



## **Análise comparativa da influência da excentricidade da ligação viga e pilar-parede em edifícios de concreto armado considerando diferentes coeficientes de restrição à rotação**

### ***Comparative analysis of the influence of eccentricity of the beam-wall connection in reinforced concrete buildings considering different rotation coefficients***

### ***Análisis comparativo de la influencia de la excentricidad de la conexión viga-pilar pared en edificios de hormigón armado llevando en cuenta coeficientes de restricción a la rotación***

### ***Analyse comparative de l'influence de l'excentricité de la jonction mur-poutre dans les bâtiments en béton armé en prenant des différents coefficients de résistance au pivotement***

**Pablo Juan Lopes e Silva Santos**   
pablojuan.engenhariacivil@gmail.com  
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

**Carlos Henrique Leal Viana**   
carloshenriquelv@hotmail.com  
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

#### **Resumo**

Entre as etapas para a elaboração de um projeto estrutural, destaca-se a análise estrutural, que é destinada a obter modelos simplificados que representem o comportamento da estrutura de modo mais aproximado ao real. Quando se trata de edifícios de concreto armado, alguns fatores devem ser observados, pois há influência dos esforços horizontais na determinação dos deslocamentos e, conseqüentemente, da estabilidade global da estrutura, pois quanto menos rígida é a estrutura como um todo, maiores serão os deslocamentos, podendo comprometer a estabilidade e causar desconforto na utilização da edificação. Em face disso, o presente trabalho tem como objetivo fazer uma análise comparativa simplificada da influência da excentricidade da ligação viga e pilar-parede em dois modelos de edifício de concreto armado a partir da mudança de fatores de restrição à rotação e da largura dos pilares. O desenvolvimento deste trabalho foi realizado a partir da análise dos deslocamentos e do parâmetro de estabilidade global de dez modelos estruturais, variando a excentricidade da ligação viga e pilarparede e o fator de restrição à rotação. Nesse cenário, obteve-se que o aumento percentual total máximo dos deslocamentos entre os modelos com viga centrada e viga excêntrica foi de 133,55% e 10,34%, respectivamente, para os dois tipos de edifícios estudados, e que quanto menor o fator de restrição à rotação maior o valor do parâmetro de estabilidade global. Esses resultados demonstram a importância da consideração desses fatores na análise estrutural para garantir a estabilidade da estrutura e o conforto do usuário.

**Palavras-chave:** Estabilidade global. Ligação viga e pilarparede. Fator de restrição à rotação.

#### **Abstract**

Among the steps for the elaboration of a structural project, we highlight the structural analysis that is intended to obtain simplified models that represent the behavior of the structure more closely to the real one. When it comes to reinforced concrete buildings, some factors should be noted, as there is influence of horizontal efforts in determining the displacements and, consequently, the overall stability of the structure. Because the less rigid the structure as a whole, the greater the displacements, which may compromise stability and cause discomfort

in the use of the building. In view of this, the present work aims to make a simplified comparative analysis of the beam-wall eccentricity in two reinforced concrete building models from the change of rotation restriction factors and pillar width. The development of this work was based on the displacement analysis and the global stability parameter of ten structural models, varying the beam-pillar wall eccentricity and the rotation restriction factor. In this scenario, it was found that the maximum total percentage increase in displacements between the center beam and eccentric beam models was 133,55% and 10,34% for the types of buildings studied, and that the lower the restriction factor for rotation, greater was the value of the global stability parameter. These results demonstrate the importance of considering these factors in the structural analysis, aiming to ensure the stability of the structure and user comfort.

