

# Global stability of buildings' structural systems considering beam-wall connections

## *Estabilidade global de sistemas estruturais de edifícios considerando a ligação viga-pilar parede*



C. W. S. DINIZ <sup>a</sup>  
[carlos.diniz@sinfra.ufal.br](mailto:carlos.diniz@sinfra.ufal.br)  
<https://orcid.org/0000-0002-0776-4789>

E. N. LAGES <sup>b</sup>  
[enl@lccv.ufal.br](mailto:enl@lccv.ufal.br)  
<https://orcid.org/0000-0001-6704-4057>

A. S. R. BARBOZA <sup>b</sup>  
[aline@lccv.ufal.br](mailto:aline@lccv.ufal.br)  
<https://orcid.org/0000-0001-6296-927X>

### Abstract

Several factors influence the stability of concrete structures, such as building height, structural components' rigidity, bracing system, beam-wall connection rigidity, among others. Global structural stability is evaluated according to NBR 6118/2014 by the  $\alpha$  e  $\gamma_2$  parameters. This article aims to evaluate the global structural stability concrete structures considering the eccentricity of the beam-wall connections. With the aid of software Abaqus® and TQS®, reticulated models were analyzed to evaluate the contribution of the eccentricity of the beam-wall connections on the global stability and the rigidity of the connections. The geometric nonlinear effects were disregarded in these analyses. The stability parameters from NBR6118/2014 were evaluated in the frame models, as well as the flexibilization criteria from the TQS® software, LEPMOL e REDMOL. The results of the displacement analysis show an increase of 26.45%, comparing the centered connection to the more eccentric connection.

**Keywords:** global stability, beam-wall connection, TQS®, flexibility criteria.

### Resumo

Diversos fatores influenciam a estabilidade das estruturas de concreto, como a altura das edificações, a rigidez dos elementos estruturais componentes, o sistema de contraventamento, a rigidez das ligações viga-pilar entre outros. A estabilidade global das estruturas é avaliada segundo a NBR 6118/2014 pelos parâmetros  $\alpha$  e  $\gamma_2$ . Este trabalho objetiva avaliar a estabilidade global de estruturas de concreto considerando a influência da excentricidade na ligação viga-pilar parede. Com o auxílio dos softwares Abaqus® e TQS® foram analisados modelos reticulados, avaliando-se a contribuição da excentricidade da ligação viga-pilar parede para a estabilidade global e para rigidez da ligação. Os modelos foram analisados sem a consideração da não linearidade geométrica. Nos modelos de pórtico foram avaliados os parâmetros de estabilidade da NBR 6118/2014, assim como, os critérios de flexibilização da ligação do pórtico do TQS®, LEPMOL e REDMOL. Os resultados das análises de deslocamentos indicaram um crescimento de 26,45%, comparando-se a ligação centrada com a mais excêntrica.

**Palavras-chave:** estabilidade global, ligação viga-pilar parede, TQS®, flexibilidade.

<sup>a</sup> Federal University of Alagoas, Superintendence of Infrastructure, Maceió, AL, Brazil;

<sup>b</sup> Federal University of Alagoas, Laboratory of Scientific Computing and Visualization, Center of Technology, Graduate Program in Engineering, Maceió, AL, Brazil.

## 1. Introdução

A população brasileira sofreu ao longo dos anos um processo de urbanização intenso. De acordo com dados disponibilizados em IBGE [1], o Brasil, atualmente, possui sua população concentrada em centros urbanos. As grandes populações concentradas acaba limitando os espaços horizontais para construção, o que aumenta a necessidade de otimização dos espaços verticais para tal fim. Com isso, as estruturas usuais de edificações residenciais e comerciais são concebidas cada vez mais altas. Segundo Fonte [2], a crescente valorização das áreas urbanas leva as grandes cidades a concentrarem as maiores quantidades de edificações altas.

Outro fator importante que possibilita a construção de edifícios cada vez mais altos é o avanço tecnológico alcançado ao longo dos anos. Segundo Zumaeta Moncayo [3], o avanço na tecnologia de materiais colocou à disposição do mercado concretos mais resistentes ocasionando construções com elementos estruturais mais esbeltos. A NBR 6118 [4] incluiu em seu texto concretos com resistências de 55 MPa até 90 MPa, que são os concretos de alta resistência.

Uma das grandes preocupações com a estrutura de um edifício alto, se deve ao efeito do vento nessas edificações, pois, a depender da geometria e rigidez dos elementos estruturais do edifício, esses efeitos se tornam ainda mais acentuados. A estrutura de um edifício alto deve ser concebida de forma muito mais cuidadosa quanto aos efeitos das ações horizontais.

A NBR 6118 [4], no item 11.4.1.2, recomenda expressamente a consideração dos esforços solicitantes na edificação causados pela ação do vento. A consideração desses esforços implica em análises complexas de estabilidade da edificação. São os deslocamentos horizontais referentes a esses esforços que fazem surgir os efeitos de segunda ordem na estrutura.

A verificação da estabilidade global de uma edificação tornou-se mais recorrente. Isso acontece devido ao grande número de edificações altas e esbeltas, ou ainda, de acordo com Bueno [5], pela necessidade de verificação de estruturas simples, porém esbeltas. No entanto, com o avanço da tecnologia computacional, as análises podem ser realizadas rapidamente e com precisão satisfatória. A estabilidade global da edificação é influenciada por diversos fatores, como as ações externas (forças devido ao vento, peso próprio da estrutura e sobrecargas), sua altura e esbelteza, a rigidez de seus elementos e as ligações entre si, etc.

Os pórticos, constituídos pela associação/ligação entre pilares e vigas, são um dos principais meios de enrijecimento da estrutura. A combinação das vigas e pilares em forma de pórticos proporcionam maiores resistências aos carregamentos e rigidezas aos deslocamentos. A sua eficiência em combater os efeitos da instabilidade está na rigidez da ligação entre os dois elementos que o constitui (vigas e pilares) e na rigidez da seção transversal dos próprios elementos. A viga pode ser ligada ao pilar em diferentes pontos ao longo de sua largura. De acordo com Araújo [6], a rigidez da ligação entre viga e pilar é alterada quando a excentricidade da viga em relação ao eixo do pilar é modificada.

As análises de estabilidade são efetuadas geralmente adotando modelos simplificados da estrutura. É comum representar vigas e pilares por barras no pórtico espacial da estrutura e as lajes por uma malha de barras (grelha). No entanto, há a possibilidade

da estrutura ser contraventada por pilares-parede, que é um elemento bidimensional de chapa e pode não ser adequadamente representado por uma única barra.

Os pilares-parede são introduzidos nos sistemas estruturais para análises e dimensionamento como elementos lineares. Segundo a NBR 6118 [4], no item 15.9.1, para que os pilares-parede sejam incluídos como elementos lineares no conjunto resistente (sistema estrutural), é necessário garantir que sua seção transversal tenha sua forma mantida por travamentos adequados nos diversos pavimentos e que os efeitos de segunda ordem locais e localizados sejam convenientemente avaliados.

No que se referem às ligações excêntricas entre vigas e pilares, a NBR 6118 [4] considera trechos rígidos para impor a condição de que a viga transmita seus esforços para o eixo do pilar, no entanto, não considera a possibilidade de que a rigidez da ligação excêntrica seja diferente em cada posição. A excentricidade pode introduzir efeitos em apenas parte dos pilares, aumentando a possibilidade quando as vigas estão ligadas a pilares-parede.

No trabalho de Araújo [6] há indícios de que a rigidez da viga determinada na região da ligação viga-pilar sofre alterações quando se tem a viga excêntrica em relação ao pilar. Este fato implica em alterações na rigidez de toda a estrutura e, conseqüentemente, alterações na estabilidade da edificação. Quanto menos rígida a ligação, menos rígida a estrutura e mais instável a edificação.

O estudo da estabilidade considerando a excentricidade da viga em relação ao eixo do pilar, principalmente em pilares-parede, pode trazer diretrizes para consideração da flexibilidade da ligação viga-pilar parede para cada posição de excentricidade da viga. Neste trabalho avalia-se a estabilidade global de modelos estruturais de concreto considerando a influência da excentricidade na ligação viga-pilar parede verificando os parâmetros de estabilidade normativos e deslocamentos de estruturas reticuladas. A estabilidade global é verificada utilizando os deslocamentos absolutos no topo dos pilares, em todos os modelos idealizados modificando-se a excentricidade das ligações vigas-pilares parede. Também são realizadas análises dos parâmetros de estabilidade normativos dos modelos adotados e dos critérios de flexibilização do modelo reticulado do TQS©.

## 2. Considerações de pilares-parede

Os pilares são os responsáveis por recebimento das cargas das edificações e transferência aos elementos de fundação. Os pilares são caracterizados pela dimensão longitudinal ser maior que as dimensões da seção transversal. No entanto, os pilares-parede apresentam geometria que aproxima seu comportamento de um elemento bidimensional.

Segundo Pascual [8], pilar-parede, ou simplesmente parede, é um painel plano, contínuo, sem rigidez transversal, deformável predominantemente por momento fletor e suposto extremamente rígido à força cortante. A NBR 6118 [4], no item 18.4.1, caracteriza como pilares aqueles cuja maior dimensão da seção transversal não excede cinco vezes a menor dimensão. Podem ser compostos por uma ou mais superfícies associadas (Figura 1) e em alguma dessas superfícies a menor dimensão da seção transversal deve ser menor que 1/5 da maior.

As análises dos pilares-parede são mais complexas que sua

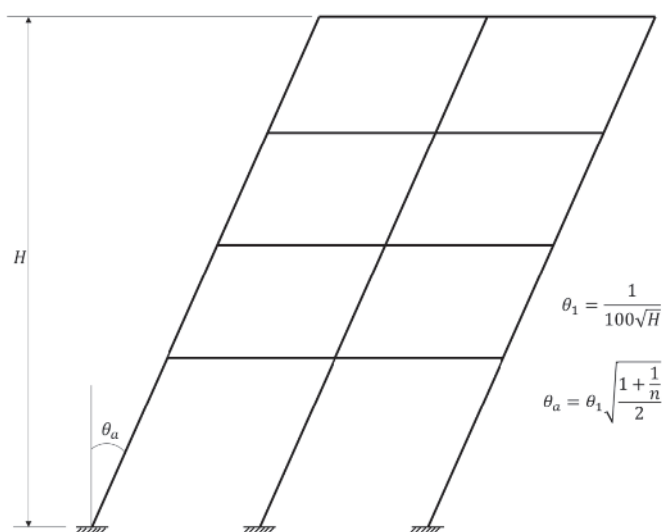


**Figura 1**  
Exemplificação de geometrias da seção transversal de pilares-parede

forma mais simples, que são os pilares idealizados como elementos lineares de barras. No entanto, a NBR 6118 [4], nos itens 14.8.1 e 15.9.1, impõe condições que quando atendidas permitem que os pilares-parede sejam analisados dentro do sistema estrutural como elementos lineares.

