

## **ANÁLISE DOS EFEITOS DA EXCENTRICIDADE DA REAÇÃO DA LAJE SOBRE AS PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL**

**Manoel Ignácio Xavier Filho**

**Jean Marie Désir**

*engmanoelxavier@gmail.com*

*jean.maria@ufrgs.br*

*Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS*

*Avenida Osvaldo Aranha, 99, CEP: 90035-190, Rio Grande do Sul, Brasil*

**Samir Maghous**

*Samir.maghous@ufrgs.br*

*Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS*

*Avenida Osvaldo Aranha, 99, CEP: 90035-190, Rio Grande do Sul, Brasil*

**Abstract.** In the context of the structural masonry system, design of most current building works involve empirical-based procedures acquired from the engineering practice and transmission from constructor-to-constructor. This kind of approach has revealed suitable as far as small or medium buildings are concerned, and no structural pathologies have been associated with such design methods. The current standards recommend the use of global safety coefficients to cover all the uncertainties that are not dealt with in detail. It is the case of the reaction efforts exerted by the slabs on the walls in structural masonry, which are generally treated as linear load applied along the average plane of the wall. This simplification may lead to uncontrolled approximations in the design the structural elements since it does not account for the wall out-plane bending moment, nor the twisting moment that can possibly arise along the wall supporting beam. This contribution aims at investigating the relevance of considering or not such efforts by analyzing the connection between slabs, walls and beams in a structural masonry building. Emphasis is given to the way the loads are transferred and verifying the limits arising from application of the recommendations of the Brazilian standard regarding the effect of the eccentricity. At that respect, a study case is studied by means of simplified normative approaches as well as by finite element simulations to support the analysis conclusions.

**Keywords:** structural masonry, slab-masonry wall reaction, slab-masonry wall tie.

## 1 Introdução

Atualmente no Brasil, o crescimento da demanda por projetos estruturais de edificações em alvenaria estrutural, associado a um patamar de alturas continuamente maior, exigem uma análise mais refinada para seu dimensionamento. Estruturas concebidas sob o sistema de alvenaria estrutural geram um conjunto de vantagens, das quais é possível destacar a diminuição de área de fôrmas a serem utilizadas, a redução do uso de aço e a limpeza e simplificação do canteiro de obras.

Os métodos de cálculos existentes no Brasil, baseados nas normas Brasileiras ABNT NBR 15961-1 [1] e ABNT NBR 15812-1 [2] referentes a estruturas de alvenaria estrutural com blocos de concreto e com blocos cerâmicos respectivamente. Com o intuito de agilizar os cálculos e tornar o processo de dimensionamento de uma estrutura de alvenaria estrutural mais sistemático, estas normas consideram que as reações das lajes sobre as paredes de alvenaria estrutural são descarregadas no eixo do plano longitudinal, fazendo assim, as cargas se propagarem de maneira direta não gerando solicitações fora do plano. Este procedimento é convidativo para os projetistas de outras técnicas de construção que decidirem adotar a alvenaria estrutural em algumas de suas obras.

O presente trabalho tem por objetivo formular uma abordagem mais racional para o dimensionamento da alvenaria estrutural não armada, baseando-se em métodos de cálculo que buscam incorporar de maneira mais precisa a distribuição dos esforços definindo a reação da laje sobre a parede de alvenaria estrutural. Para isso foram utilizadas bibliografias específicas sobre o tema que abordam diferentes métodos de cálculo, estes por sua vez, propõem uma distribuição da reação das lajes sobre as paredes de alvenaria estrutural de maneira excêntrica, o que ocasiona um momento fletor na cabeça (no topo) e também no pé (na base) da parede gerando solicitações fora do plano de simetria e que, dependendo do número de pavimentos e vãos de cada laje que descarrega sobre a parede, pode vir a ocasionar um momento torçor na viga de embasamento (baldrame ou pilotis) e que nos dimensionamentos atuais não estão sendo considerados.

Neste contexto, o presente trabalho investiga a natureza destas solicitações atuantes fora do plano de simetria da parede e analisar, até que ponto, estes esforços podem ser prejudiciais ao dimensionamento da estrutura no momento em que não são considerados nos cálculos de acordo com as normas atuais vigentes no país.

## 2 Abordagens simplificadas

Graubner [3] propôs para a determinação simples e manual das tensões de flexão que ocorrem na ligação de laje-parede de alvenaria, dois métodos a serem utilizados. O primeiro método chamado de Regra de 5%, conhecida da norma Alemã DIN 1053-1 [4], permite uma determinação simplificada e rápida dos momentos do nó. Esta regra não está formalmente incluída na norma Alemã DIN EN 1996-1-1/NA [5], que é a responsável pelos projetos de estruturas de alvenaria. No entanto, de acordo com os autores, pode continuar a ser usada como uma regra de técnica geralmente aceita para lajes com carga útil  $q_k \leq 5,0 \text{ kN/m}^2$ . O segundo método, este mais preciso se comparado ao primeiro, refere-se ao anexo C da norma DIN EN 1996-1-1/NA [5]; neste é incluído um processo baseado no método Cross-Kani (método de redistribuição de momentos) conhecido, com o qual os momentos do nó podem ser determinados em um sistema de quadro simplificado.

No método de cálculo mais preciso, além dos momentos de flexão da restrição da laje na parede, as tensões decorrentes de cargas de vento externas devido ao vento também devem ser levadas em consideração diretamente de acordo com Graubner [3].

Hendry, et al [6], formularam diferentes suposições simplificadoras levando a diferentes métodos de cálculo. O mais simples é o método aproximado dado na norma Inglesa BS 5628 [7], enquanto um valor mais preciso pode ser obtido usando uma análise de quadros.

### 2.1 Regra dos 5% (Norma DIN 1053-1)

Esta norma propõe uma Regra de 5% onde o centro de força de suporte do teto  $N_{De}$  pode ser assumido como sendo 5% da extensão adjacente  $L_3$  para nós de parede externa de acordo com Graubner

[3]. No caso de nós internos, 5% da diferença entre os tamanhos de extensão adjacentes ( $L_3 - L_4$ ) devem ser levados em consideração como o centro de carga conforme mostra a Fig. 1 abaixo. As forças longitudinais  $N_{oben}$ , referente a parede acima do nó, podem ser aplicadas centralmente. Em geral, essa abordagem simplificada resulta nas excentricidades das forças normais representada na Fig. 2 a seguir.