**Keywords:** Overall stability. Beam-wall connection. Rotation restriction factor.

### Resumen

Entre las fases para elaboración de un proyecto estructural, se enfoca el análisis estructural que es destinado a obtener modelos simplificados que representen el comportamiento de la estructura de modo más cerca del real. Cuando se trata de edificios de hormigón armado, algunos factores deben ser observados debido a la influencia de los esfuerzos horizontales en la determinación de los desplazamientos y, consecuentemente, de la estabilidad global de la estructura. Cuanto menos rígida es la estructura como un todo, mayores serán los desplazamientos, lo que puede comprometer la estabilidad y causar incómodo en la utilización de la edificación. Ante eso, el presente trabajo tiene el objetivo de hacer un análisis comparativo simplificado de la influencia de la excentricidad de la conexión viga-pilar pared en dos modelos de edificio de hormigón armado a partir del cambio de factores de restricción a la rotación y del ancho de los pilares. El desarrollo de este trabajo fue realizado a partir del análisis de los desplazamientos y del parámetro de estabilidad global de diez modelos estructurales, variando la excentricidad de la conexión viga-pilar pared y el factor de restricción a la rotación. En este escenario, se encontró que el aumento porcentual total máximo de los desplazamientos entre los modelos con viga central y viga excéntrica fue de 133,55% y 10,34% para los dos tipos de edificios estudiados, y que cuanto menor el factor de restricción a la rotación, mayor fue el valor del parámetro de estabilidad global. Estos resultados demuestran la importancia de la consideración de de estos factores en el análisis estructural, con el objetivo de garantizar la estabilidad de la estructura y la comodidad del usuario. Nesse cenário, obteve-se que o aumento porcentual total máximo dos deslocamentos entre os modelos com viga centrada e viga excêntrica foi de 133,55% e 10,34% para os dois tipos de edifícios estudados, e que quanto menor o fator de restrição à rotação maior foi o valor do parâmetro de estabilidade global.

**Palabras-clave:** Estabilidad global. Conexión viga-pilar pared. Factor de restricción a la rotación.

### Résumé

Parmi les étapes pour l'élaboration d'un projet structurel, nous mettons en évidence l'analyse structurelle destinée à obtenir des modèles simplifiés représentant le comportement de la structure plus près du réel. En ce qui concerne les bâtiments en béton armé, certains facteurs doivent être observés, car les efforts horizontaux influent sur la détermination des déplacements et, par conséquent, sur la stabilité globale de la structure. Parce que moins la structure est rigide dans son ensemble, plus les déplacements sont importants, ce qui peut compromettre la stabilité et gêner l'utilisation du bâtiment. Dans cette optique, les travaux en cours vise à faire une analyse comparative simplifiée de l'influence de l'excentricité des connexion faisceau-mur dans les modèles de construction en béton armé à partir des facteurs de restriction de changement de rotation et de la largeur de la colonne. Le développement de ce travail était basé sur l'analyse du déplacement et le paramètre de stabilité globale de dix modèles structurels, en faisant varier l'excentricité de la paroi

poutre-pilier et le facteur de restriction de rotation. Dans ce scénario, il a été constaté que l'augmentation totale maximale en pourcentage des déplacements entre les modèles à faisceau central et à faisceau excentrique était de 133,55% et de 10,34% pour les deux types de bâtiments étudiés, et que plus le facteur de restriction de la rotation était faible, plus grande était la valeur du paramètre de stabilité globale. Ces résultats démontrent l'importance de prendre en compte ces facteurs dans l'analyse structurelle, dans le but d'assurer la stabilité de la structure et le confort de l'utilisateur.

**Mots-clés:** Stabilité globale. Connexion faisceau-mur. Facteur de restriction de rotation.

## 1 Introdução

A crescente demanda por edifícios que proporcionem maior ocupação e o desenvolvimento tecnológico são um dos principais aspectos que colaboram para o crescimento de edificações de vários pavimentos. A exigência por formas arquitetônicas que levem em consideração a altura de um edifício está cada vez mais presente na elaboração de projetos visando melhor aproveitamento dos espaços. Em face disso, quanto mais esbelta a edificação, maior a influência dos esforços horizontais na determinação dos deslocamentos e, conseqüentemente, da estabilidade global (LIMA, 2001).

Dentre os esforços mais consideráveis para a análise da estrutura, destaca-se o efeito do vento. De modo que, durante a concepção estrutural, a geometria e rigidez dos elementos são de suma importância para o comportamento do prédio perante as combinações de carregamento que envolvem os esforços horizontais de cálculo (PINTO, 1997).