Os pilares-parede geralmente são utilizados como núcleo de rigidez das edificações. De acordo com Zumaeta Moncayo [3], a utilização de núcleos formados por pilares-parede de grandes dimensões (geralmente em forma de "U") contribuem significativamente para o aumento da rigidez da edificação.

O pilar-parede pode apoiar a viga em diversas posições ao longo da face do pilar e a excentricidade da viga pode resultar em rigidezes de ligações diferentes para cada posição da viga. A rigidez da ligação é afetada pela posição da viga no pilar ou pilar-parede e, conseqüentemente, o pórtico terá sua rigidez alterada em função desta posição. Araújo [6] avaliou os efeitos que a ligação viga-pilar em diferentes pontos da seção transversal do pilar traz para a rigidez. Ao se analisar o crescimento da largura do pilar, Araújo [6] constatou que à medida que as dimensões da seção transversal do pilar se aproximam de um pilar-parede os parâmetros utilizados para determinar a rigidez sofrem variações mais intensas.



**Figure 2**  
Desaprumo global dos elementos verticais

Source: Adaptado de NBR 6118 [4], item 11.3.3.4.1

### 3. Estabilidade de edifícios conforme NBR 6118

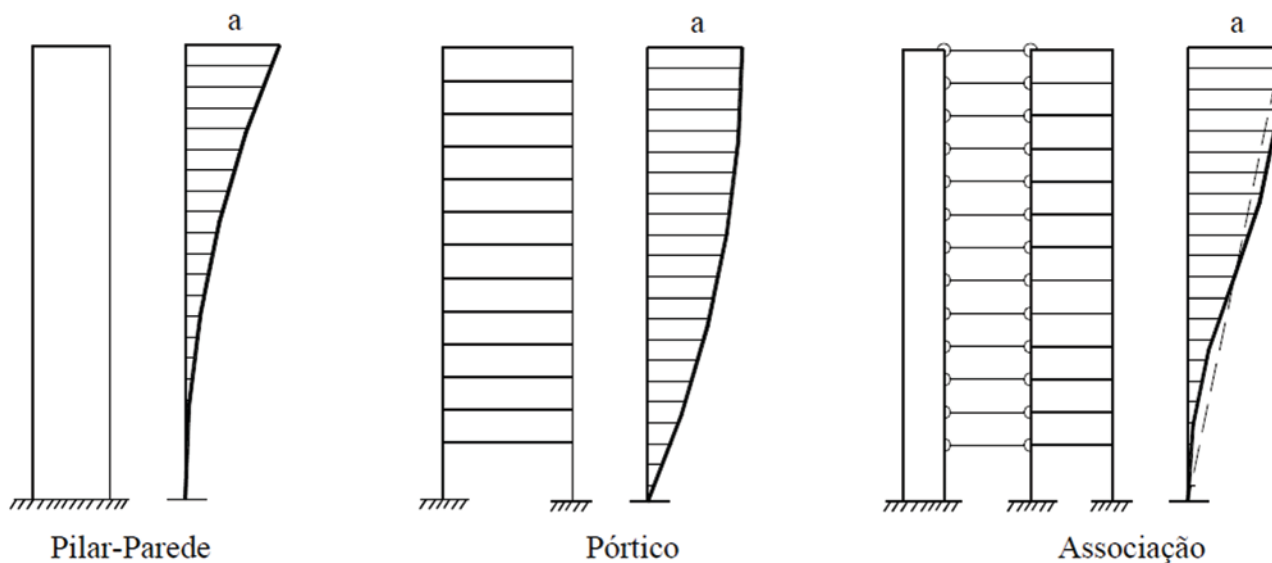
A estabilidade das edificações é tema recorrente nos trabalhos científicos de engenharia e também entre os projetistas de estruturas. O elevado número de edifícios altos e esbeltos impulsiona a necessidade das verificações da estabilidade estrutural. Para o projeto de estruturas, há disseminado na comunidade técnica vários softwares para este fim, nos quais se constata alguma verificação de estabilidade de edifícios comuns em concreto armado, geralmente verificações expressas na NBR 6118 [4].

A verificação da estabilidade das estruturas de concreto é uma análise complexa em virtude das considerações das não linearidades que existem nessas estruturas: não linearidade geométrica e não linearidade física. A primeira se faz presente quando o equilíbrio da estrutura está associado a uma configuração deformada significativamente diferente da indeformada. A segunda é caracterizada por relações constitutivas não lineares apresentadas pelos materiais componentes da estrutura.

Ao se considerar o real equilíbrio da estrutura na configuração geométrica deformada, surgem no sistema solicitações adicionais àquelas da análise geometricamente linear, denominadas de efeitos de segunda ordem [9]. Existem basicamente três tipos de efeitos de segunda ordem que podem ocorrer nas estruturas de concreto: global, local e localizado. Os efeitos de segunda ordem, em cuja determinação deve ser considerado o comportamento não linear dos materiais, podem ser desprezados sempre que não representarem acréscimo superior a 10% nas reações e nas solicitações relevantes na estrutura (NBR 6118 [4], item 15.2).

A análise de estabilidade global de estruturas visa classificar as mesmas quanto à deslocabilidade lateral dos nós, ou seja, busca analisar a sua sensibilidade aos efeitos de segunda ordem [5]. Em função da deslocabilidade dos nós do modelo geométrico da estrutura, esta pode ser classificada como de nós fixos ou de nós móveis. Para a NBR 6118 [4], no item 15.4.2, as estruturas de nós fixos são aquelas em que os efeitos globais de segunda ordem são inferiores a 10% dos efeitos de primeira ordem, caso contrário são consideradas de nós móveis.

A estabilidade global é uma condição a ser atendida pelas estruturas. A intensidade dos deslocamentos horizontais e das deformações definem se a estrutura é estável ou não. Segundo a NBR 6118 [4], no item 15.2, atinge-se o estado-limite de instabilidade nas estruturas de concreto sempre que, ao crescer a intensidade do carregamento e, portanto, das deformações, há elementos



**Figura 3**  
Estruturas de contraventamento

Source: [15]

submetidos à flexo-compressão em que o aumento da capacidade resistente passa a ser inferior ao aumento da solicitação.

Os critérios objetivos dados pela NBR 6118 [4] utilizados para classificar a estrutura quanto a estabilidade global são os parâmetros  $\alpha$  (*alfa*) e  $\gamma_z$  (*gama Z*). Estes parâmetros classificam a estrutura como de nós fixos ou móveis, de acordo com valores definidos na norma. Quando a estrutura é classificada como de nós fixos, o dimensionamento é realizado considerando-se análise de primeira ordem. Em caso de ser classificada como de nós móveis, deve ser realizada uma análise de segunda ordem, que é mais complexa, para determinação dos esforços a serem acrescidos aos de primeira ordem. A instabilidade global das estruturas de concreto sofre grande influência das imperfeições geométricas iniciais. A consideração de um desaprumo do eixo vertical da estrutura implica no acréscimo dos esforços, mesmo sem a existência de forças transversais. Na análise global das estruturas, deve ser considerado o desaprumo dos elementos verticais conforme a Figura 2, na qual  $H$  é a altura total dos elementos verticais,  $\theta_a$  é o ângulo de inclinação a ser considerado para o desaprumo global e  $n$  é o número de lances dos elementos verticais.

Os elementos verticais (pilares e pilares-parede), ou a associação destes com os elementos horizontais (vigas), em função de sua rigidez elevada, são os responsáveis por garantir a estabilidade estrutural, quando dispostos adequadamente. Segundo Wordell [10], essas subestruturas são definidas como estruturas de contraventamento e os demais elementos que não participam dessa subestrutura são denominados de elementos contraventados. As estruturas de contraventamento podem ser pilares-parede, pórtico e associação de pilares-parede e pórticos, como ilustrado na Figura 3.

#### 4. Parâmetro de instabilidade $\alpha$

O coeficiente de instabilidade  $\alpha$  foi desenvolvido pelos autores Hubert Beck e Gert Koning em 1967. O CEB incorporou o coeficiente

no seu texto e posteriormente outros códigos regulamentadores passaram a adaptá-lo em seus textos, como a norma brasileira NBR 6118 [4]. Este coeficiente apenas classifica a estrutura como de nós fixos ou móveis, avaliando se os esforços de segunda ordem precisam ou não serem considerados.

O item 15.5.2 da NBR 6118 [4] trata do parâmetro de instabilidade  $\alpha$ . São apresentadas formulações e valores limites de referência para avaliação da estrutura. Uma estrutura reticulada simétrica pode ser considerada de nós fixos se seu parâmetro de instabilidade  $\alpha$  for menor que o valor  $\alpha_1$ , conforme indicado na norma.

A não linearidade física dos materiais constituintes da estrutura é considerada na determinação do valor de  $\alpha_1$ . A fissuração dos elementos não é considerada, no entanto a não linearidade física do concreto surge também pela ação das cargas de compressão nos elementos estruturais [3].

#### 5. Coeficiente $\gamma_z$

Este coeficiente é um dos mais utilizados para análises de estabilidade e análises de segunda ordem. Além de classificar a estrutura quanto à necessidade ou não de considerar os efeitos de segunda ordem, o coeficiente  $\gamma_z$  estima tais esforços. Determina-se o  $\gamma_z$  por uma análise linear de primeira ordem, para cada caso de carregamento. A não linearidade física é considerada de forma aproximada, adotando-se, por exemplo, valores de rigidez dos elementos conforme item 15.7.3 da NBR 6118 [4]. O  $\gamma_z$  é calculado conforme expressão dada pela NBR 6118 [4], item 15.5.3.