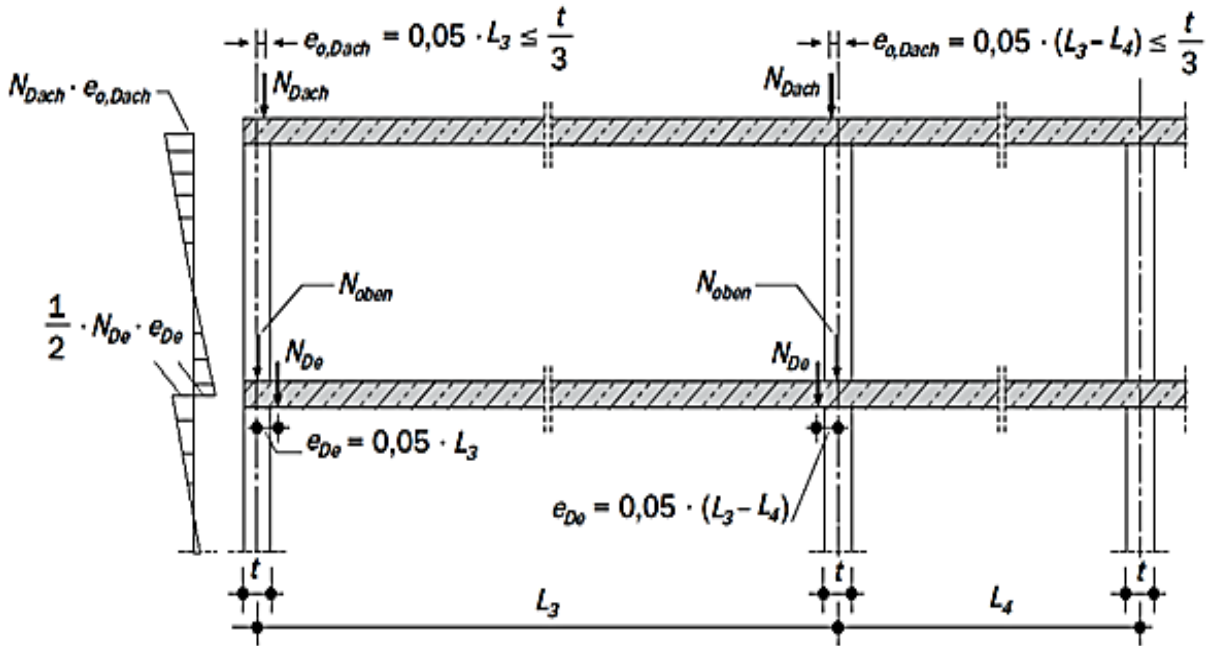


Figura 1. Momentos e forças atuantes no nó laje-parede – Regra dos 5%. (Adaptado de Graubner [3]).

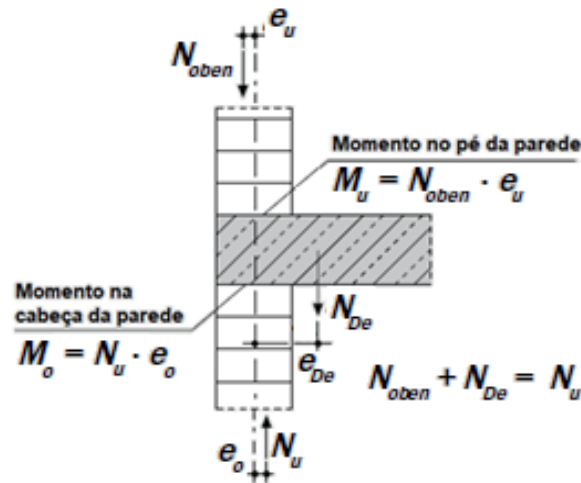


Figura 2. Detalhe das forças no nó laje-parede – Regra dos 5%. (Adaptado de Graubner [3]).

## 2.2 Método de Cálculo Alternativo (Norma DIN EN 1996-1-1/NA)

De acordo com Graubner [3], o método de cálculo mais rigoroso contido na norma DIN EN 1996-1-1/NA [5] possibilita uma utilização mais econômica da alvenaria não armada, uma vez que as propriedades da alvenaria e o comportamento da construção estão mais intimamente relacionados aos esforços reais laje-parede. Isso, por sua vez, resulta em possíveis contenções de material e ganhos espaciais. A demanda para resultados mais econômicos dos métodos de cálculo pode assim ser levada em consideração aplicando o método de cálculo alternativo. Este método de cálculo pode ser usado além, ou em vez, do dimensionamento simplificado dentro de componentes individuais, bem como para projéteis individuais ou estruturas inteiras.

O cálculo dos momentos de flexão  $M$  que ocorrem na parede podem ser simplificados. Para este fim, as forças de corte são determinadas no nó da ligação laje-parede, que é formado pelo encontro da laje com as paredes superiores e inferiores e é considerado como parte de um sistema de armação. O comprimento do teto se estende até o nó adjacente, as seções de parede sobre a altura da parede e as extremidades das hastes são definidas como engastes ou como apoio duplo, conforme Graubner [1].

Para Hurez et al [8] é possível determinar mais precisamente o momento no topo  $M_o$  ou no pé  $M_u$  da parede de acordo com este segundo método. Os momentos são então dados pela Eq. (1) a seguir:

$$M = \eta \cdot \frac{\frac{n_1 \cdot E_1 \cdot I_1}{h_1}}{\frac{n_1 \cdot E_1 \cdot I_1}{h_1} + \frac{n_2 \cdot E_2 \cdot I_2}{h_2} + \frac{n_3 \cdot E_3 \cdot I_3}{\ell_3} + \frac{n_4 \cdot E_4 \cdot I_4}{\ell_4}} \cdot \left( \frac{q_3 \cdot \ell_3^2}{4(n_3 - 1)} - \frac{q_4 \cdot \ell_4^2}{4(n_4 - 1)} \right) \quad (1)$$

onde:

- $\eta$  - Fator de redução do momento fletor.
- $n_i$  - Fator de rigidez da barra  $i$ .  
 $n = 3$  com barras articuladas na extremidade distante (por exemplo, parede externa).  
 $n = 4$  com hastes engastadas na extremidade distante (por exemplo, parede interna).
- $E_i$  - Módulo de elasticidade da barra  $i$ .
- $I_i$  - Momento de inércia da barra  $i$ .
- $h_1$  - Altura livre da parede analisada.
- $h_2$  - Altura livre da parede acima ou abaixo.
- $\ell_3, \ell_4$  - Vão livre das lajes adjacentes a esquerda e a direita.
- $q_3$  - carga de projeto uniformemente distribuída da barra 3 ao aplicar os fatores de segurança parciais para efeitos desfavoráveis.
- $q_4$  - carga de projeto uniformemente distribuída da barra 4 ao aplicar os fatores de segurança parciais para efeitos desfavoráveis.

As alturas  $h_1$  e  $h_2$ , assim como as características correspondentes das paredes, que devem ser consideradas para o cálculo dos momentos  $M_o$  e  $M_u$  estão definidos na Fig. 3.

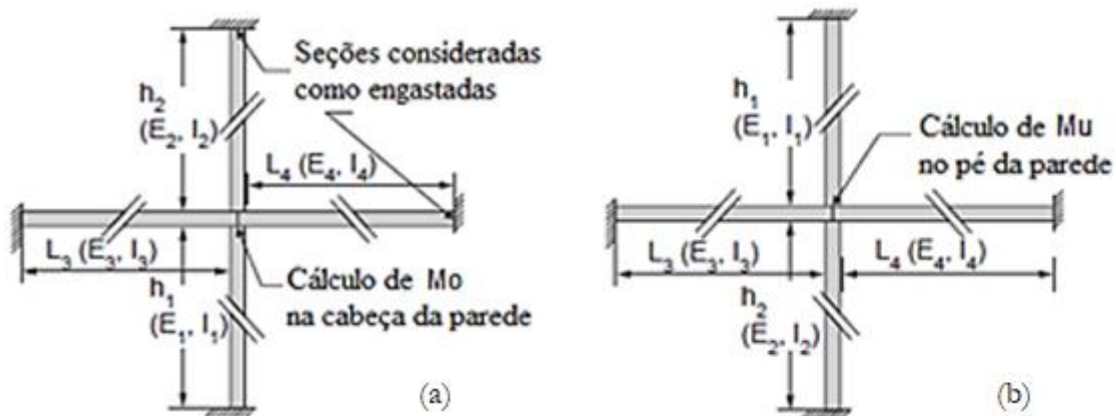


Figura 3. Definição das alturas  $h_1$  e  $h_2$  para o cálculo dos momentos fletores. (a) Cálculo do momento no topo da parede; (b) Cálculo do momento no pé da parede. (Adaptado de HUREZ et al [8]).

