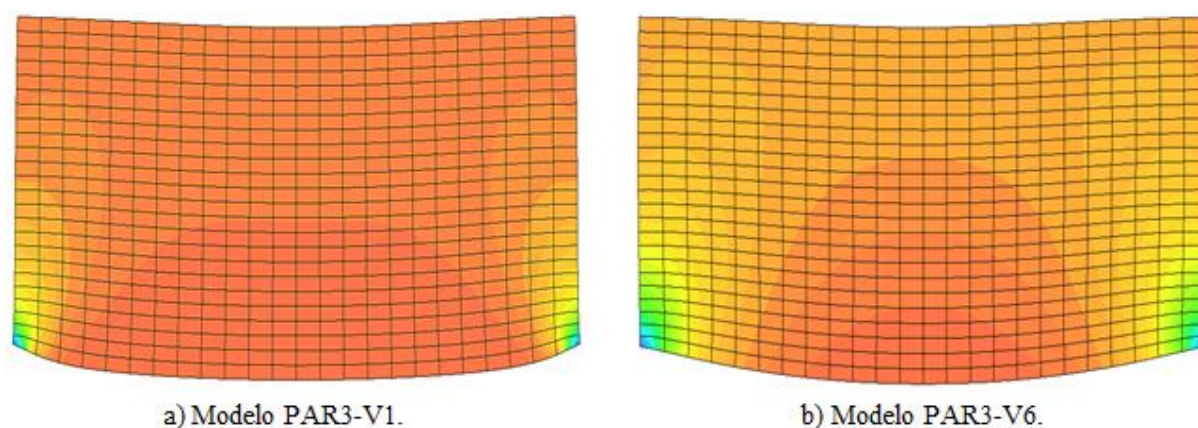


Figura 13. Tensões verticais atuantes no painel de alvenaria.

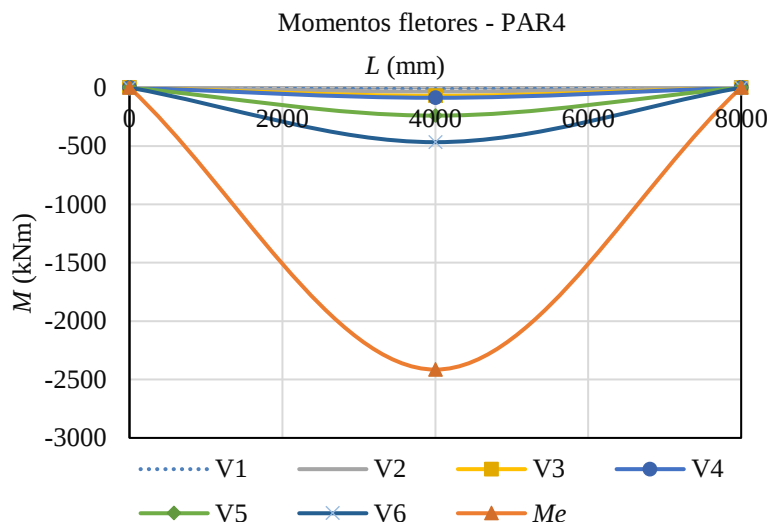
No que diz respeito a formação do arco e as tensões atuantes em paredes e vigas, não se notou alteração quanto ao comportamento. Os esforços verticais continuaram sendo transferidos para os apoios de forma acentuada nos modelos com vigas mais flexíveis, e de forma mais homogênea para os modelos com vigas mais rígidas.

### 3.4 Grupo PAR4 (2800 mm × 8000 mm)

Para o último grupo, a relação de altura da parede e comprimento da viga ( $h/l$ ) também apresentou valores inferiores aos que foram propostos por Wood (1952) e Riddington et al. (1978) para formação do arco. Entretanto, o comportamento dos modelos em relação aos