A classificação da estrutura de nós fixos ocorre quando  $\gamma_z \leq 1,1$ . Para valores de  $\gamma_z > 1,1$ , a estrutura é classificada como de nós móveis, sendo obrigatória a consideração dos efeitos de segunda ordem.

Os efeitos de segunda ordem podem ser estimados aplicando-se o coeficiente  $\gamma_z$ , desde que respeitados os limites de aplicação. Não há um consenso entre os autores quanto a definição desse limite. Franco e Vasconcelos (1991 apud [3] e [11]) estabeleceram o limite

de 1,2 para validade do  $\gamma_z$  como estimador dos esforços de segunda ordem. Pinto et al. [12] indicam um valor intermediário de 1,25 como limite aceitável. Carmo [13] ressalta que o limite pode ser avançado de 1,2 para 1,3. A NBR 6118 [4], no item 15.7.2, adota o valor limite de 1,3. No entanto, segundo Vieira et al. [14], em estudos sobre o coeficiente  $\gamma_z$  e o fator de carga crítica de flambagem, o emprego do coeficiente  $\gamma_z$  é ineficiente quando o modo mais crítico é de torção. A quantificação dos esforços de segunda ordem de forma aproximada, por meio do coeficiente  $\gamma_z$ , consiste na avaliação dos esforços finais, primeira mais segunda ordem, majorando-se os esforços horizontais da combinação de carregamento considerada por  $0,95\gamma_z$ . Este procedimento consta na NBR 6118 [4] no item 15.7.2 e é aplicável quando se atende ao limite estabelecido de  $\gamma_z \leq 1,3$ . Ressalta-se que o  $\gamma_z$  somente pode ser aplicado a estruturas de edifícios com quatro ou mais pavimentos. Nos casos em que o edifício possui menos de quatro pavimentos, recomenda-se que a estabilidade global seja avaliada pelo parâmetro de instabilidade  $\alpha$  e o cálculo dos esforços de segunda ordem globais sejam avaliados pelo processo P-Delta [3].

### 6. Não linearidade física

A não linearidade física está relacionada às propriedades mecânicas dos materiais. Define-se como não linearidade física a perda da proporcionalidade entre a tensão aplicada ao material e a deformação resultante [15]. O concreto é um material tipicamente não linear, pois fatores como a formação e aberturas de fissuras que ocorrem com o aumento das sollicitações e sua própria constituição de materiais de diferentes comportamentos implicam em uma curva tensão-formação não linear. O módulo de rigidez à flexão longitudinal do concreto (E) não se mantém constante para os níveis de tensão aplicada, assim como a inércia da seção ( $I_c$ ) é reduzida pelas fissuras do material. Na Figura 4, ilustram-se os diagramas tensão versus deformação do concreto. Na parte (a), observa-se uma condição idealizada, na qual o concreto se comporta de maneira linear. Em contrapartida, na parte (b), representa-se o comportamento não linear do concreto, situação a qual o concreto se comporta quando sollicitado. A não linearidade física do concreto advém do fato deste ser constituído de materiais com propriedades físicas variadas, formando um material anisotrópico, heterogêneo, com módulo de elasticidade que varia em cada

ponto da curva do diagrama de tensão-deformação [16]. Há uma necessidade de se determinar com exatidão os deslocamentos horizontais que ocorrem nas estruturas de edifícios de concreto armado, pois os esforços de segunda ordem são bem avaliados quando a configuração geométrica final da estrutura é determinada de forma satisfatória. Sabe-se que a rigidez dos elementos estruturais interfere nos deslocamentos sofridos pela estrutura e, buscando-se melhores repostas quanto a deslocabilidade da estrutura, deve-se determinar a rigidez por meio de processos que considerem a não linearidade física dos materiais constituintes da estrutura [17]. No item 15.7.3 da NBR 6118 [4] é descrito um processo aproximado para consideração da não linearidade física nas análises globais de segunda ordem, que consiste na redução da rigidez dos elementos estruturais.

As rigidezes de vigas e pilares podem assumir o valor  $EI_{sec} = 0,7 E_c I_c$  igual para ambos, desde que a estrutura de contraventamento da edificação seja composta exclusivamente por vigas e pilares, sem a presença de núcleos rígidos, geralmente compostos por pilares-parede, e que seja respeitado o limite de  $\gamma_z < 1,3$  [10].

### 7. Critérios de flexibilização do pórtico espacial do TQS©

O pórtico espacial gerado no software TQS© é um modelo reticulado, composto por barras de vigas e pilares, no qual as ligações entre as barras das vigas e dos pilares podem ou não ser flexibilizadas. Os critérios do software permitem estabelecer a rigidez dessas ligações, transformando-as em engastes, articulações ou ligações semirrígidas.

As flexibilizações do pórtico são impostas pela simulação de “molas” inseridas entre as barras das vigas e dos pilares. As rigidezes dessas molas são calculadas tomando-se o coeficiente de rigidez de uma barra biengastada quando mobilizada por uma rotação de valor unitário no engaste. Dessa forma, a mola tem rigidez  $K$  igual a:

$$K = \frac{4EI}{L} \tag{1}$$

em que E é o módulo de elasticidade longitudinal do material do pilar, I é o momento de inércia de uma seção do pilar que efetivamente será considerada na rigidez da ligação e L é comprimento

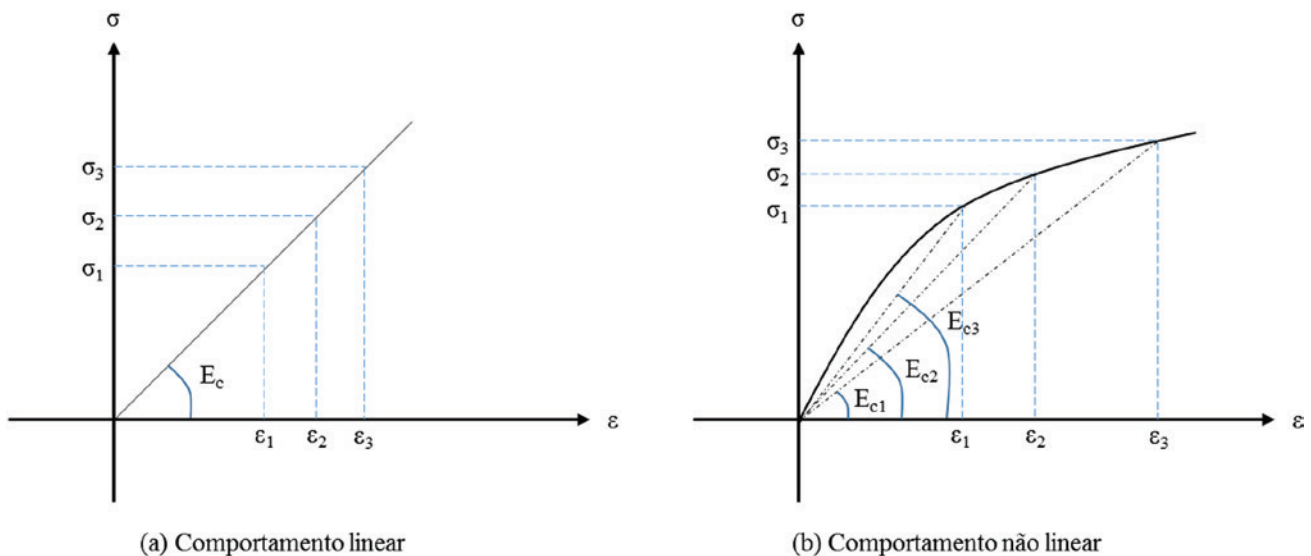
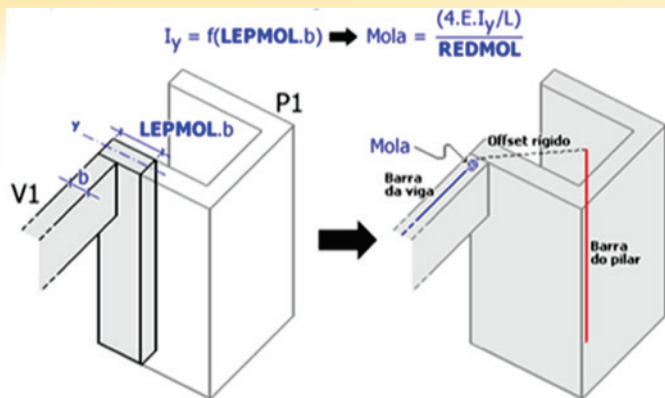


Figura 4 Diagrama tensão deformação do concreto

Source: Autor (2016)



**Figura 5**  
Ilustração dos procedimentos de consideração dos critérios LPMOL e REDMOL

Source: Manuais TQS® (2017)

do lance de pilar.

No software, permite-se ponderar a rigidez dessas “molas” por

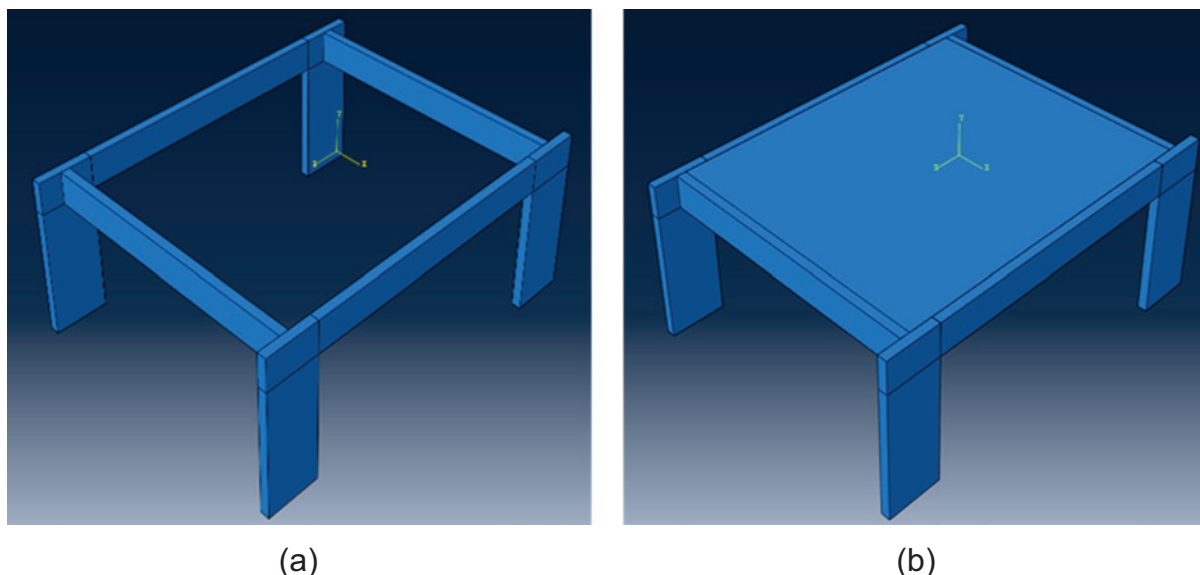
meio de dois critérios: LPMOL e REDMOL. O primeiro é o fator que multiplica a largura da viga resultando na largura da seção equivalente do pilar para cálculo do momento de inércia. O segundo é um fator que modifica a rigidez K da “mola”. Esses dois parâmetros permitem aos usuários fazerem ponderações sobre a flexibilização das ligações. A Figura 5 ilustra o processo de utilização do LPMOL e REDMOL. A rigidez da “mola” considerada no software TQS© então dada por:

$$I_y = \frac{(LPMOL \cdot b)^3}{12} = \frac{LPMOL \cdot b^4}{12} \tag{2}$$

em que  $I_y$  é o momento de inércia calculado considerando o fator LPMOL.