O fator de redução  $\eta$ , indicado na Eq. (1), é considerado conforme a Eq. (2) abaixo:

$$\eta = \max \left( 1 - 0,25 \cdot \frac{\frac{n_3 \cdot E_3 \cdot I_3}{\ell_3} + \frac{n_4 \cdot E_4 \cdot I_4}{\ell_4}}{\frac{n_1 \cdot E_1 \cdot I_1}{h_1} + \frac{n_2 \cdot E_2 \cdot I_2}{h_2}}; 0,5 \right) \quad (2)$$

### 3 Estudo de caso

No intuito de evidenciar o efeito da excentricidade das reações da laje sobre as paredes de alvenaria

e verificar a amplitude do momento torçor atuante na viga de transição no embasamento da estrutura de alvenaria, será utilizada uma edificação já executada e que teve seu dimensionamento baseado na transmissão das cargas provenientes das reações das lajes aplicadas no eixo da parede. Trata-se de uma obra de alvenaria estrutural com blocos de concreto tendo 11 pavimentos tipo, com 35,62 x 17,67 m de dimensões globais em planta baixa, mais o ático, sendo todos os pavimentos executados com lajes maciças. A ligação da estrutura de alvenaria com 2 subsolos se dá através de vigas de transição no pavimento térreo. A modulação do pavimento tipo e o corte esquemático da edificação com a indicação do pé-direito, em metros, estão representados pela Fig. 4 a seguir:

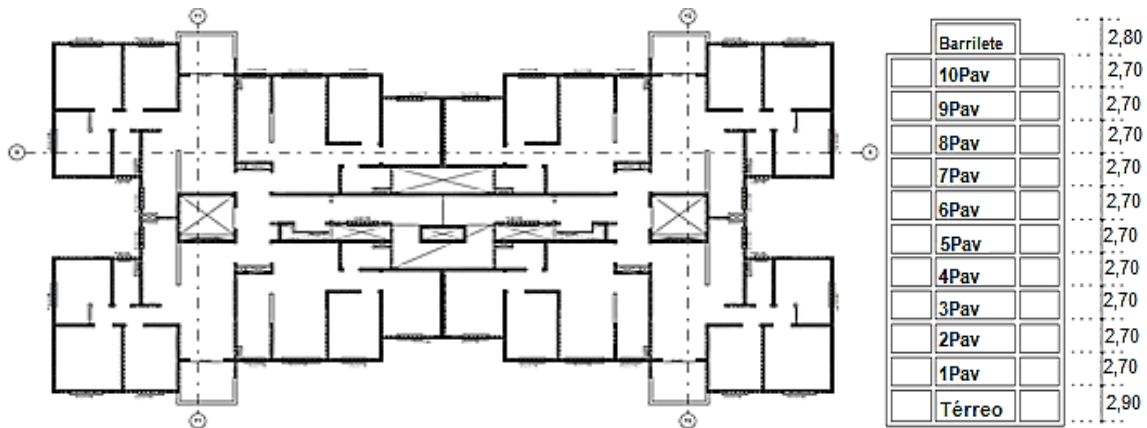


Figura 4. Modulação do pavimento tipo e corte esquemático da edificação.

### 3.1 Configuração analisada

A situação foi analisada em uma parede de fachada que recebe cargas provenientes das lajes em apenas um dos lados da parede, ocasionando assim em um momento maior ao invés de paredes internas que, devido ao recebimento de cargas nos dois lados da parede, apresenta um momento fletor atuante menor.

Optou-se pelo trecho da parede 54 situado entre as paredes 1 e 5 para análise por ser uma parede externa com a influência do carregamento da laje apenas por um dos lados o que tende a ser uma situação com maiores momentos fletores atuantes. A Fig. 5 mostra com mais detalhes a região escolhida para esta determinação e a Fig. 6 indica a distribuição de cargas das lajes sobre o trecho da parede analisada.

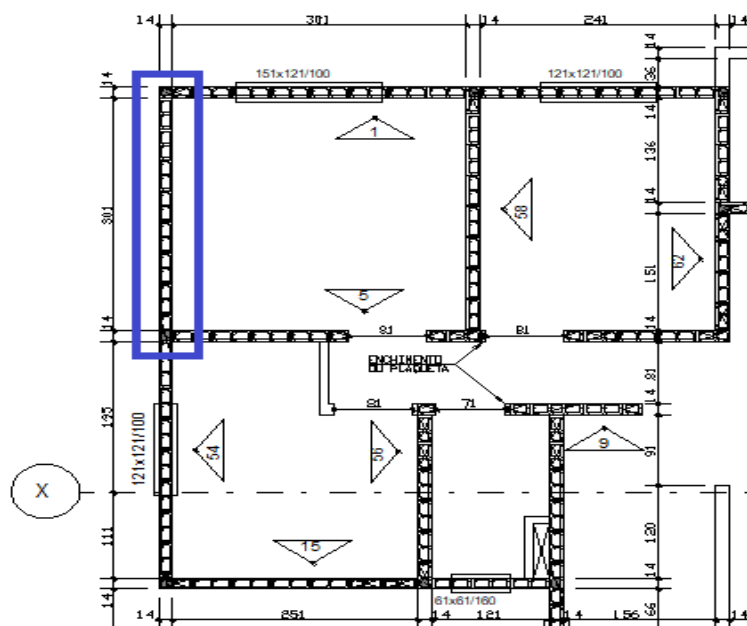


Figura 5. Trecho da parede para análise.

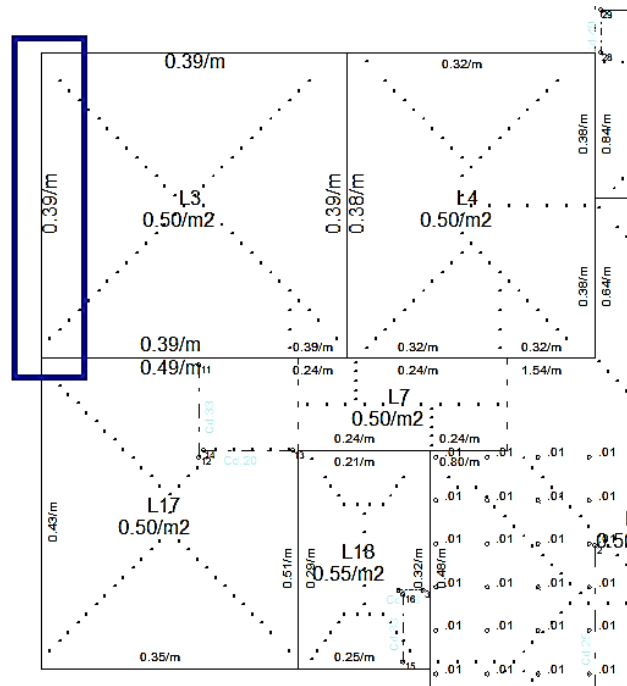


Figura 6. Distribuição das cargas da laje em tf/m, para o pavimento tipo.