Os esforços horizontais causam deslocamentos na estrutura, de modo que, quando combinados com carregamentos verticais, podem provocar efeitos de segunda ordem. Ressalta-se que os pilares são os principais elementos estruturais responsáveis pela absorção dessas ações. Assim, a consideração da ligação entre viga e pilar é importante para a rigidez da estrutura como um todo, devendo-se levar em conta a disposição construtiva da ligação (ALVA, 2004). Muitas vezes, para atender aos requisitos do projeto arquitetônico, a ligação viga e pilar é estabelecida de maneira excêntrica, alterando a rigidez. Diniz (2017), em seu trabalho, demonstrou a importância dessa variável na estabilidade global das estruturas utilizando um valor único para as seções dos pilares de suas modelagens.

Diante disso, o objetivo deste trabalho é fazer uma análise comparativa a fim de verificar o quanto a posição da viga em relação ao pilar-parede, em dois modelos de edifícios de concreto armado, com pilares de diferentes seções, a partir da mudança dos fatores de restrição à rotação, pode interferir nos deslocamentos e na estabilidade global da estrutura. Destaca-se que serão consideradas duas combinações de carregamento horizontal: uma para o vento a 0° e outra para o vento 90°.

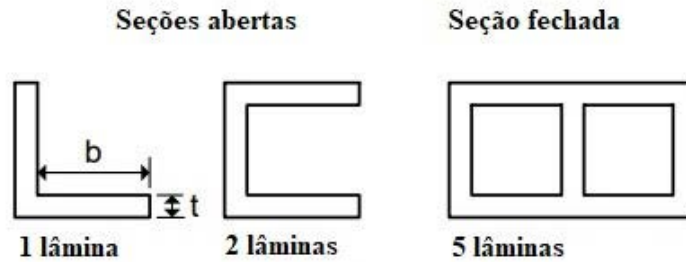
## 2 Revisão bibliográfica

### 2.1 Pilares-parede

As análises de edificações são comumente realizadas por meio de modelos de pórtico, em que pilares e vigas são representados como elementos de barra. Nessas modelagens, a excentricidade das ligações interfere na estabilidade dos edifícios, sendo necessário aumentar sua rigidez. Uma das alternativas é a utilização de elementos de chapa, e não de barra, a exemplo dos pilares-parede.

A ABNT NBR 6118:2014 define pilar-parede como o elemento estrutural cuja maior dimensão da seção transversal supera em cinco vezes a menor dimensão. Araújo (2014) classifica-os como pilares cujas seções são compostas por retângulos de pequena espessura, podendo ser abertas ou fechadas. A Figura 1 ilustra os tipos de pilares-parede.

**Figura 1 – Seções de pilares-parede.**



Fonte: adaptado de Araújo (2014).

Os pilares-parede de seção aberta podem ser utilizados nos sistemas de contraventamento de estruturas, com pilares de uma única lâmina formando pórticos espaciais, e em subsistemas, em formato de U, compondo os núcleos rígidos de edifícios, posicionados geralmente em caixas de escada ou de elevadores. Os do tipo seção fechada, mais especificamente do tipo caixão, são utilizados em pontes. O uso desse tipo de elemento estrutural confere grande rigidez numa das direções e um menor peso próprio, devido à pequena espessura da parede (ARAÚJO, 2014).