## 8. Características dos modelos analisados

Neste trabalho, analisam-se 12 modelos de pórticos tridimensionais, os quais estão divididos em modelos de pórticos sem a presença de lajes e pórticos com a presença das lajes, conforme apresentado na Tabela 1. As bases dos modelos geométricos encontram-se na Figura 6. Na parte (a) da figura, tem-se a estrutura base para os

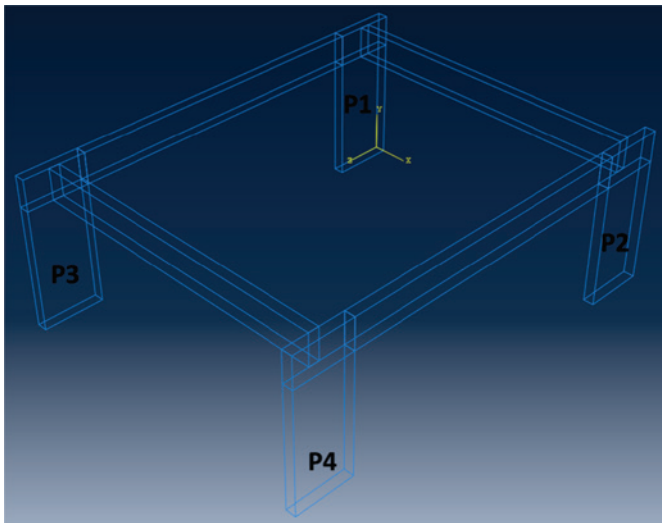


**Figura 6**  
Apresentação dos modelos: (a) estrutura base para composição dos modelos sem lajes e (b) estrutura base para composição dos modelos com lajes

**Tabela 1**  
Identificação dos modelos utilizados

Modelos	Descrição
MP3DSL1	Modelo de pórtico tridimensional sem laje com 1 pavimento
MP3DSL2	Modelo de pórtico tridimensional sem laje com 2 pavimentos
MP3DSL3	Modelo de pórtico tridimensional sem laje com 3 pavimentos
MP3DSL4	Modelo de pórtico tridimensional sem laje com 4 pavimentos
MP3DSL5	Modelo de pórtico tridimensional sem laje com 5 pavimentos
MP3DSL6	Modelo de pórtico tridimensional sem laje com 6 pavimentos
MP3DL1	Modelo de pórtico tridimensional com laje com 1 pavimento
MP3DL2	Modelo de pórtico tridimensional com laje com 2 pavimentos
MP3DL3	Modelo de pórtico tridimensional com laje com 3 pavimentos
MP3DL4	Modelo de pórtico tridimensional com laje com 4 pavimentos
MP3DL5	Modelo de pórtico tridimensional com laje com 5 pavimentos
MP3DL6	Modelo de pórtico tridimensional com laje com 6 pavimentos

Fonte: Autor (2017)



**Figura 7**  
Sistema de coordenadas adotado e identificação dos pilares-parede

modelos sem lajes, assim como na parte (b) para os modelos com lajes. Os modelos (com ou sem lajes) com mais de 1 pavimento são compostos por repetições verticais das respectivas bases apresentadas, conforme o número de pavimentos do modelo.

Os modelos adotados são constituídos por lajes, vigas e pilares-parede. Dentro do sistema computacional Abaqus®, os elementos são conectados com o auxílio da ferramenta Constraints/connections para montagem dos pórticos. O sistema de coordenadas adotado é ortogonal e referenciado como indicado na Figura 7. O eixo Y representa a direção vertical e os eixos X e Z compõem o plano no qual os pilares-parede são engastados. Nesta mesma figura, indica-se a nomenclatura dos pilares-parede, numerados de 1 a 4.

As características geométricas dos elementos estruturais utilizados na composição dos modelos são definidas semelhantes às de estruturas usuais de concreto. As vigas são definidas com seção transversal de 0,20 m x 0,60 m e comprimento de 6,00 m. Os

pilares-parede são definidos com seção transversal de 0,20 m x 1,20 m e comprimento do lance de 3,00 m. As dimensões das lajes no plano são 6,00 m x 7,00 m e espessura de 0,15 m.

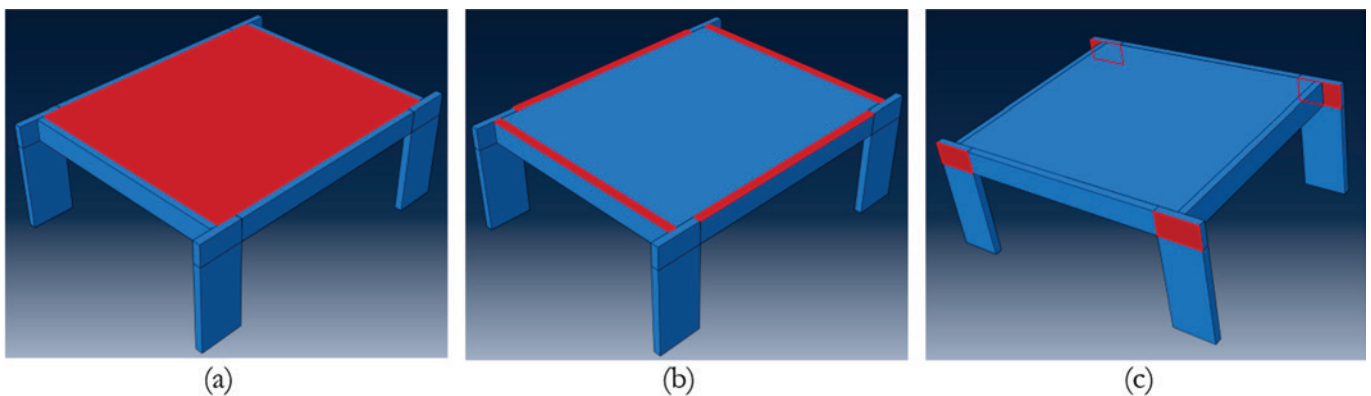
Os modelos são discretizados em malhas de elementos finitos para as simulações no Abaqus®. As vigas e os pilares-parede são discretizados com malhas geradas por subdivisões de 0,05 m e as lajes com subdivisões de 0,10 m. Os elementos finitos utilizados em todos os modelos são os elementos cúbicos lineares de 8 nós com integração completa (C3D8 do Abaqus®).

O material de constituição dos modelos é o concreto com resistência característica a compressão aos 28 dias  $f_{ck} = 25,0$  MPa, módulo de elasticidade longitudinal  $E_{ci} = 28.000,0$  MPa e coeficiente de Poisson  $\nu = 0,20$ . A não linearidade física, referente ao material concreto, é considerada de forma aproximada nas simulações dos modelos seguindo a recomendação normativa indicada no item 15.7.3 da NBR 6118 [4].

As cargas aplicadas aos modelos são aquelas utilizadas em uma edificação comum de concreto armado, além do peso próprio da estrutura. Consideram-se cargas horizontais de vento atuando sobre os pilares-parede e cargas verticais permanentes e acidentais sobre as vigas e lajes.

As superfícies de aplicação das cargas verticais e horizontais estão indicadas na Figura 8, na qual o modelo MP3DL1 é a referência. Nas partes (a) e (b) da Figura 8, observam-se as superfícies de aplicação das cargas verticais, correspondentes às superfícies dos topos de cada laje e viga dos modelos. Na parte (c), observam-se as superfícies de aplicação das cargas horizontais de vento sobre os pilares-parede. Nota-se que as superfícies de aplicação das cargas horizontais de vento correspondem àquelas referentes à parte superior de cada lance de pilar, região retangular de interseção com as vigas. Nos modelos com mais pavimentos, basta apenas aplicar os mesmos carregamentos verticais em todos os pavimentos e adaptar as cargas de vento de acordo com a altura. Nos modelos sem lajes, as cargas das lajes removidas são somadas às cargas de mesma categoria já existentes nas vigas de forma uniforme, ou seja, as cargas totais aplicadas aos modelos com lajes são mantidas nos modelos sem lajes.