Com o auxílio do software CAD/TQS da TQS Informática Ltda. foi feito o lançamento da estrutura utilizando o modelador estrutural oferecido pelo programa, e com isso obteve-se os valores das cargas atuantes nas vigas de transição no térreo. Analisando toda a estrutura e verificando as cargas finais distribuídas sobre as vigas de transição de concreto armado no pavimento térreo, no trecho analisado, obtém-se como carga distribuída 162,8 kN/m, carga referente a soma das cargas de peso próprio de alvenarias e lajes de concreto, cargas permanentes e cargas variáveis (acidentais) atuantes conforme cada pavimento.

### 3.2 Resultados

Foram efetuados os cálculos dos momentos atuantes no topo e na base da parede do trecho analisado, em todos os pavimentos da estrutura, seguindo as formulações dos dois métodos de cálculo apresentados na fundamentação teórica nos itens 2.1 e 2.2. Os resultados obtidos estão resumidos nas Fig. 7 e Fig. 8 a seguir, onde estão representados, respectivamente, os momentos fletores calculados pelo método de cálculo alternativo de acordo com o anexo C da norma DIN EN 1996-1-1/NA [5] e pelo método da Regra dos 5% de acordo com a norma DIN 1053-1 [4].

A Regra de 5% estabelece as expressões para calcular as excentricidades no nó laje-parede de alvenaria e a partir dessas excentricidades e dos valores das cargas acumuladas de peso próprio, ações permanentes e acidentais provenientes tanto da parede quanto da laje, calculam-se os momentos fletores que atuam no topo ( $M_o$ ) e na base ( $M_u$ ) da parede. As excentricidades dependem, por sua vez, das cargas acumuladas e à medida que os pavimentos vão sendo analisados de cima para baixo, a carga vai aumentando e as excentricidades vão reduzindo o seu módulo, o que gera assim valores de momentos fletores constantes em cada pavimento, conforme observado na Fig. 6.

Entretanto o método de cálculo alternativo, baseado no anexo C da norma DIN EN 1996-1-1/NA [5], oferece subsídios que possibilitam o cálculo direto dos momentos fletores que atuam no topo e na base da parede de alvenaria. O valor desses momentos fletores dependem das propriedades mecânicas e geométricas dos elementos que formam o quadro (lajes e paredes) e dos vãos e cargas que atuam adjacentes a parede que se quer analisar. A figura 7 indica uma variação dos valores dos momentos fletores na primeira elevação, considerando a ordem de análise dos pavimentos de cima para baixo como no método anterior. Essa variação se deve ao fato do carregamento da laje de cobertura ser diferente do pavimento inferior e também ao fato de que a parede apresenta uma vinculação com liberdade de giro com a cobertura, enquanto no pavimento inferior há uma ligação que impossibilita esse movimento.



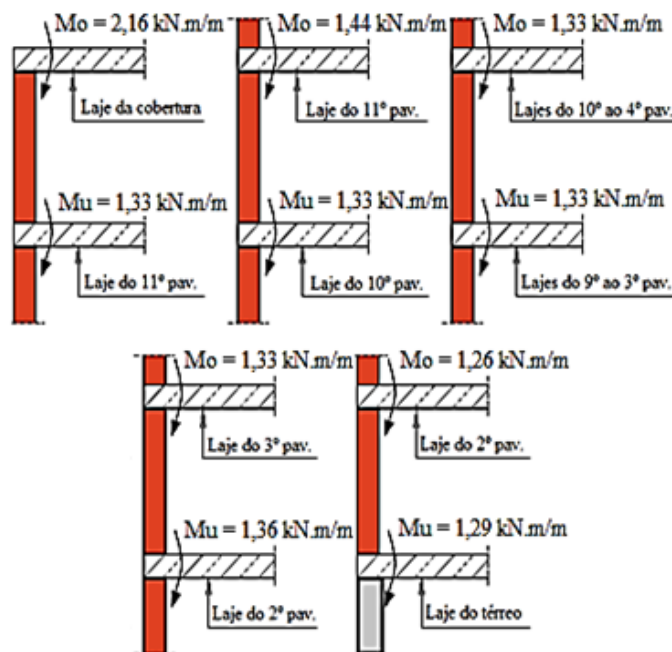


Figura 7. Valores dos momentos fletores no topo e na base da parede de alvenaria pelo método alternativo de acordo com o anexo C da norma DIN EN 1996-1-1/NA [5].

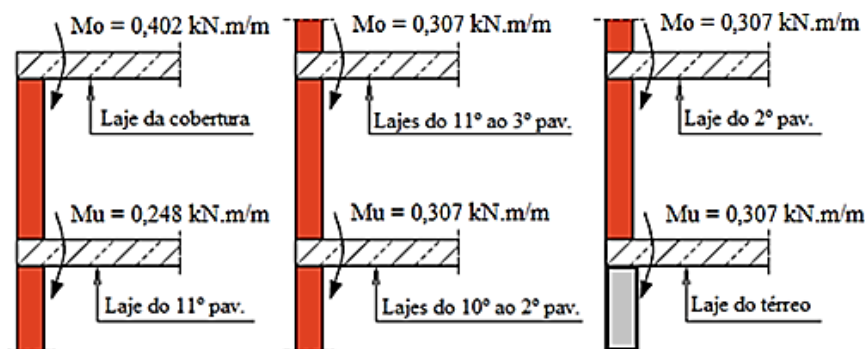


Figura 8. Valores dos momentos fletores no topo e na base da parede de alvenaria pela Regra dos 5%.

Ainda sobre a análise efetuada pelo segundo método de cálculo é possível verificar que a partir do 10º pavimento os momentos fletores atuantes no topo e na base de cada elevação de alvenaria passam a ser constantes já que os vãos e cargas atuantes são constantes devidos aos pisos representarem os pavimentos tipos da estrutura. Uma pequena diferença nos valores é observada na chegada ao pavimento de transição devido a mudança no pé-direito do primeiro pavimento.

Os valores dos momentos fletores obtidos no encontro da estrutura de alvenaria com o pavimento de transição, no trecho analisado, em qualquer um dos métodos utilizados para cálculo, foram de pequena expressão se comparados aos valores dos demais esforços atuantes no mesmo tramo da viga. A Tabela 1 a seguir mostra os valores máximos dos esforços característicos atuantes no trecho da viga analisada.

Tabela 1. Valores máximos dos esforços atuantes na viga de transição.