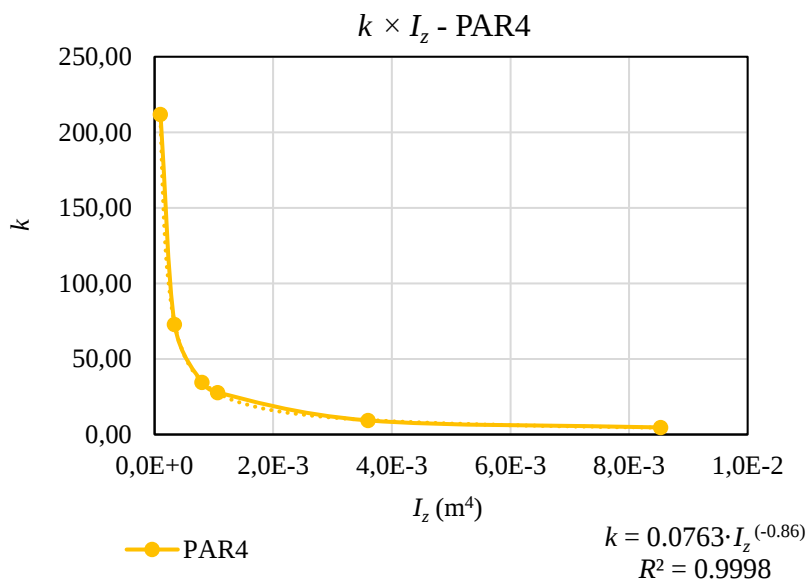
resultados dos momentos fletores, a constante  $k$  e a flecha, continuaram apresentando o mesmo padrão.

Além disso, devido a rigidez relativa alta do primeiro modelo, observou-se o maior coeficiente  $k$  de todo o trabalho, equivalente a 211.91. Conforme visto no gráfico presente na Fig. 14.



**Figura 14. Comparação entre os momentos numérico e elástico, atuantes no grupo PAR4**

Por análise do gráfico apresentado na Fig. 15 nota-se que o maior valor da constante  $k$ , é atribuído a inercia próxima a origem do gráfico, ou seja, pertencente a viga mais flexível do grupo. Já a viga mais rígida, continua fornecendo o menor valor para este parâmetro.



**Figura 15. Gráfico dos valores do parâmetro  $k$  ( $I_z$ ).**

A deflexão vertical fornecida pela equação da linha elástica neste conjunto foi a maior entre todos os modelos. Como a escolha dos painéis e vigas foi baseada principalmente em

características geométricas, valores assim já eram esperados, pois não se baseiam em parâmetros que tragam segurança na utilização dos aparelhos, e sim em modelos que poderiam fornecer dados para uma boa observação e estudo do efeito arco. Conforme visto na Tabela 6.

Tabela 6. Deslocamentos verticais para o grupo PAR3

| Vigas | Flecha (mm) |          |
|-------|-------------|----------|
|       | Elástica    | Numérica |
| V1    | 4791.302    | 22.610   |
| V2    | 1419.645    | 19.460   |
| V3    | 598.913     | 17.310   |
| V4    | 449.185     | 16.190   |
| V5    | 133.092     | 14.270   |
| V6    | 56.148      | 11.950   |

Analisando-se as imagens dos modelos, notou-se que a formação do arco ocorreu de forma mais branda, confirmando que a relação de altura da parede e comprimento da viga ( $h/l$ ) realmente interfere em sua formação, em acordo com os relatos de Wood (1952), Riddington et al. (1978) e Medeiros (2015).

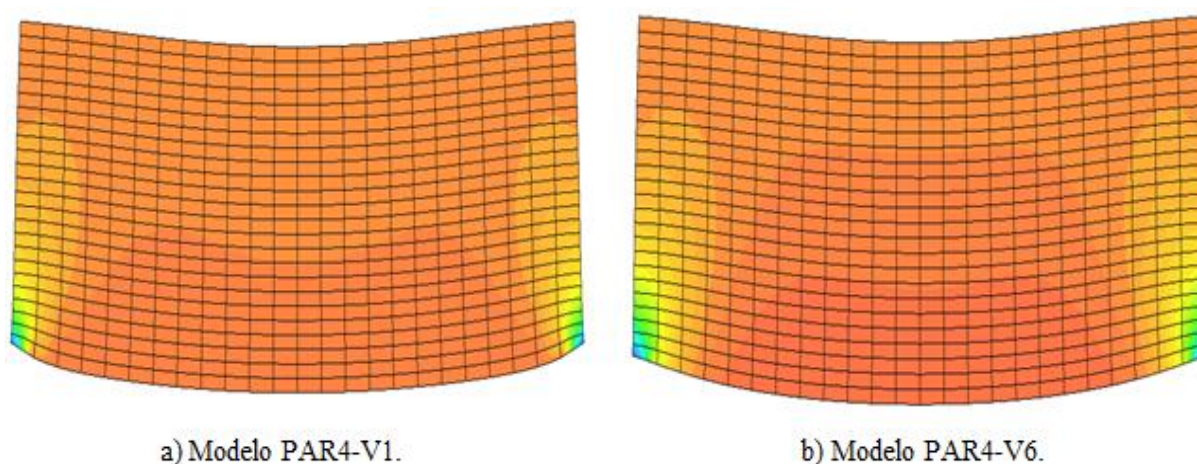


Figura 16. Tensões verticais atuantes no painel de alvenaria.