AA magnitude das cargas verticais aplicadas sobre as superfícies



**Figura 8**  
Indicação das superfícies de aplicação de cargas verticais e horizontais sobre os elementos estruturais dos modelos: (a) vertical sobre as lajes, (b) vertical sobre as vigas e (c) horizontal nos pilares-parede

**Tabela 2**

Magnitude das cargas verticais utilizadas nos modelos

Superfícies dos elementos	Modelos com lajes			Modelos sem lajes		
	PP (kN/m <sup>2</sup> )	PERM (kN/m <sup>2</sup> )	ACID (kN/m <sup>2</sup> )	PP (kN/m <sup>2</sup> )	PERM (kN/m <sup>2</sup> )	ACID (kN/m <sup>2</sup> )
Lajes	3,750	1,500	2,000	-	-	-
Vigas	15,000	23,400	-	47,813	36,525	17,500

Fonte: Autor (2017)

**Tabela 3**

Magnitude das cargas horizontais aplicadas sobre as superfícies dos pilares-parede

Pavimentos	MP3DL1 e MP3DSL1	MP3DL2 e MP3DSL2	MP3DL3 e MP3DSL3	MP3DL4 e MP3DSL4	MP3DL5 e MP3DSL5	MP3DL6 e MP3DSL6
	VENTO (kN/m <sup>2</sup> )	VENTO (kN/m <sup>2</sup> )	VENTO (kN/m <sup>2</sup> )	VENTO (kN/m <sup>2</sup> )	VENTO (kN/m <sup>2</sup> )	VENTO (kN/m <sup>2</sup> )
1° PAV	3,083	6,958	7,333	7,667	7,917	8,042
2° PAV	-	2,542	5,500	5,750	5,917	6,000
3° PAV	-	-	2,833	6,042	6,208	6,125
4° PAV	-	-	-	3,083	6,458	6,542
5° PAV	-	-	-	-	3,292	6,750
6° PAV	-	-	-	-	-	3,417

Fonte: Autor (2017)

**Tabela 4**

Fatores para redução das cargas na combinação ELS/CFREQ

Cargas	PP	PERM	ACID	VENT
Fator de multiplicação	1,00	1,00	0,30	0,30

Fonte: Autor (2017)

indicadas na Figura 8, partes (a) e (b), em cada pavimento dos modelos, estão apresentadas na Tabela 2, em que PP, PERM e ACID, significam cargas devidas ao peso próprio, cargas permanentes e cargas acidentais, respectivamente.

As cargas horizontais de vento possuem magnitude diferentes em cada pavimento e também variam com a quantidade de pavimentos do modelo. O carregamento horizontal é aplicado na direção do eixo X, sentido positivo, sobre as superfícies dos quatro pilares-parede indicadas na Figura 8, item (c). As magnitudes das cargas horizontais estão organizadas na Tabela 3. Ressalta-se que as cargas horizontais de vento são iguais para os modelos com lajes e sem lajes. A magnitude dessas cargas leva em consideração a Combinação de Estado Limite de Serviço Freqüente (ELS/FREQ), conforme Tabela 4, uma vez que os deslocamentos obtidos nas simulações no Abaqus® são comparados aos obtidos no CAD/TQS® com os modelos reticulados considerando-se a mesma combinação.

O procedimento das simulações em cada modelo é realizado como se segue: para cada coordenada apresentada na Tabela 5 são realizadas simulações nos modelos com lajes e sem lajes de 1 a 6 pavimentos e para cada simulação anotam-se os resultados de deslocamentos horizontais do pórtico na direção do eixo X no topo do eixo do pilar de maior deslocamento. O eixo do pilar-parede é representado pela coordenada 0,0 na Tabela 5 e coordenada 0,50 m a posição em que a face da viga alinha-se com a face do pilar-parede. Ilustra-se na Figura 9 a variação da excentricidade da viga em relação ao eixo do pilar-parede. Na parte (a), tem-se o eixo da viga alinhado ao eixo do pilar-parede. Na parte (b), tem-se o eixo em

uma posição intermediária, entre o eixo e a face do pilar-parede. E, por fim, na parte (c), tem-se o alinhamento das bordas da viga e do pilar-parede.

## 9. Análise comparativa dos modelos sem lajes e com lajes

Os resultados das simulações são os deslocamentos horizontais na direção e sentido positivo do eixo X ( $U_x$ ) capturados no topo do

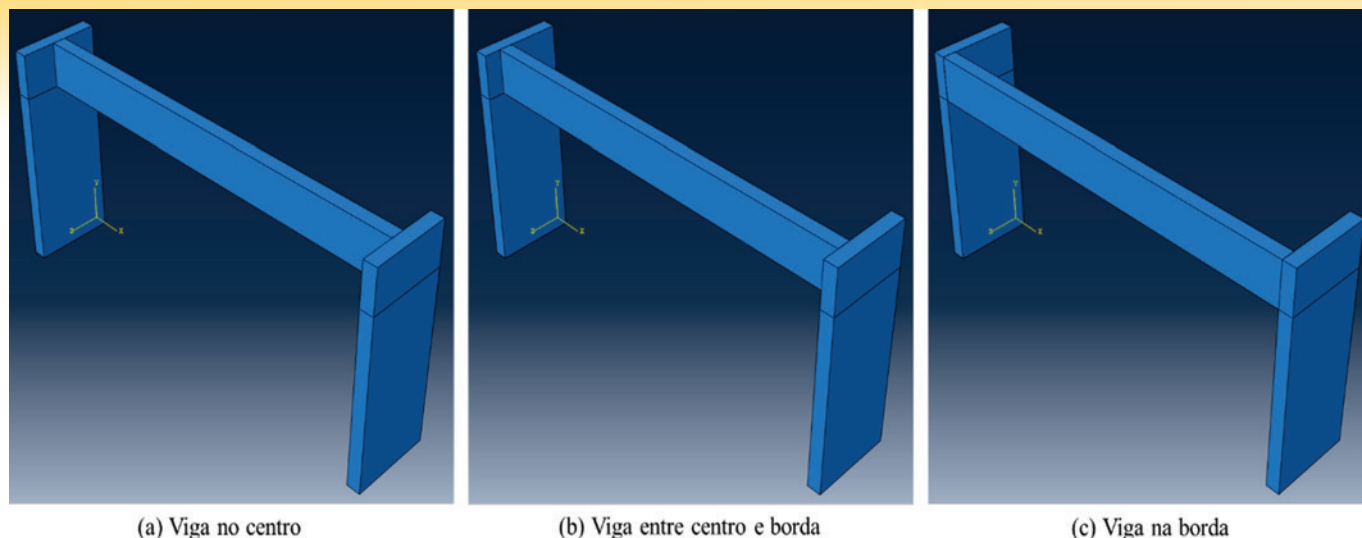
**Tabela 5**

Excentricidade do eixo da viga em relação ao eixo do pilar-parede em cada simulação

Simulation	e (m)
1	0,0
2	0,05
3	0,10
4	0,15
5	0,20
6	0,25
7	0,30
8	0,35
9	0,40
10	0,45
11	0,50

Fonte: Autor (2017)





**Figura 9**  
Ilustração da excentricidade das vigas em relação aos pilares-parede

eixo do pilar-parede de maior deslocamento de cada modelo. O procedimento adotado para as simulações implicou deslocamentos maiores sempre para o pilar-parede P1, indicado na Figura 7. Os dados obtidos nas simulações estão na sequência da Tabela 6 a Tabela 11, nas quais as siglas DPRDA e DPA, significam Diferen-

ça Percentual em Relação ao Deslocamento Anterior e Diferença Percentual Acumulada, respectivamente, e são calculadas conforme expressões seguintes:

$$K_{mola} = \frac{4EI_y}{L \cdot REDMOL} \tag{3}$$

**Tabela 6**  
Resultados das simulações dos modelos MP3DSL1 e MP3DL1

Simulação	e (cm)	MFS3DWSL1			MFS3DSL1		
		U <sub>1</sub> (m)	DPRDA	DPA	U <sub>1</sub> (m)	DPRDA	DPA
1	0,0	0,00076	0,00%	0,00%	0,00051	0,00%	0,00%
2	0,05	0,00076	-0,12%	-0,12%	0,00052	0,23%	0,23%
3	0,10	0,00076	0,08%	-0,05%	0,00052	0,08%	0,31%
4	0,15	0,00077	0,31%	0,26%	0,00052	-0,11%	0,20%
5	0,20	0,00077	0,63%	0,90%	0,00051	-0,25%	-0,06%
6	0,25	0,00078	1,08%	1,98%	0,00051	-0,23%	-0,29%
7	0,30	0,00079	1,58%	3,60%	0,00051	-0,08%	-0,37%
8	0,35	0,00081	2,08%	5,75%	0,00051	0,11%	-0,26%
9	0,40	0,00083	2,56%	8,45%	0,00051	0,34%	0,08%
10	0,45	0,00085	3,01%	11,71%	0,00052	0,60%	0,68%
11	0,50	0,00088	3,20%	15,29%	0,00052	1,20%	1,89%

Fonte: Autor (2017)

**Tabela 7**  
Resultados das simulações dos modelos MP3DSL2 e MP3DL2

Simulação	e (cm)	MFS3DWSL2			MFS3DSL2		
		U <sub>1</sub> (m)	DPRDA	DPA	U <sub>1</sub> (m)	DPRDA	DPA
1	0,0	0,00204	0,00%	0,00%	0,00154	0,00%	0,00%
2	0,05	0,00204	0,21%	0,21%	0,00155	0,43%	0,43%
3	0,10	0,00205	0,36%	0,57%	0,00156	0,53%	0,97%
4	0,15	0,00206	0,53%	1,10%	0,00157	0,63%	1,60%
5	0,20	0,00207	0,76%	1,87%	0,00158	0,75%	2,36%
6	0,25	0,00210	1,05%	2,94%	0,00159	0,94%	3,32%
7	0,30	0,00213	1,40%	4,38%	0,00161	1,18%	4,54%
8	0,35	0,00216	1,78%	6,24%	0,00163	1,46%	6,06%
9	0,40	0,00221	2,21%	8,59%	0,00166	1,77%	7,94%
10	0,45	0,00227	2,69%	11,51%	0,00170	2,13%	10,23%
11	0,50	0,00235	3,47%	15,38%	0,00174	2,78%	13,30%

Fonte: Autor (2017)

em que  $U_{1,i}$  é o deslocamento da linha atual, deslocamento para a excentricidade atual da viga;  $U_{1,i-1}$  é o deslocamento da linha anterior, deslocamento para a excentricidade anterior da viga e

$U_{1,1}$  é o deslocamento da linha inicial, deslocamento para a viga na posição inicial, sem excentricidade.