Momento fletor máximo positivo	119,6 kN.m
Momento fletor máximo negativo	138,0 kN.m
Esforço cortante	229,1 kN

Utilizando o maior valor de momento fletor proveniente da excentricidade do carregamento das lajes sobre as paredes de alvenaria obtido pelo método de cálculo alternativo, tem-se 1,290 kN.m/m, que irá atuar como momento torçor na viga de transição. Considerando que este valor será aplicado de maneira uniforme no tramo da viga teremos um momento torçor máximo de 2,580 kN.m nas extremidades. Comparando esse valor com os demais esforços indicados na tabela 1 anterior, é possível verificar que este momento torçor equivale a aproximadamente a 1% do esforço cortante na mesma seção, valor muito pequeno para influenciar o dimensionamento nesta situação.

## 4 Análise por Elementos Finitos

Com a utilização do programa ANSYS WORKBENCH – versão 19 Academic, foi feita a modelagem inicial, utilizando a ferramenta SPACE CLAIM do programa, de uma estrutura composta por uma laje de concreto apoiada sobre uma parede de alvenaria de blocos de concreto. A parede de alvenaria tem espessura de 15,0 cm, referente à família de blocos de concreto comumente usados nas construções, uma altura de 2,80 m (14 fiadas de blocos) para o primeiro pavimento acima do embasamento e 2,60 m (13 fiadas de blocos) para os demais pavimentos, dimensões normalmente utilizadas em edificações residenciais. Já a laje modelada possui 10,0 cm de espessura e um comprimento de 3,30 m. Descontada a espessura da parede de alvenaria resulta em um trecho livre de 1,5 m na modelagem devido a adoção de uma simetria no meio do vão. Tanto para a alvenaria quanto para a laje foi considerada uma faixa de estudo de 1,0 m.

Os materiais foram definidos para considerar o peso próprio e as características mecânicas tais como módulo de elasticidade longitudinal e coeficiente de Poisson. O concreto armado e a alvenaria têm peso específico de 2.500 kgf/m<sup>3</sup> e 1.750 kgf/m<sup>3</sup> respectivamente enquanto os módulos de elasticidade longitudinais adotados foram 28,00 GPa para o concreto e 6,12 GPa para a alvenaria. Por não possuir valores experimentais, adotou-se um coeficiente de Poisson igual a 0,2 para os dois materiais.

### 4.1 Simulações numéricas

Após a modelagem da estrutura foi feita a apreciação indicando algumas condições de contorno. A estrutura foi analisada com o objetivo de avaliar os efeitos da reação de apoio da laje sobre a parede de alvenaria e para tal foi utilizada uma carga de 2.500,0 Pa sobre a laje, que representa o carregamento indicado (permanentes + variáveis) para a laje de uma edificação residencial, conforme utilizado na estrutura real em estudo. Os resultados encontrados foram comparados com o estudo analítico apresentado anteriormente. A região analisada neste trabalho é a de uma parede de fachada. A modelagem considera a metade do vão teórico (eixo a eixo de parede) para aproveitar a simetria. Na base da parede de alvenaria foi considerada uma vinculação que impede o deslocamento nos três eixos (X, Y e Z) entre a torre de alvenaria e o embasamento de concreto armado. A Fig. 9 a seguir mostra a estrutura com as condições de contorno utilizadas.

Após a descrição das condições de contorno é necessário configurar a malha de elementos finitos que será adotada e para tanto foi adotada uma malha de elementos Hexaédricos com 8 nós. Devido a geometria da parede de alvenaria e a da laje, no que se refere as suas espessuras, optou-se por uma malha de elementos finitos com elementos que possuam no máximo 5,0 cm de aresta para que a malha gerada, de maneira automática pelo *software*, formasse elementos que apresentassem nós alinhados facilitando assim a interpretação dos resultados. A Fig. 10, abaixo, representa o modelo, de maneira genérica, com a malha de elementos criados e como ficou a sua disposição.



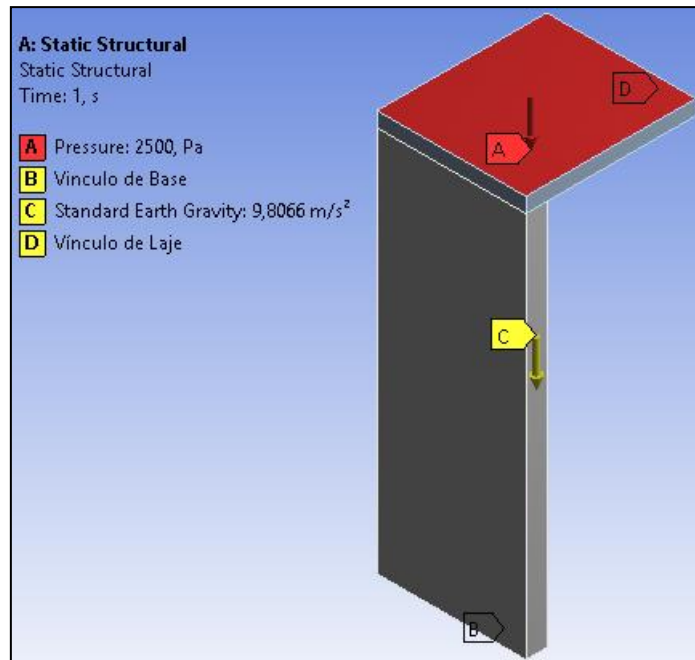


Figura 9. Modelo geométrico (Alvenaria + Laje) e condições de contorno utilizadas nas simulações numéricas.

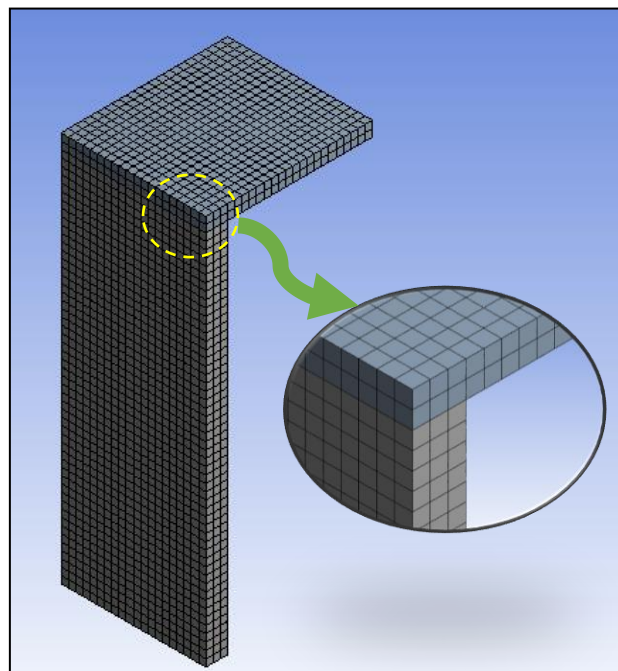


Figura 10. Malha de elementos finitos para um conjunto laje-parede (1 pavimento).

Outra influência, que a análise por elementos finitos pode ter, é em relação ao tipo de contato adotado entre dois sólidos (laje – parede). Dentre as alternativas de contato já explicadas no item 3.6.1, as opções Bonded (Ligado) e Frictional (Com atrito) foram utilizadas na modelagem deste estudo. A primeira opção, Bonded, foi utilizada para definir o contato nos pavimentos tipo da estrutura e a segunda, Frictional no contato entre a laje da cobertura e o lance da parede de alvenaria do último pavimento (11º pavimento). Nessa região foi adotado um coeficiente de atrito igual a 0,6, pois de acordo com as práticas de execução, a última laje deve possuir liberdade de movimentação no seu plano, devido à variação térmica a que estará submetida. Já para os demais pavimentos, devido à existência de pelo menos dois pontos de armação vertical existente em encontros de paredes transversais para cada pano de alvenaria,

essa armadura limita a movimentação da laje, oferecendo assim vinculação dos movimentos nos eixos X e Z, e devido à presença de paredes de alvenaria acima e abaixo da laje limita também o movimento no eixo Y.