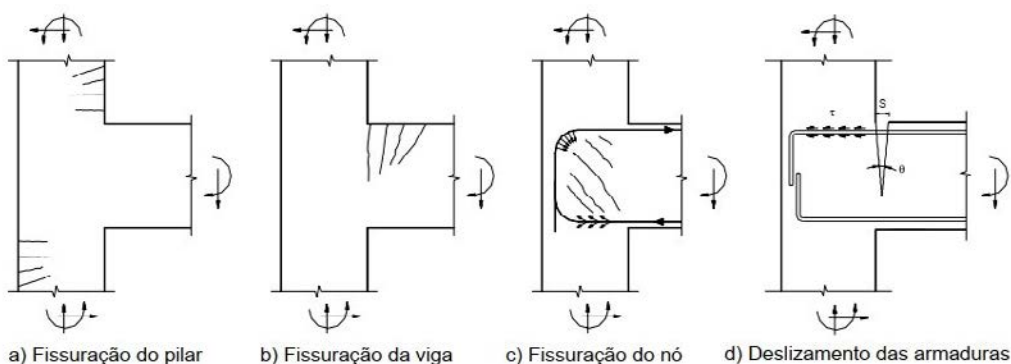
## 2.2 Ligação viga e pilar

As ligações entre vigas e pilares formam os chamados nós de pórticos, em que parte do pilar possui a mesma altura da viga ligante. Esses nós são, geralmente, os pontos mais críticos das estruturas, devido a mudanças na direção das tensões e esforços, além das elevadas tensões cisalhantes ali formadas (ALVA, 2004). Destaca-se que as ligações podem ser dos tipos: rígida, semirrígida ou articulada. No caso específico de junções entre vigas e pilares-parede, Diniz (2017) explica que a possibilidade de união em diferentes pontos do pilar também pode resultar numa alteração da rigidez.

AABNT NBR 9062:2017 utiliza o parâmetro  $\alpha_r$  para analisar a rigidez das ligações, em que o  $\alpha_r$  é igual a 1,0 quando a ligação for rígida e igual a 0,0 quando a ligação for articulada, e os valores dentro desse intervalo se referem a ligações semirrígidas. Na prática, as ligações rígidas são apenas hipóteses, pois, de acordo com Bertero e Popov (1977), o caráter cíclico dos carregamentos conduz a estrutura a uma degradação entre a armadura e o concreto, de maneira gradual. No escoamento, a deformação na armadura atinge valores consideráveis, resultando em fissuras tanto na viga quanto no nó. As fissuras levam ao aparecimento de uma rotação entre pilar e viga, alterando o comportamento global da ligação.

Alva (2004) reúne, na Figura 2, os vários fenômenos relacionados a existência de rotações, mesmo em ligações monolíticas: fissuração do concreto, escoamento do aço e deslizamento das armaduras.

**Figura 2 – Fenômenos resultantes em ligações entre viga e pilar.**



Fonte: Alva (2004)

### 2.3 Estabilidade global

A análise da estabilidade global é um requisito importante na análise de edifícios, pois conforme são mais altos e esbeltos, surgem deslocamentos que passam a ser regidos, além do carregamento vertical inicial, pelas ações horizontais. Com isso, a estrutura passa a apresentar uma configuração deformada, diferente da concepção original. A partir daí, são realizadas considerações, ditas de segunda ordem, em que os esforços seguem um comportamento não linear, ao contrário da situação indeformada (LIMA, 2001).

Neste estudo existem parâmetros para analisar o comportamento da estrutura em face da não linearidade do comportamento do concreto armado. Podem-se citar dois tipos de não linearidades: não linearidade física (NLF) e não linearidade geométrica (NLG). Stramandinoli (2007) explica que as estruturas de concreto armado, mesmo submetidas a pequenos carregamentos, começam a fissurar logo num primeiro momento, ocasionando uma diminuição de sua rigidez e, por consequência, o aparecimento de fissuras. Esse comportamento é chamado de não linearidade física.

Em relação ao concreto, Lins (2013) também cita o efeito da fluência e, quanto o aço, a influência do escoamento, como contribuições para a NLF do compósito. Kimura (2007) complementa, afirmando que a fissuração, apesar de seus efeitos, é necessária para que ocorra a solitação da armadura.

Scadelai (2004) alerta que a NLG deve ser levada em conta sempre que houver deformações excessivas na estrutura, pois podem evidenciar os problemas relacionados à instabilidade da estrutura, então, nesses casos, é de suma importância compreender a estrutura na situação deformada, gerando novos esforços.

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, na verificação dos efeitos de segunda ordem em estruturas reticuladas com, pelo menos, quatro pavimentos, é levada em conta a não linearidade física de maneira aproximada, minorando a rigidez dos elementos estruturais de acordo com o seu tipo.

Pinto (1997) menciona que na NLG está relacionada à mudança geométrica da estrutura. Logo, Moncayo (2011) retifica que esses efeitos são verificados sempre que se considera o equilíbrio na posição deformada da estrutura.

Quanto ao cálculo, Moncayo (2011) cita que as estruturas são consideradas de nós fixos quando os efeitos globais de segunda ordem são irrelevantes, ou seja, inferiores a 10% dos de primeira ordem, e são consideradas de nós móveis quando os efeitos de segunda ordem são responsáveis por, no mínimo, 10% dos respectivos esforços de primeira ordem. Porém Oliveira (2007) diz que a verificação não é recomendável na prática.