Em cada modelo analisado, verifica-se a influência da flexibilidade

**Tabela 8**

Resultados das simulações dos modelos MP3DSL3 e MP3DL3

Simulação	e (cm)	MFS3DWSL3			MFS3DSL3		
		$U_1$ (m)	DPRDA	DPA	$U_1$ (m)	DPRDA	DPA
1	0,0	0,00468	0,00%	0,00%	0,00360	0,00%	0,00%
2	0,05	0,00471	0,45%	0,45%	0,00363	0,66%	0,66%
3	0,10	0,00474	0,65%	1,09%	0,00366	0,85%	1,51%
4	0,15	0,00478	0,86%	1,96%	0,00370	1,04%	2,57%
5	0,20	0,00483	1,10%	3,09%	0,00374	1,25%	3,85%
6	0,25	0,00490	1,39%	4,52%	0,00380	1,48%	5,39%
7	0,30	0,00498	1,71%	6,31%	0,00386	1,77%	7,25%
8	0,35	0,00508	2,07%	8,51%	0,00394	2,06%	9,46%
9	0,40	0,00521	2,47%	11,19%	0,00404	2,41%	12,09%
10	0,45	0,00536	2,94%	14,46%	0,00415	2,79%	15,22%
11	0,50	0,00557	3,95%	18,99%	0,00430	3,54%	19,30%

Fonte: Autor (2017)

**Tabela 9**

Resultados das simulações dos modelos MP3DSL4 e MP3DL4

Simulação	e (cm)	MFS3DWSL4			MFS3DSL4		
		$U_1$ (m)	DPRDA	DPA	$U_1$ (m)	DPRDA	DPA
1	0,0	0,00910	0,00%	0,00%	0,00700	0,00%	0,00%
2	0,05	0,00915	0,58%	0,58%	0,00706	0,81%	0,81%
3	0,10	0,00922	0,80%	1,38%	0,00713	1,05%	1,88%
4	0,15	0,00932	1,04%	2,43%	0,00722	1,28%	3,18%
5	0,20	0,00944	1,29%	3,76%	0,00733	1,53%	4,76%
6	0,25	0,00959	1,58%	5,40%	0,00746	1,79%	6,64%
7	0,30	0,00977	1,91%	7,41%	0,00762	2,09%	8,87%
8	0,35	0,00999	2,26%	9,84%	0,00780	2,40%	11,48%
9	0,40	0,01026	2,67%	12,78%	0,00802	2,77%	14,57%
10	0,45	0,01058	3,15%	16,33%	0,00827	3,16%	18,19%
11	0,50	0,01104	4,27%	21,30%	0,00860	3,98%	22,90%

Fonte: Autor (2017)

**Tabela 10**

Resultados das simulações dos modelos MP3DSL5 e MP3DL5

Simulação	e (cm)	MFS3DWSL5			MFS3DSSourceL5		
		$U_1$ (m)	DPRDA	DPA	$U_1$ (m)	DPRDA	DPA
1	0,0	0,01542	0,00%	0,00%	0,01187	0,00%	0,00%
2	0,05	0,01552	0,66%	0,66%	0,01198	0,92%	0,92%
3	0,10	0,01566	0,89%	1,56%	0,01213	1,18%	2,11%
4	0,15	0,01584	1,14%	2,72%	0,01230	1,42%	3,57%
5	0,20	0,01606	1,41%	4,16%	0,01251	1,70%	5,33%
6	0,25	0,01633	1,70%	5,93%	0,01275	1,96%	7,40%
7	0,30	0,01666	2,02%	8,07%	0,01304	2,29%	9,86%
8	0,35	0,01706	2,39%	10,65%	0,01338	2,60%	12,71%
9	0,40	0,01754	2,80%	13,75%	0,01378	2,99%	16,08%
10	0,45	0,01812	3,29%	17,49%	0,01425	3,39%	20,01%
11	0,50	0,01892	4,46%	22,73%	0,01486	4,28%	25,14%

Fonte: Autor (2017)

**Tabela 11**

Resultados das simulações dos modelos MP3DSL6 e MP3DL6

Simulação	e (cm)	MFS3DWSL6			MFS3DSL6		
		U <sub>1</sub> (m)	DPRDA	DPA	U <sub>1</sub> (m)	DPRDA	DPA
1	0,0	0,02349	0,00%	0,00%	0,01800	0,00%	0,00%
2	0,05	0,02366	0,71%	0,71%	0,01818	0,99%	0,99%
3	0,10	0,02389	0,96%	1,68%	0,01841	1,26%	2,27%
4	0,15	0,02418	1,21%	2,91%	0,01869	1,52%	3,82%
5	0,20	0,02454	1,48%	4,44%	0,01902	1,80%	5,69%
6	0,25	0,02497	1,78%	6,30%	0,01942	2,08%	7,89%
7	0,30	0,02550	2,11%	8,53%	0,01988	2,40%	10,48%
8	0,35	0,02613	2,47%	11,22%	0,02042	2,72%	13,49%
9	0,40	0,02688	2,89%	14,43%	0,02106	3,11%	17,02%
10	0,45	0,02779	3,39%	18,30%	0,02180	3,52%	21,13%
11	0,50	0,02907	4,58%	23,72%	0,02276	4,39%	26,45%

Fonte: Autor (2017)

gerada pela excentricidade da viga nos deslocamentos horizontais. Das Tabela 6 a Tabela 11, observa-se nas colunas referentes às DPAs o percentual de crescimento dos deslocamentos à medida que a viga se torna mais excêntrica em relação a sua posição inicial. O crescimento dos deslocamentos se intensifica quanto maior a quantidade de pavimentos do modelo. As diferenças entre U<sub>1</sub> medido com a viga na posição inicial e = 0,0 e na posição final e = 0,50 m saem de 15,29%/1,89% (sem laje/com laje) nos modelos com 1 pavimento e chegam a 23,72%/26,45% (sem laje/com laje) nos modelos com 6 pavimentos.

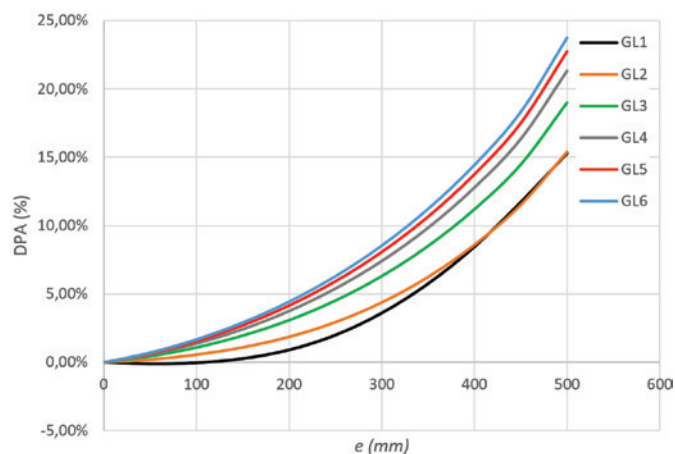
Os gráfico das Figuras 10 e Figura 11 apresentam as curvas de crescimento dos deslocamentos obtidos para os 6 modelos sem lajes e 6 modelos com lajes. Ressalta-se que o crescimento não é linear e se intensifica a medida que a posição da viga se aproxima da borda do pilar-parede.

Os deslocamentos aumentam de maneira não linear quando comparados ao deslocamento da simulação anterior. Observa-se que as colunas referentes a DPRDA da Tabela 6 a Tabela 11 contém

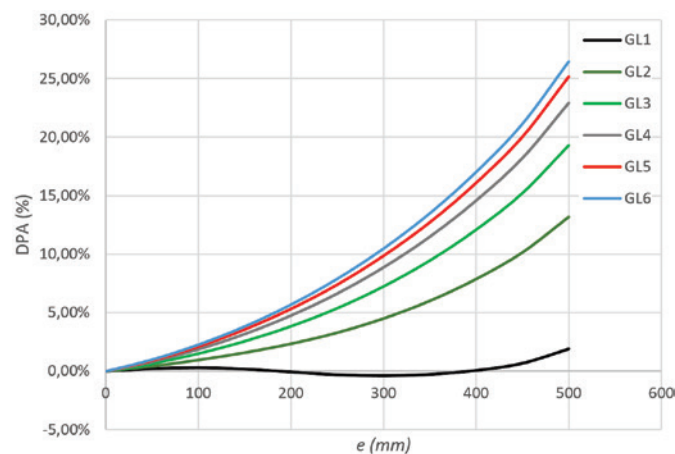
valores mais elevados nas simulações finais, implicando em aumentos de deslocamentos mais elevados quando as excentricidades das vigas se aproximam das bordas dos pilares-parede.

A inclusão das lajes contribuem de forma relevante para o enrijecimento dos modelos, aumentando a rigidez das vigas, constituindo vigas em forma de “L” invertido. A redução dos deslocamentos horizontais no topo do eixo dos pilares-parede é significativa, como se observa na sequência da Tabela 6 a Tabela 11. Os deslocamentos absolutos U<sub>1</sub> são sempre inferiores para os modelos com lajes, indicando que os modelos sem lajes são menos rígidos que os modelos com lajes.

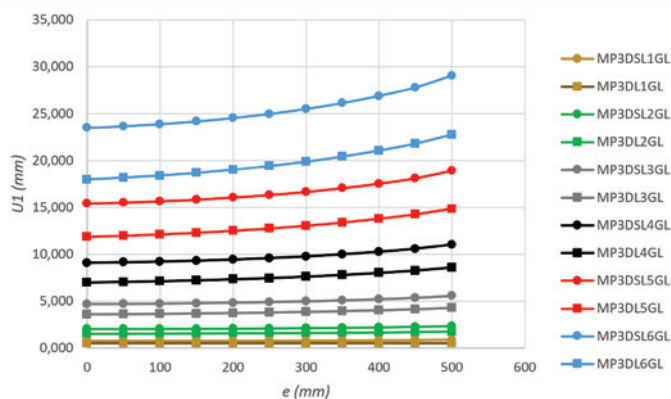
O sistema de contraventamento nos modelos com lajes é mais robusto, pois conta com a rigidez a flexão da laje, que embora pequena quando comparada às rigidezes das vigas e pilares, contribui bastante para a estabilidade dos modelos nas simulações realizadas. Goulart [18] constatou a significativa contribuição das lajes para a estabilidade das edificações, conseguindo reduzir o coeficiente  $\gamma_z$  significativamente quando a contribuição das lajes é



**Figura 10**  
Curvas das diferenças percentuais acumuladas das 11 simulações dos modelos MP3DSL1 a MP3DSL6



**Figura 11**  
Curvas das diferenças percentuais acumuladas das 11 simulações dos modelos MP3DL1 a MP3DL6



**Figura 12**  
Deslocamentos de todos os modelos

considerada, mesmo com a redução da rigidez para consideração da não linearidade física.