As cargas para o dimensionamento na compressão de uma parede são determinadas por metro linear. Assim sendo, procurou-se representar um trecho de um metro de parede na modelagem da estrutura completa (11 pavimentos em alvenaria estrutural). Entretanto a versão do programa utilizado, ANSYS WORKBENCH – versão 19 Academic, apresenta uma limitação em relação ao número de nós e elementos permitidos na geração da malha de elementos finitos. Para superar essa limitação, considerou-se a possibilidade de adotar uma malha mais grossa. Porém havia risco de perda de precisão. Então manteve-se o tamanho dos elementos, reduzindo o comprimento do trecho analisado para 25,0 cm, o que possibilitou a geração e processamento de todos os lances em conjunto, liberando a análise dos resultados procurados, mantendo também o tamanho dos elementos finitos conforme haviam sido definidos na primeira modelagem, obtendo ao fim um total de 75.708 nós e 12.630 elementos. A Fig. 11, abaixo, mostra o modelo final adotado para a realização do estudo de caso.

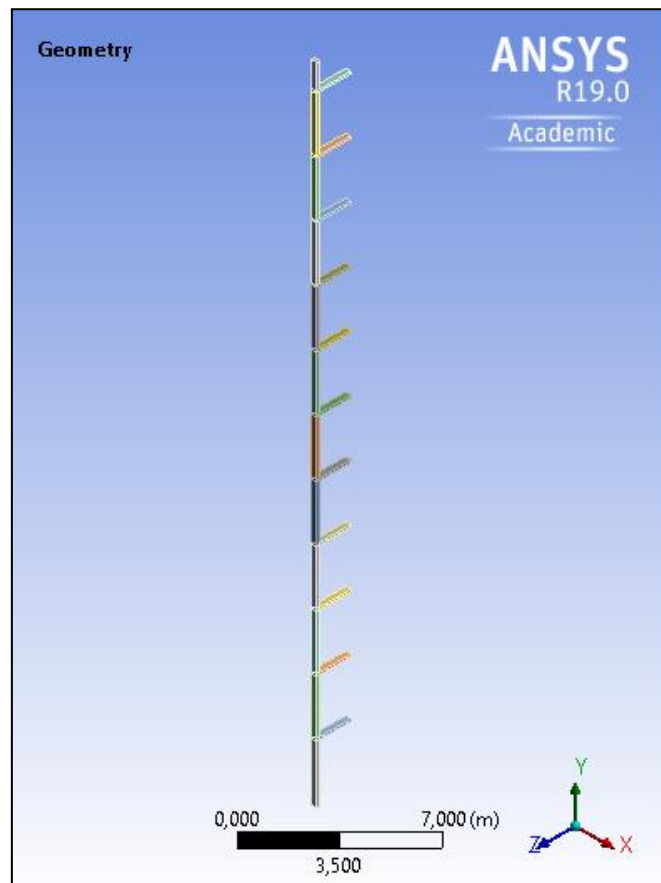


Figura 11. Modelo de elementos finitos para os 11 pavimentos.

Definido o modelo de elementos finitos, com atribuição das condições de contorno, das propriedades dos materiais e das cargas atuantes foi possível obter os resultados necessários para as diferentes verificações. Neste processo foram utilizadas várias ferramentas, inclusive algumas do próprio programa ANSYS WORKBENCH.

Os resultados obtidos com os métodos analíticos disponíveis na norma DIN EN 1996-1-1 [5] e pela Regra dos 5%, foram já apresentados no item 3.2. Para viabilizar uma comparação com os resultados da simulação foi realizada a verificação das tensões de contato em cada encontro de elementos, laje-parede referente ao topo da elevação e parede-laje referente a base da elevação, para a determinação dos momentos fletores gerados em cada lance de parede.

As pressões de contato entre cada elemento (laje-parede e parede-laje) são indicadas graficamente conforme a Fig. 12. Por ser um dos objetivos principais desse trabalho, a verificação das excentricidades

da reação das lajes sobre as paredes de alvenaria, foram examinadas todas as regiões de contato. Além dos diagramas oferecidos pelo programa ANSYS WORKBENCH, os dados foram explorados para criar outros gráficos que tornam a visualização mais clara e objetiva no que diz respeito às pressões de contato atuantes entre os elementos. Para uma identificação rápida e mais prática dos diagramas todas as lajes e paredes envolvidas no estudo serão numeradas conforme indica a Fig. 12 abaixo. Valores negativos indicam tensões de compressão enquanto valores positivos sinalizam tensões de tração.

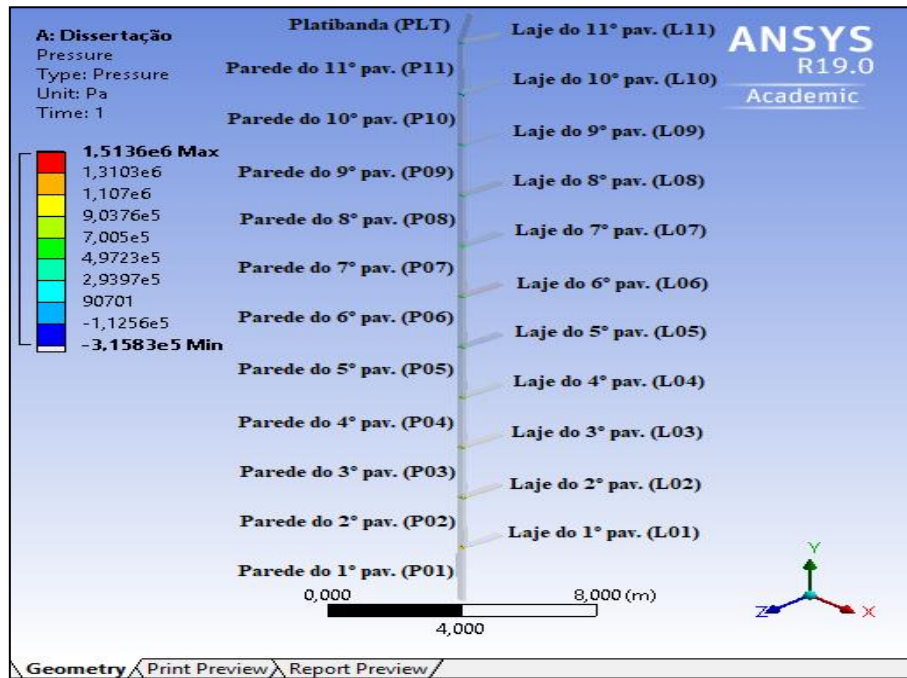


Figura 12. Diagrama de tensões de contato entre todos os elementos (laje-parede e parede-laje).