Franco e Vasconcelos (1991) explicam que não existem estruturas indeslocáveis. Consequentemente, toda estrutura é sujeita a deformações. Entre os diversos parâmetros para análise de estabilidade global, destaca-se o parâmetro de instabilidade  $\alpha$  e o coeficiente  $\gamma_z$  estudado por esses autores.

Neste trabalho será abordada a análise do coeficiente  $\gamma_z$ . Franco e Vasconcelos (1991) propõem um processo simples para estabelecer a mobilidade da estrutura e uma forma de se estimar, com certa precisão, os esforços de segunda ordem. Franco e Vasconcelos (1991) definem esse coeficiente como majorador dos esforços de primeira ordem para obtenção dos esforços finais, os quais já incluem os esforços de segunda ordem.

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, o valor de  $\gamma_z$  para cada combinação de carregamento é dado pela Eq. (1):

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (1)$$

Quando  $\gamma_z$  for menor ou igual a 1,1, a estrutura é de nós fixos, e se  $\gamma_z$  for maior que 1,1 e menor ou igual a 1,3, a estrutura é de nós móveis.

### 3 Metodologia

Foram analisados dois edifícios de concreto armado de 4 pavimentos, de uso comercial, com pé direito de 3,0 m e dimensões em planta de 6,00 m x 8,00 m. Como características dos edifícios, considerou-se o  $f_{ck}$  de 30 MPa, módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) = 26575,9 MPa para todos os elementos e classe de agressividade ambiental (CAA) II, para ambientes urbanos. Foram respeitados os cobrimentos prescritos pela ABNT NBR 6118:2014, ditos de 2,5 cm para lajes e de 3,0 cm para pilares e vigas.

Foi considerada, também, a carga de vento, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 6123:1988, para a cidade de Teresina-PI, com vento  $v_0$  de 30 m/s, categoria II, classe A, fator topográfico S1 igual a 1,0, fator de rugosidade S2 igual a 0,90 e fator estatístico S3 igual a 1,00. A sobrecarga adotada foi de 0,25 t/m<sup>2</sup>.

O modelo adotado para a análise é um pórtico espacial composto por lajes maciças, apoiadas sobre vigas de seção retangular, apoiadas em pilares-parede com dimensões diferentes para cada edifício. Foi utilizada uma largura de 1,20 m, a exemplo de Diniz (2017), para efeito de comparação e outra, de 1,0 m, para os pilares. As Tabelas 1 e 2 apresentam as configurações geométricas desses elementos estruturais.

**Tabela 1** – Dimensões dos elementos estruturais do edifício 1.

Elementos	Dimensões	
	b (cm)	h (cm)
Pilares-parede	20	120
Vigas	20	60
Elemento	Dimensões	
	Lx (m)	Ly (m)
Laje 1 (h= 15 cm)	6,0	7,00
Laje 2 (h = 15 cm)	6,0	8,0

Fonte: Autores (2019).

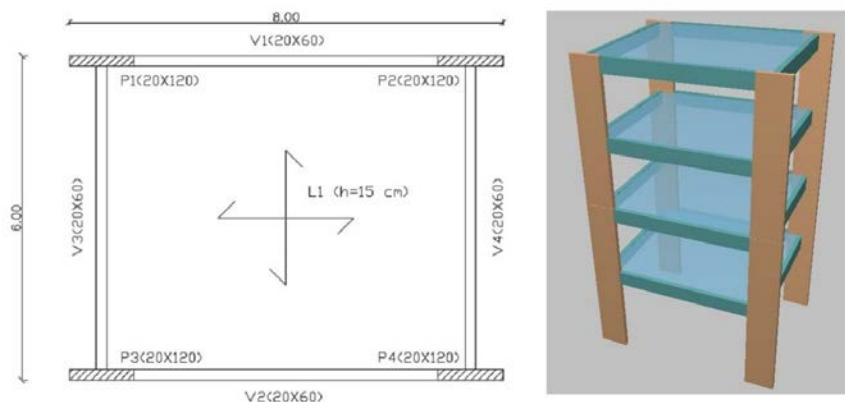
**Tabela 2** – Dimensões dos elementos estruturais do edifício 2.