Na Tabela 07 apresentada abaixo, encontram-se os resultados obtidos com todos os modelos computacionais simulados.

Tabela 7. Resultados gerais dos modelos numéricos.

| Modelos | $N_d$<br>(kN) | Flecha (mm) |          | $I_z$ (m <sup>4</sup> ) | Constante $k$ | Momentos<br>(kNm) |          | Porcentagem<br>de $M_e$ (%) |
|---------|---------------|-------------|----------|-------------------------|---------------|-------------------|----------|-----------------------------|
|         |               | Númerica    | Elástica |                         |               | $M_n$             | $M_e$    |                             |
| PAR1-V1 | 603.704       | 2.389       | 18.716   | 1.00E-04                | 7.834         | 19.265            | 150.926  | 12.764                      |
| PAR1-V2 | 603.704       | 1.826       | 5.545    | 3.38E-04                | 3.037         | 49.696            | 150.926  | 32.928                      |
| PAR1-V3 | 603.704       | 1.399       | 2.34     | 8.00E-04                | 1.672         | 90.252            | 150.926  | 59.799                      |
| PAR1-V4 | 603.704       | 1.164       | 1.755    | 1.07E-03                | 1.507         | 100.123           | 150.926  | 66.339                      |
| PAR1-V5 | 603.704       | 0.711       | 0.52     | 3.60E-03                | -             | -                 | 150.926  | -                           |
| PAR1-V6 | 603.704       | 0.531       | 0.022    | 8.53E-03                | -             | -                 | 150.926  | -                           |
| PAR2-V1 | 1207.408      | 6.457       | 299.456  | 1.00E-04                | 46.377        | 13.017            | 603.704  | 2.156                       |
| PAR2-V2 | 1207.408      | 5.505       | 88.728   | 3.38E-04                | 16.118        | 37.456            | 603.704  | 6.204                       |
| PAR2-V3 | 1207.408      | 4.802       | 37.432   | 8.00E-04                | 7.795         | 77.447            | 603.704  | 12.829                      |
| PAR2-V4 | 1207.408      | 4.38        | 28.074   | 1.07E-03                | 6.41          | 94.188            | 603.704  | 15.602                      |
| PAR2-V5 | 1207.408      | 3.191       | 8.318    | 3.60E-03                | 2.607         | 231.59            | 603.704  | 38.362                      |
| PAR2-V6 | 1207.408      | 2.331       | 0.351    | 8.53E-03                | 1.505         | 401.007           | 603.704  | 66.424                      |
| PAR3-V1 | 1811.112      | 12.4        | 1515.998 | 1.00E-04                | 122.258       | 11.11             | 1358.334 | 0.818                       |
| PAR3-V2 | 1811.112      | 10.65       | 449.185  | 3.38E-04                | 42.177        | 32.206            | 1358.334 | 2.371                       |
| PAR3-V3 | 1811.112      | 9.462       | 189.5    | 8.00E-04                | 20.027        | 67.824            | 1358.334 | 4.993                       |
| PAR3-V4 | 1811.112      | 8.797       | 142.125  | 1.07E-03                | 16.156        | 84.076            | 1358.334 | 6.19                        |
| PAR3-V5 | 1811.112      | 7.034       | 42.111   | 3.60E-03                | 5.987         | 226.889           | 1358.334 | 16.703                      |
| PAR3-V6 | 1811.112      | 5.595       | 1.777    | 8.53E-03                | 3.175         | 427.786           | 1358.334 | 31.493                      |
| PAR4-V1 | 2414.816      | 22.61       | 4791.302 | 1.00E-04                | 211.911       | 11.395            | 2414.816 | 0.472                       |
| PAR4-V2 | 2414.816      | 19.46       | 1419.645 | 3.38E-04                | 72.952        | 33.101            | 2414.816 | 1.371                       |
| PAR4-V3 | 2414.816      | 17.31       | 598.913  | 8.00E-04                | 34.599        | 69.794            | 2414.816 | 2.89                        |
| PAR4-V4 | 2414.816      | 16.19       | 449.185  | 1.07E-03                | 27.745        | 87.037            | 2414.816 | 3.604                       |
| PAR4-V5 | 2414.816      | 13.22       | 133.092  | 3.60E-03                | 10.067        | 239.864           | 2414.816 | 9.933                       |
| PAR4-V6 | 2414.816      | 10.86       | 56.148   | 8.53E-03                | 5.17          | 467.067           | 2414.816 | 19.342                      |