A análise realizada com o *software* ANSYS WORKBENCH também possibilitou a visualização da distribuição das tensões de contato entre os elementos parede-laje e laje parede. A evolução das tensões, de acordo com o aumento da carga vertical acumulada entre pavimentos e a redução da excentricidade das cargas resultantes em relação ao eixo da parede, pode ser melhor visualizada conforme as Fig. 13 e Fig. 14 que trazem o conjunto de diagramas de tensões ao longo da espessura da parede para o contato entre lajes-paredes e paredes-lajes, respectivamente.

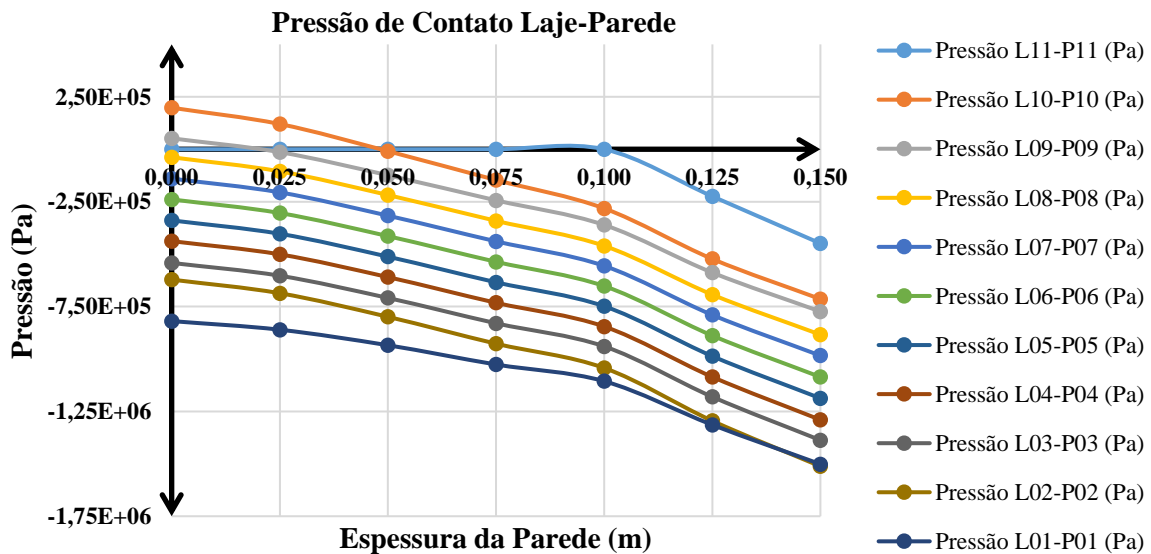


Figura 13. Diagramas de tensões de contato entre a lajes e paredes para todos os pavimentos.

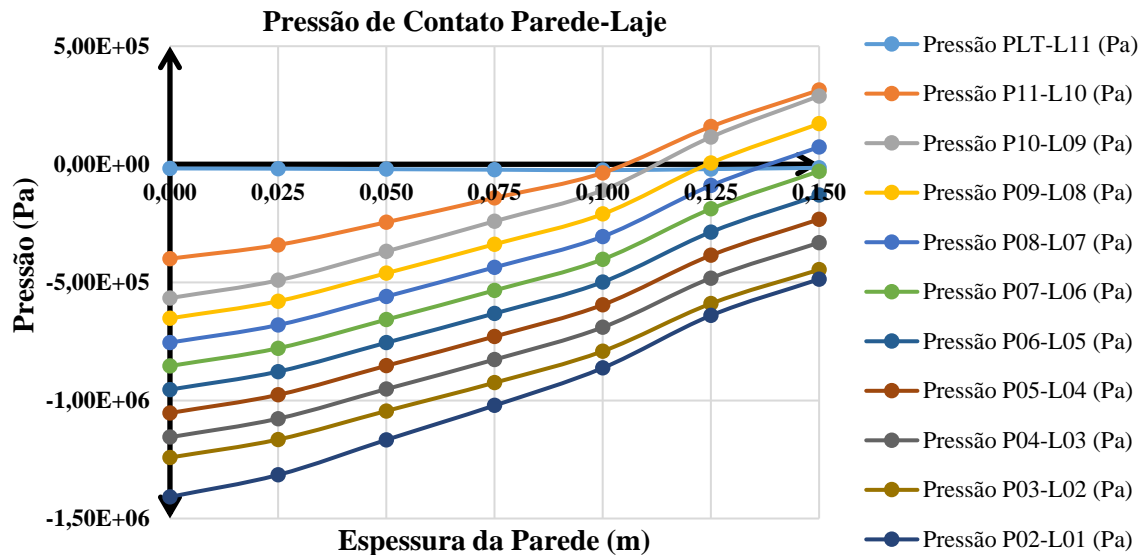


Figura 14. Diagramas de tensões de contato entre a paredes e lajes para todos os pavimentos.

Em cada pavimento analisado as tensões de contato permitem determinar os momentos fletores tanto no topo quanto na base da parede. É objetivo de este estudo analisar a situação de cada um dos pavimentos para observar a evolução da excentricidade da resultante de cargas na parede assim como o momento que provoca. As linhas de pressões apresentadas nas Fig. 13 e Fig. 14, obtidas com os resultados nodais do modelo do ANSYS WORKBENCH podem ser aproximadas com uma linha de tendência polinomial. A partir da equação referente a cada contato é possível calcular a força resultante como a integral das tensões sobre a espessura da parede e sua posição, com a qual se determina a excentricidade desta força em relação ao centro da parede, podendo então calcular o valor do momento fletor atuante. Desta forma é possível calcular os momentos fletores no topo e na base das paredes para os diferentes pavimentos. Estes valores de momentos podem ser comparados com os valores obtidos com os métodos analíticos, conforme mostram a Tabela 2 e Tabela 3 a seguir.

Tabela 2 – Valores de momento no topo das paredes de acordo com as três abordagens.

Pavimentos Analisados	Regra dos 5% (DIN 1053-1) (kN.m/m)	Anexo C (Eurocode 6) (kN.m/m)	Ansys Workbench (kN.m/m)
Platibanda	-	-	-
11° Pavimento	0,402	2,157	0,655
10° Pavimento	0,307	1,441	1,725
9° Pavimento	0,307	1,326	1,553
8° Pavimento	0,307	1,326	1,587
7° Pavimento	0,307	1,326	1,581
6° Pavimento	0,307	1,326	1,581
5° Pavimento	0,307	1,326	1,588
4° Pavimento	0,307	1,326	1,592
3° Pavimento	0,307	1,326	1,579
2° Pavimento	0,307	1,357	1,667
1° Pavimento	0,307	1,260	1,248

Tabela 3 – Valores de momento na base das paredes de acordo com as três abordagens.