Elementos	Dimensões	
	b (cm)	h (cm)
Pilares-parede	20	100
Vigas	20	60
Elemento	Dimensões	
	Lx (m)	Ly (m)
Laje 1 (h= 15 cm)	6,0	7,20
Laje 2 (h = 15 cm)	6,0	8,0

Fonte: Autores (2019).

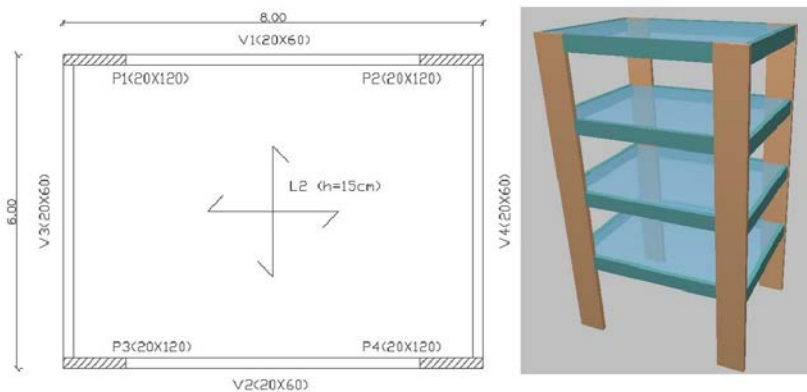
O modelo idealizado terá diferentes configurações, variando a excentricidade da ligação viga e pilar-parede, assim como seu fator de restrição à rotação. Os modelos do tipo PVC (pórtico com viga centrada) possuem as vigas centradas no eixo de cada pilar-parede, e os modelos do tipo PVE (pórtico com viga excêntrica), possuem as vigas engastadas nas bordas externas dos pilares-parede. A representação desses modelos é apresentada nas Fig. 3 e 4.

**Figura 3** – Planta de forma e pórtico tridimensional do modelo PVC



Fonte: Autores (2019).

**Figura 4** – Planta de forma e pórtico tridimensional do modelo PVE



Fonte: Autores (2019).

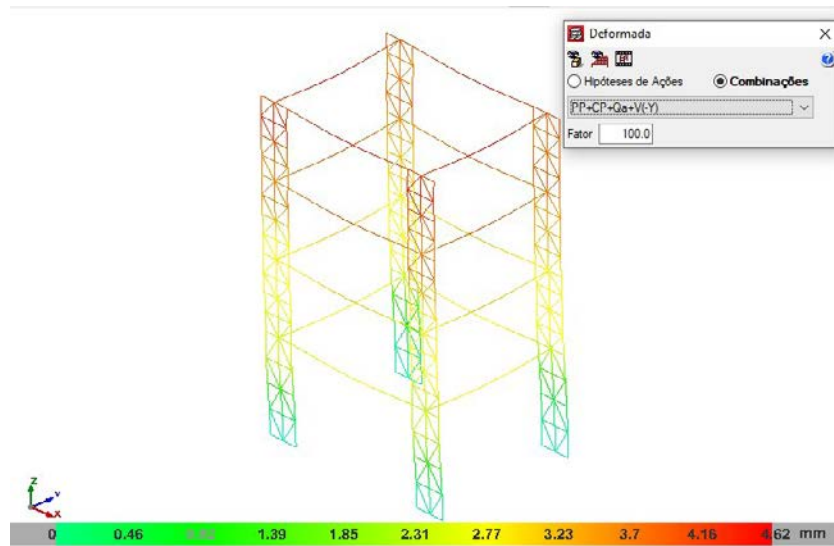
Foram adotadas as seguintes condições para o fator de restrição à rotação:

Ligação rígida:  $\alpha_r = 1,0$

Ligações semirrígidas:  $\alpha_r = 0,95$ ,  $\alpha_r = 0,90$ ,  $\alpha_r = 0,85$  e  $\alpha_r = 0,80$

Foi utilizado o *software CypeCAD* para a verificação dos deslocamentos máximos dos pilares através das combinações de peso próprio, carregamento permanente, sobrecarga e vento na direção  $0^\circ$  ou  $90^\circ$ . Os deslocamentos considerados foram os resultantes das combinações entre as ações citadas, calculadas pelo *software*, que utiliza o método dos elementos finitos, e o pilar-parede, que é considerado um elemento de chapa, e é discretizado em pequenos subdomínios de formato triangular, gerando uma malha ao longo de toda a sua altura. A Figura 5 mostra o resultado de uma dessas análises.