No gráfico da Figura 12 tem-se as curvas dos deslocamentos dos modelos com e sem lajes de 1 a 6 pavimentos. Com isso, é pos-

sível constatar que, comparando-se os modelos com mesmo número de pavimentos, os deslocamentos dos modelos sem lajes se afastam mais intensamente para modelos com números mais elevados de pavimentos.

A Tabela 12 agrupa os dados das reduções dos deslocamentos quando as lajes são inseridas nos modelos. Nesta tabela, compara-se, para cada excentricidade da viga, o Percentual de Redução (PR) dos deslocamentos dos modelos com lajes em relação aos modelos sem lajes. Observa-se que as reduções são maiores para modelos com menos pavimentos, reduzindo gradativamente com o aumento dos pavimentos dos modelos.

Outro resultado importante retirado dos dados da Tabela 12 é tendência de menores reduções de deslocamentos quando a excentricidade da viga aumenta em relação ao eixo do pilar-parede, reforçando a ideia da influência da instabilidade gerada pela excentricidade da viga. Observa-se, por exemplo, nos modelos com 6 pavimentos, que o PR para a viga com excentricidade  $e = 0$  é 23,4% e reduz a 21,7% para a excentricidade final da viga  $e = 0,50$  m.

Além disso, verifica-se uma tendência dos deslocamentos sempre aumentarem à medida que o número de pavimentos dos modelos

**Tabela 12**

Percentual de redução dos deslocamentos dos modelos com lajes em relação aos modelos sem lajes

e (m)	PR (%)					
	1PAV	2PAV	3PAV	4PAV	5PAV	6PAV
0,0	32,6	24,3	23,1	23,1	23,0	23,4
0,05	32,4	24,1	22,9	22,9	22,8	23,2
0,10	32,4	24,0	22,8	22,7	22,6	23,0
0,15	32,7	23,9	22,6	22,5	22,4	22,7
0,20	33,3	23,9	22,5	22,3	22,1	22,5
0,25	34,1	24,0	22,5	22,2	21,9	22,2
0,30	35,2	24,2	22,4	22,0	21,7	22,0
0,35	36,4	24,4	22,4	21,9	21,6	21,8
0,40	37,8	24,8	22,5	21,8	21,4	21,7
0,45	39,3	25,2	22,6	21,8	21,3	21,6
0,50	40,4	25,7	22,9	22,0	21,5	21,7

Fonte: Autor (2017)

**Tabela 13**

Relação entre os deslocamentos dos modelos sem lajes com i+1 pavimentos e i pavimentos

e (m)	$\frac{U_{1,2}}{U_{1,1}}$	$\frac{U_{1,3}}{U_{1,2}}$	$\frac{U_{1,4}}{U_{1,3}}$	$\frac{U_{1,5}}{U_{1,4}}$	$\frac{U_{1,6}}{U_{1,5}}$
0,0	2,67	2,30	1,94	1,69	1,52
0,05	2,68	2,31	1,94	1,70	1,52
0,10	2,69	2,31	1,95	1,70	1,53
0,15	2,69	2,32	1,95	1,70	1,53
0,20	2,69	2,33	1,95	1,70	1,53
0,25	2,69	2,34	1,96	1,70	1,53
0,30	2,69	2,34	1,96	1,71	1,53
0,35	2,68	2,35	1,97	1,71	1,53
0,40	2,67	2,36	1,97	1,71	1,53
0,45	2,66	2,36	1,97	1,71	1,53
0,50	2,67	2,37	1,98	1,72	1,54

Fonte: Autor (2017)

Tabela 14

Valores de  $\alpha$ ,  $\gamma_z$  e LEPMOL para o modelo MP3DSL6

e (m)	Análises geometricamente lineares				
	$U_{1,A}$ (m)	LEPMOL	$U_{1,T}$ (m)	$\alpha$	$\gamma_z$
0,0	0,0235	6,00	0,0245	0,651	1,102
0,05	0,0237	6,00	0,0245	0,649	1,102
0,10	0,0239	6,00	0,0245	0,651	1,102
0,15	0,0242	6,00	0,0245	0,651	1,102
0,20	0,0245	6,00	0,0245	0,651	1,102
0,25	0,0250	5,85	0,0250	0,654	1,103
0,30	0,0255	5,60	0,0255	0,659	1,105
0,35	0,0261	5,35	0,0261	0,664	1,106
0,40	0,0269	5,01	0,0269	0,672	1,109
0,45	0,0278	4,70	0,0278	0,680	1,112
0,50	0,0291	4,30	0,0291	0,691	1,116

Fonte: Autor (2017)

umenta, no entanto, o aumento do deslocamento é decrescente, ou seja, a relação entre o deslocamento do modelo com número  $i+1$  de pavimentos e o deslocamento do modelo com número  $i$  de pavimentos decresce com o aumento do número de pavimentos, conforme Tabela 13. Ressalta-se que os deslocamentos utilizados para esta verificação são dos modelos sem lajes, mas que o mesmo padrão ocorre para os modelos com lajes. Mais uma vez, percebe-se o efeito da instabilidade gerada pela excentricidade da viga, pois a relação  $U_{i+1}/U_i$  é maior quando a viga é mais excêntrica, indicando decrescimento mais lento para as posições mais excêntricas da viga.

## 10. Parâmetro $\alpha$ , coeficiente $\gamma_z$ e critérios de flexibilização do pórtico TQS©

Os parâmetros de estabilidade são obtidos com o auxílio do software TQS© UNIPRO12 VERSÃO 19.10 considerando o modelo IV, no qual apenas vigas e pilares contribuem para rigidez do mo-

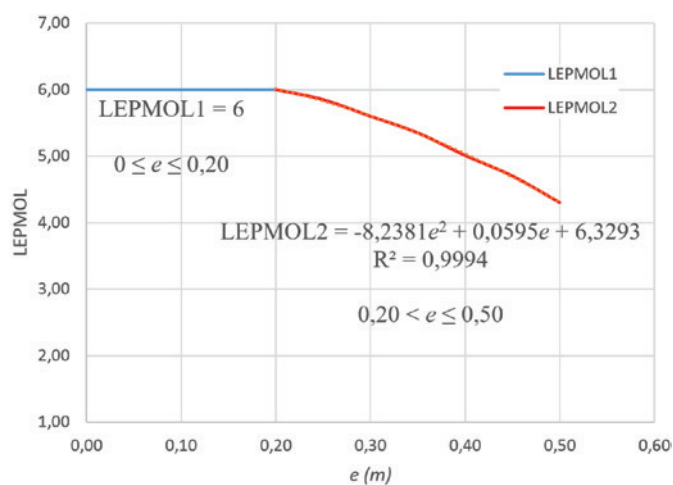


Figura 13

Curva de LEPMOL em função da excentricidade da viga

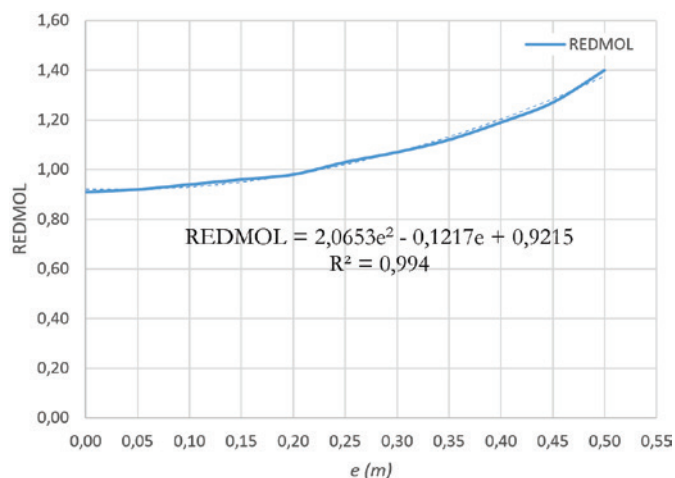
delo reticulado. Os parâmetros de estabilidade são anotados após calibragem dos critérios de flexibilização LEPMOL e REDMOL do TQS© utilizando os resultados do Abaqus©. LEPMOL e REDMOL, em separado, são modificados até os deslocamentos no TQS© igualarem aos deslocamentos obtidos com o Abaqus©. O modelo utilizado para calibragem do LEPMOL e REDMOL é o modelo MP3DSL6 com simulações GLs, pelo fato da maior quantidade de pavimentos e também por possuir apenas pilares e vigas contribuindo para a rigidez, semelhante ao modelo IV do TQS©.

Os critérios de flexibilização das ligações entre vigas e pilares, LEPMOL e REDMOL, estão ligados ao momento de inércia do pilar que realmente contribui para a rigidez da ligação e um fator que reduz a rigidez da mola que representa a ligação viga-pilar, respectivamente, conforme já apresentado na Figura 5.

Diante do exposto, apresenta-se na Tabela 14 os valores obtidos de LEPMOL para cada excentricidade da viga no modelo MP3DSL6 com análises geometricamente lineares. Tem-se ainda, na mesma tabela, os valores de  $\alpha$  e  $\gamma_z$  anotados para cada calibragem de LEPMOL. Os valores de LEPMOL são obtidos mantendo-se todos os demais critérios do TQS© invariáveis, inclusive REDMOL, que é mantido com valor fixo de 1,0.  $U_{1,A}$  e  $U_{1,T}$  significam, respectivamente, deslocamentos horizontais obtidos no Abaqus© e deslocamentos horizontais obtidos no TQS©.

De acordo com a Tabela 14, a calibragem de LEPMOL não é suficiente para igualar os deslocamentos do TQS© aos do Abaqus© nas primeiras excentricidades da viga. Nota-se que mesmo utilizando o valor máximo para LEPMOL, que é de 6 vezes a largura da viga (igual à largura do pilar-parede), o deslocamento mínimo no TQS© é de 0,0245 m.

Utilizando os dados da Tabela 14, construiu-se o gráfico da Figura 13, referente à curva de LEPMOL. O gráfico é composto por dois trechos: o primeiro é constante e recebe a denominação de LEPMOL1 e o segundo recebe a denominação de LEPMOL2. Há também uma equação estimativa de LEPMOL para cada trecho em função da excentricidade da viga. Ressalta-se que a equação é um ajuste obtido no software Excel 2013 com aproximação satisfatória, como sugere o coeficiente  $R^2$ , indicando que a curva do ajuste se aproxima da curva real quando seu valor se aproxima de 1,0.