## 4 CONCLUSÃO

Foram apresentadas as análises referentes aos painéis de alvenaria apoiados em vigas de concreto armado. Essas possibilitaram a obtenção de esforços verticais, flechas e momentos fletores para o melhor entendimento do comportamento interativo destes elementos.

Observou-se que o efeito arco pode provocar um alívio das tensões verticais ao longo do vão das vigas, causando a concentração desses esforços nos apoios. Tal alívio também se estende ao momento fletor que atua no centro das vigas, o que se opõe diretamente aos métodos e esforços considerados atualmente no dimensionamento dessas estruturas.

A norma ABNT NBR 15961 (2011) ainda não se atenta as mudanças causadas por esse fenômeno, apesar de relatar sua existência e deixar claro que caso seja considerado, deve-se levar em conta todas as variáveis envolvidas no sistema. Logo, estruturas de alvenaria estrutural sob pilotis em concreto armado solicitam esforços inferiores aos que realmente suportariam, pois, as vigas com apoios discretos podem ser superdimensionadas, o que onera os custos de empreendimentos.

Portanto, é necessário que existam mais debates e estudos a respeito do tema, já que atualmente o campo da engenharia dispõe de variadas ferramentas para a melhor compreensão do fenômeno. Também é essencial que se discuta, de maneira ampla, a utilização de métodos numéricos para verificações estruturais, já que podem fornecer dados de maneira rápida e eficaz, possibilitando a concepção de estruturas mais econômicas e precisas.

## REFERÊNCIAS

- NBR 15961-1: Alvenaria estrutural- Blocos de concreto. Parte 1: Projeto., 2011. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, 42p.
- NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento., 2014. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, 238p.
- Barbosa, P. C., 2000. *Interação entre paredes de alvenaria estrutural e vigas de concreto armado*. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo/São Carlos.
- Carvalho, J. D. N., 2007. *A contribuição de enrijecedores laterais para o efeito arco na alvenaria estrutural*. Dissertação (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina/Florianópolis.
- Davies, S. R. & Ahamed, A. E., 1977. An approximate method for analysing composite walls/beams. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Load-Bearing Brickwork*. British Ceramic Society, p. 305-320.
- Yuan, L. N.; Shuo, F. M.; Bin, S. G. & Bin, M. T., 1985. The behavior and strength of brick and reinforced concrete composite wall beams. In Neilly, T. M. & Scrivener, J. C., eds, *Seventh International Brick/Block Masonry Conference*. Melbourne. p.1101-1111.
- Mata, R. C., 2011. *Análise experimental e numérica do comportamento de junta em painéis de contraventamento de alvenaria estrutural*. 2011. Dissertação (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo/São Carlos.

Medeiros, K.A.S., 2015. *Modelagem Computacional para Avaliação da Interação entre Painéis de Alvenaria e Estrutura de Suporte em Concreto Armado*. 106p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte/Natal.

Paes, M. S., 2008. *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), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo/São Carlos.

Pereira, J. L., 2016. Entenda o efeito de arco em paredes de alvenaria. *Revista Técnica*, nº 233.

Queiroz, B. M. & Oliveira, L. P., 2016. *Estudo do efeito arco no comportamento de painéis de alvenaria estrutural sob pilotis*. Dissertação (Graduação), Pontifícia Universidade Católica de Goiás/Goiânia.

Riddington, J. R. & Smith, B. S., 1978. Composite method of desing for heavily loaded wall-beam structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 1*, vol. 64, p. 137-151.

Smith, B. S. & Riddington, J. R., 1977. The composite behavior of elastic wall-beam systems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 2*. vol. 63, p. 377-391.

TNO Building and Construction Research, 2016. Diana User's Manual - Material Library. Diana Release 8.1.2., Delft.

Wood, R.H., 1952. Studies in composite construction. Part 1: The composite action of brick panel walls supported on reinforced concrete beams. *Her Majesty's Stationery Office: National Building Studies, Research Paper*. n. 13, 25p.