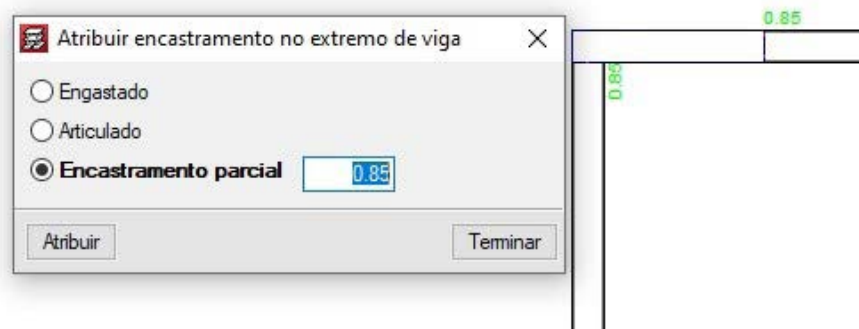
**Figura 5** – Estrutura deformada para a combinação PP+CP+Qa+V



Fonte: Autores (2019).

O programa, por padrão, adota as ligações entre vigas e pilares como rígidas, mas deixa o projetista livre para fazer alterações, como mostra a Figura 6. Foram processados todos os modelos adotados.

**Figura 6** – Escolha do fator de restrição à rotação



Fonte: Autores (2019).

No total, foram utilizados 20 modelos de pórticos, sendo 10 modelos para o edifício 1 e 10 modelos para o edifício 2, identificados de acordo com a presença de excentricidade ou não, e pelo tipo de rigidez à flexão da ligação. A Tabela 3 reúne todos esses modelos.

**Tabela 3** – Modelos utilizados.

Modelos	Excentricidade	Fator de restrição à rotação ( $\alpha$ )
PVC $\alpha$ 1,0	Pórtico com viga centrada	1,0
PVC $\alpha$ 0,95	Pórtico com viga centrada	0,95
PVC $\alpha$ 0,9	Pórtico com viga centrada	0,9
PVC $\alpha$ 0,85	Pórtico com viga centrada	0,85
PVC $\alpha$ 0,80	Pórtico com viga centrada	0,80
PVE $\alpha$ 1,0	Pórtico com viga excêntrica	1,0
PVE $\alpha$ 0,95	Pórtico com viga excêntrica	0,95
PVE $\alpha$ 0,9	Pórtico com viga excêntrica	0,9
PVE $\alpha$ 0,85	Pórtico com viga excêntrica	0,85
PVE $\alpha$ 0,8	Pórtico com viga excêntrica	0,80

Fonte: Autores (2019).