**Figura 14**  
Curva de REDMOL em função da excentricidade da viga

O critério de flexibilização REDMOL também é calibrado para cada excentricidade da viga. REDMOL é obtido considerando-se o valor de LEPMOL que utilizasse toda a seção do pilar, LEPMOL igual a 6, e os demais critérios do TQS© invariáveis. Apresentam-se na Tabela 15 os valores de REDMOL,  $\alpha$  e  $\gamma_z$  obtidos para o modelo MP3DSL6 com simulações GLs.

No gráfico da Figura 14, tem-se a curva de REDMOL e uma equação equivalente, obtida também no Excel 2013 por meio um ajuste de um polinômio do segundo grau.

O decréscimo da equação de LEPMOL indica que seus valores tendem a diminuir à medida que os deslocamentos crescem. Dessa forma, a tendência é que para pórticos com mais pavimentos se encontrem valores ainda menores para este critério. Já os valores de REDMOL crescem com o crescimento dos deslocamentos, indicando uma tendência de crescimento para pórticos com maiores números de pavimentos.

Outra observação importante a respeito de LEPMOL é que ele

influencia apenas a rigidez da ligação, não reduzindo a inércia da barra que representa o pilar no pórtico, ou seja, é considerada a rigidez integral da seção transversal do pilar no modelo reticulado do TQS©. A seção do pilar é modificada por LEPMOL apenas para ponderação da rigidez da “mola”.

As equações de LEPMOL e REDMOL são aproximações e possuem diversas limitações, pois os deslocamentos e estabilidade do modelo no TQS© dependem de vários outros critérios que podem ser calibrados para uma representação mais real da estrutura.

Os parâmetros de estabilidade para o modelo analisado estão nas Tabela 14 e Tabela 15, para calibragem de LEPMOL e REDMOL, respectivamente. O parâmetro  $\alpha$  é sempre superior ao valor de referência para estruturas contraventadas por pórticos de pilares paredes, que é  $\alpha = 0,6$ . Este parâmetro indica que a estrutura é sempre de nós móveis, para qualquer excentricidade da viga no modelo considerado (MP3DSL6).

Já o parâmetro  $\gamma_z$  indica estrutura de nós móveis para qualquer excentricidade da viga quando a calibragem é realizada para LEPMOL. Ao se calibrar o critério REDMOL,  $\gamma_z$  apresenta, para as excentricidades iniciais, valores abaixo do limite para estruturas de nós móveis, valores abaixo de 1,10. A partir da excentricidade  $e = 0,15$  m os valores de  $\gamma_z$ , superiores a 1,10, já indicam que a estrutura é de nós móveis.

## 11. Conclusões

Neste trabalho avaliou-se a estabilidade global de modelos estruturais de concreto considerando a influência da excentricidade na ligação viga-pilar parede verificando-se os parâmetros de estabilidade normativos e deslocamentos de estruturas reticuladas. As análises de estabilidade e deslocamentos foram realizadas em modelos geométricos e fornecem um indicativo da influência da excentricidade da ligação viga-pilar parede na estabilidade desses modelos.

Nas simulações dos modelos idealizados neste trabalho, alguns compostos por pilares-parade e vigas e outros por pilares-parade, vigas e lajes, variaram-se as excentricidades das ligações vigas-pilares parede buscando determinar sua influência na estabilidade. Foram capturados os deslocamentos no topo dos pilares-parade,

**Tabela 15**  
Valores de  $\alpha$ ,  $\gamma_z$  e REDMOL para o modelo MP3DSL6

e (m)	Análises geometricamente não lineares				
	$U_{1,A}$ (m)	REDMOL	$U_{1,T}$ (m)	$\alpha$	$\gamma_z$
0,00	0,0235	0,91	0,0235	0,641	1,099
0,05	0,0237	0,92	0,0237	0,642	1,100
0,10	0,0239	0,94	0,0239	0,644	1,100
0,15	0,0242	0,96	0,0242	0,647	1,101
0,20	0,0245	0,98	0,0245	0,649	1,102
0,25	0,0250	1,03	0,0250	0,654	1,103
0,30	0,0255	1,07	0,0255	0,658	1,105
0,35	0,0261	1,12	0,0261	0,664	1,106
0,40	0,0269	1,19	0,0269	0,671	1,109
0,45	0,0278	1,27	0,0278	0,679	1,112
0,50	0,0291	1,40	0,0291	0,692	1,116

Fonte: Autor (2017)

tomando como referência o eixo longitudinal, em cada modelo para cada excentricidade da viga.

Os deslocamentos horizontais obtidos demonstram que a excentricidade da viga em relação ao eixo do pilar-parede tem efeito considerável na rigidez da ligação e consequentemente na estabilidade global, pois os deslocamentos crescem à medida que a excentricidade da ligação aumenta. A diferença de deslocamentos obtidos com a ligação viga-pilar parede centralizada e a ligação mais extrema no pilar é significativa, chegando 26,45% no modelo MP3DL6. Outro fator importante é que os deslocamentos crescem mais rapidamente para excentricidades da ligação próximas da extremidade do pilar-parede.

Os modelos com a presença da laje mostraram-se mais rígidos que os modelos compostos apenas por pilares-parede e vigas. O percentual de redução dos deslocamentos dos modelos com lajes em relação aos modelos sem lajes é significativo, chegando a 21,7% entre os modelos de 6 pavimentos. Nota-se também que a redução decresce com o aumento da excentricidade e com o aumento do número de pavimentos dos modelos.

A análises dos critérios de flexibilização do pórtico espacial do TQS® resultaram informações importantes. O LPMOL tende a ser reduzido, implicando à redução da rigidez da ligação, para posições mais excêntricas das vigas e modelos com maior número de pavimentos, uma vez que os deslocamentos crescem com o aumento do número de pavimentos. Já o REDMOL tende a aumentar com o crescimento dos deslocamentos, indicando também uma redução da rigidez da ligação viga-pilar parede para modelos com maior número de pavimentos e para posições mais excêntricas das vigas.

Os parâmetros de estabilidade avaliados nos modelos analisados se mantiveram dentro dos limites estabelecidos pela NBR 6118/2014. Os valores dos parâmetros, de uma forma geral, indicaram que o modelo avaliado é classificado como estrutura de nós móveis.

Por fim, ressalta-se que os resultados obtidos neste trabalho têm capacidade para auxiliar nas considerações de estabilidade global de estruturas constituídas por pilares-parede de seção simples. Fornece também indicativos sobre a consideração dos critérios de flexibilização do pórtico TQS®, LPMOL e REDMOL, quando as estruturas possuem ligações excêntricas de vigas com pilares-parede. Salienta-se que os resultados apresentados neste trabalho são de modelos simples e considerando condições simplificadas de aplicação de cargas e de disposição dos pilares em planta.

## 12. Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro.

## 13. Referências

- [1] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Sinopse do censo demográfico 2010. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=8> Acessado em: 15/09/2016.
- [2] FONTE, A. O. C. Análise não linear geométrica de edifícios altos, 1992, Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 223p.
- [3] ZUMAETA MONCAYO, W. J. Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado, 2011, Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 221 p.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e execução de obras de concreto armado. - NBR 6118, Rio de Janeiro – RJ, 2014.
- [5] BUENO, M. M. E. Avaliação dos parâmetros de instabilidade global em estruturas de concreto armado, 2009, Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 105p.
- [6] ARAÚJO, T. J. F. Estudo da ligação viga-pilar em sistema estrutural de concreto considerando a variação da semi-rigidez por meio de parâmetros geométricos da ligação, 2013, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, 111p.
- [7] PASCUAL, C. A. Q. Parâmetros característicos para a definição de um modelo estático: “pilar de pórtico” ou “pilar-parede”, 1987, Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 228p.
- [8] DINIZ, C. W. S. Estabilidade global de estrutura de edifícios considerando a influência da excentricidade na ligação viga-pilar parede, 2017, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió – AL, 128p.
- [9] FEITOSA, L. A.; ALVES, E. C. Estudo da estabilidade global de edifícios altos com lajes protendidas. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v.8, n.2, 2015; p. 196 - 224.
- [10] WORDELL, F. Avaliação da instabilidade global de edifícios altos, 2003, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 94p.
- [11] LIMA, J. S. Verificações da punção e da estabilidade global em edifícios de concreto: desenvolvimento e aplicação de recomendações normativas, 2001, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 249p.
- [12] PINTO, R. S. Não-linearidade física e geométrica no projeto de edifícios usuais de concreto armado, 1997, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 128p.
- [13] CARMO, R. M. S. Efeitos de segunda ordem em edifícios usuais de concreto armado, 1995, Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 135 p.
- [14] PINTO, R. S.; CORRÊA, M. R. S.; RAMALHO, M. A. Utilização do parâmetro  $\gamma_z$  para estimar esforços de segunda ordem em edifícios de concreto armado. Revista Ibracon de Estruturas. v.1, n.2, 2005, p. 145 - 165.
- [15] VIEIRA, V. V. S.; RODRIGUES JUNIOR, S. J.; VELOSO, L. A. C. M. Análise de estabilidade global de edifícios de concreto armado utilizando o coeficiente  $\gamma_z$ . Revista Ibracon de Estruturas. v.10, n.5, 2017, p. 1113 - 1140.
- [16] PASSOS, V. M.; FEITOSA, L. A.; ALVES, E. C.; AZEVEDO,

- M. S. Análise da instabilidade de edifícios altos com lajes protendidas e lajes nervuradas. *Revista Ibracon de Estruturas*. v.9, n.2, 2016, p. 244 - 262.
- [17] PINTO, R. S.; RAMALHO, M. A. Não-linearidade física e geométrica no projeto de edifícios usuais de concreto armado. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, 2002, n.19, p. 171 - 206.
- [18] TQS INFORMÁTICA (2018). Manual do usuário: dominando os sistemas CAD/TQS – análise estrutural. TQS Informática, v.3, São Paulo, 2018.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. - NBR 6120, Rio de Janeiro – RJ, 1980.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Forças devidas ao vento em edificações. - NBR 6123, Rio de Janeiro – RJ, 1988.
- [21] CORRÊA, M. R. S. Aperfeiçoamento de modelos usualmente empregados no projeto de sistemas estruturais de edifícios, 1991, Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 331p.
- [22] GOULART, M. S. S. Contribuição da rigidez à flexão das lajes para a estabilidade global de edifícios, 2008, Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 115p.