<b>Pavimentos Analisados</b>	<b>Regra dos 5% (DIN 1053-1) (kN.m/m)</b>	<b>Anexo C (Eurocode 6) (kN.m/m)</b>	<b>Ansys Workbench (kN.m/m)</b>
Platibanda	0,248	-	0,004
11° Pavimento	0,307	1,326	0,875
10° Pavimento	0,307	1,326	1,622
9° Pavimento	0,307	1,326	1,562
8° Pavimento	0,307	1,326	1,576
7° Pavimento	0,307	1,326	1,573
6° Pavimento	0,307	1,326	1,569
5° Pavimento	0,307	1,326	1,572
4° Pavimento	0,307	1,326	1,572
3° Pavimento	0,307	1,326	1,522
2° Pavimento	0,307	1,326	1,775
1° Pavimento	0,307	1,290	0,692

#### 4.2 Comparação e discussão dos resultados

A aplicação das três abordagens para o cálculo dos momentos resultando da excentricidade das reações das lajes em relação ao centroide das paredes conduziu as seguintes considerações. Para o caso da Regra dos 5% da norma DIN 1053-1 [4], todos os pavimentos tipos apresentam um mesmo valor de momento (0,402 kN.m/m) enquanto o pavimento de cobertura acusa um valor diferente (0,307 kN.m/m). Três parâmetros explicam a diferença de valor para a laje da cobertura: as cargas diferentes da laje da cobertura, o limite de consideração do valor da excentricidade para a laje da cobertura ( $\leq t/3$ ) e a altura da parede acima do nó (platibanda) que é diferente do pé-direito dos pavimentos tipo. Nos outros pavimentos, onde a excentricidade possui o mesmo valor, a carga proveniente da laje adjacente é a mesma para todos os pisos (por se tratar de pavimentos tipo) assim como o pé-direito serem.

No caso do anexo C do Eurocode 6 [5], os momentos fletores mostram variação nos dois últimos pavimentos e no primeiro. Nessa abordagem os parâmetros que influenciam os valores compreendem a carga da laje, o pé-direito como no caso anterior e, além disso, as condições de vinculação parede-laje (rótula ou engaste) com os elementos estruturais adjacentes. Nos dois últimos pavimentos todos os parâmetros mencionados têm valores diferentes entre si e em relação ao pavimento tipo para os lances de paredes envolvidos no cálculo. O primeiro pavimento tem pé-direito diferente dos pavimentos tipo enquanto as cargas de laje e as condições de vinculação são iguais, mostrando o peso do pé-direito no valor calculado. Nos outros pavimentos, todas as características assumem os mesmos valores, daí o valor constante de momento.

De uma maneira geral, os resultados da análise com o programa ANSYS WORKBENCH mostra uma tendência semelhante aos resultados da abordagem com o anexo C. O primeiro e os dois últimos pavimentos mostram resultados diferentes do valor do pavimento que é praticamente constante. Atribui-se a oscilação dos valores dos momentos dos pavimentos tipos ao processo de integração que depende da curva de tendência adotada. Uma observação importante é a magnitude dos valores que, no geral, se comportam como a média simples dos valores das outras duas abordagens. A diferença que se observa nos valores da laje da cobertura se explica porque, na modelagem, a laje tem um contato com atrito com a parede, condição diferente dos demais pavimentos onde a ligação é um engaste.

## 5 Conclusões

Os métodos de cálculo utilizados para efetuar esta análise mostraram que os momentos que aparecem devido a excentricidade das reações das lajes em relação ao centroide da parede podem variar de acordo com o carregamento existente nas lajes e com a altura das paredes em cada pavimento. Entretanto, cabe mencionar que o uso da Regra de 5% da norma DIN 1053-1 [4] pode levar a um valor de excentricidade para o qual a posição da resultante de carga, que depende exclusivamente do vão da laje adjacente, pode estar fora da espessura da parede, fato conceitualmente inconsistente.

Os valores de momentos fletores obtidos com o método da Regra de 5% foram menores que os valores calculados com as recomendações do Anexo C da norma DIN EN 1996-1-1/NA [5], método considerado mais rigoroso. Vale destacar um fato interessante sobre as excentricidades no pé da parede do primeiro lance de alvenaria acima da viga de transição. O método da Regra de 5% estima uma excentricidade de 2,42 mm, enquanto o método alternativo da norma DIN EN 1996-1-1/NA [5] calcula, em função do valor do momento fletor obtido no pé da parede e da carga acumulada, uma excentricidade de 7,92 mm, ou seja, praticamente na mesma proporção de diferença obtida entre os momentos fletores dos dois métodos analíticos.

A simulação computacional com o programa ANSYS WORKBENCH, de maneira a representar a estrutura real em estudo considerando uma parede de fachada, revelou que a laje apoiada sobre as paredes de alvenaria ou as paredes apoiadas sobre as lajes, apresentam de fato, uma transmissão de sua carga de reação de forma alternada através dos diagramas de pressão obtidos na região de contato entre estes elementos.

Observou-se que a medida que a carga vertical se acumula do pavimento superior em direção aos inferiores, a excentricidade da reação se reduz e a posição da carga se aproxima do eixo da parede. Enquanto a carga acumula tanto das paredes quanto das lajes, considerando o peso próprio dos elementos envolvidos e a ação de cargas permanentes e variáveis envolvidas no cálculo, gerando ao fim momentos fletores com valores bem próximos ou, por algumas vezes, iguais em diversos pavimentos. Junto à base da parede do primeiro pavimento o valor encontrado foi de 0,692 kN.m/m e se situa entre os valores obtidos pelos dois métodos analíticos das normas internacionais adotadas.

Na análise dos pavimentos, a medida que a carga vertical foi se acumulando, observou-se que a posição da reação se aproxima do eixo da parede, reduzindo a excentricidade. Assim, as variações da reação e da excentricidade se compensam e explicam os valores de momentos muito próximos e, por algumas vezes, iguais, calculados para os pavimentos intermediários.

A análise realizada através da aplicação das três abordagens mostra que os momentos no nível da viga de transição são pouco influenciados pelo número de pavimentos da edificação. Além disso, evidencia também que os valores são muito baixos e não alteram o processo de dimensionamento da viga de transição, corroborando, de certa maneira a prática atual que considera uma excentricidade acidental com valor inferior a 10% da espessura da parede através de um coeficiente de redução no dimensionamento a compressão simples. Na verificação a flexo-compressão, as cargas são consideradas centradas e os momentos correspondentes a excentricidade da reação desprezados.

## Referências

- [1] Associação Brasileira De Normas Técnicas. *Alvenaria estrutural - Blocos de concreto. Parte 1 – Projeto*. NBR 15961-1, Brasil, 2011.
- [2] Associação Brasileira De Normas Técnicas. *Alvenaria estrutural - Blocos Cerâmicos. Parte 1 – Projeto*. NBR 15812-1, Brasil, 2010.
- [3] C. A. Graubner. *Statikhandbuch. Berechnung, Bemessung, Beispiele*. Bundesverband Kalksandsteinindustrie, Hannover, Niedersachsen, Germany. 2014, 216p.
- [4] Deutsches Institut für Normung. *Mauerwerk - Teil 1: Berechnung und Ausführung*. DIN 1053-1, German, 1996.
- [5] Deutsches Institut für Normung. *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten - Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk*. DIN EN 1996-1-1/NA, German, 1996.

- [6] HENDRY, A. W., SINHA, B. P. e DAVIES, S. R. *Design of Masonry Structures*. E & FN Spon, Edinburgh, United Kingdom, 2004, 279 p.
- [7] British Standard. *Code of Practice for the use of Masonry*. BS 5628. England, 2005.
- [8] M. Hurez, N. Juraszek e M. Pelcé. *Dimensionner les Ouvrages em Maçonnerie*. Eyrolles Édition, Saint-Denis, France, 2011.