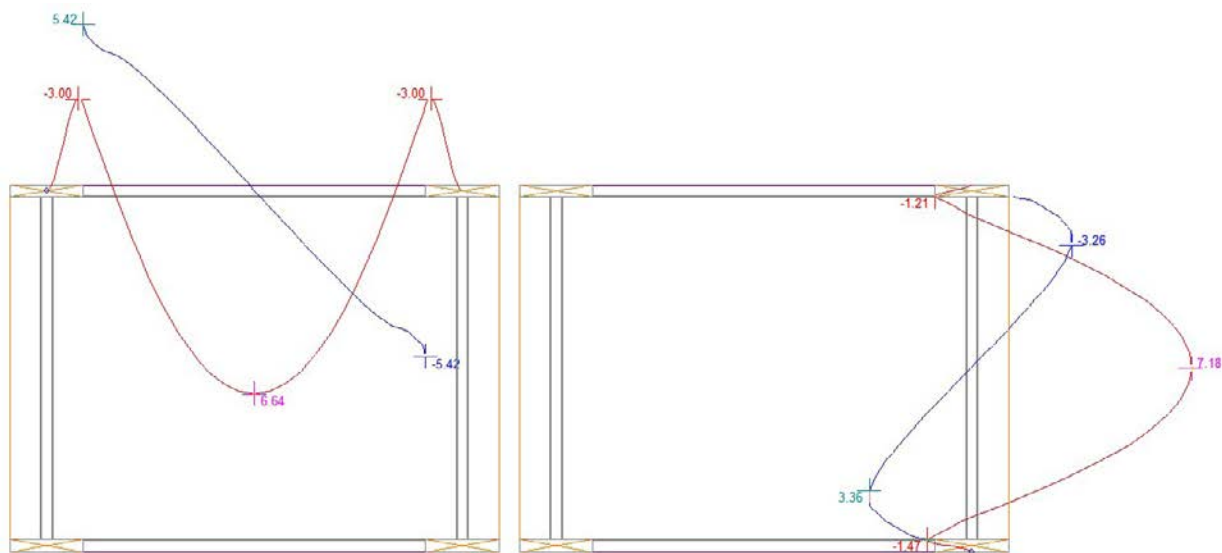


## 4 Resultados e discussão

### 4.1 Edifício 1

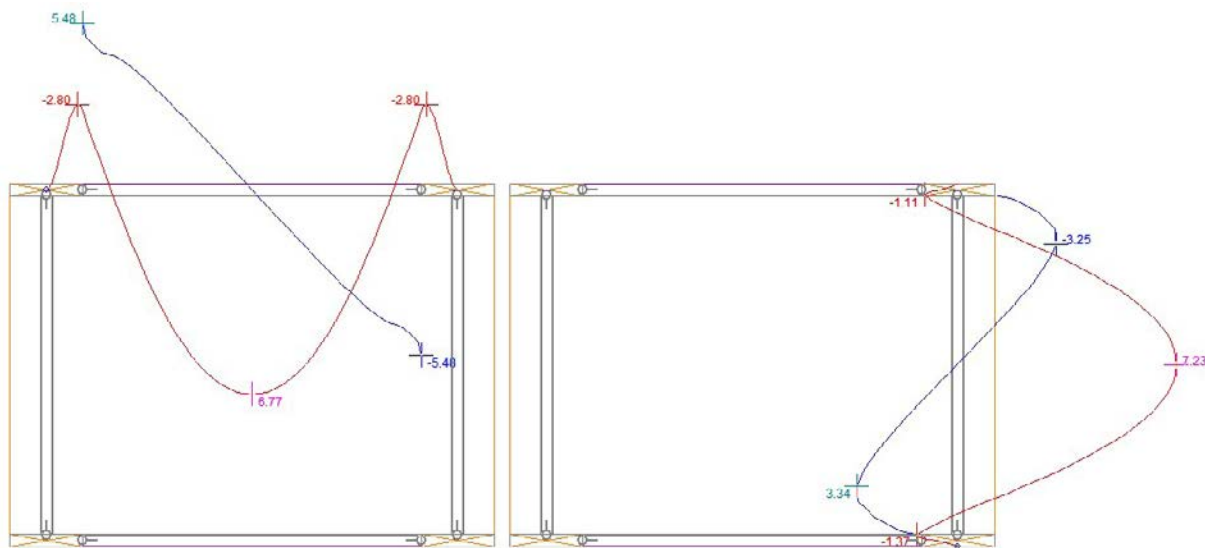
No edifício 1, a diminuição da rigidez das ligações nos modelos provocou um aumento dos momentos fletores positivos e uma diminuição dos momentos fletores negativos. Os valores máximos dos cortantes se mantiveram praticamente constantes, sofrendo uma leve variação nos modelos de viga centrada. As Figuras 7 e 8 mostram o comportamento dos esforços, no modelo, na condição mais rígida ( $\alpha_r = 1,0$ ) e na condição mais articulada ( $\alpha_r = 0,8$ ).

**Figura 7** – Momento fletor e esforço cortante no modelo PVC com  $\alpha_r = 1,0$



Fonte: Autores (2019).

**Figura 8** – Momento fletor e esforço cortante no modelo PVC com  $\alpha_r = 0,8$



Fonte: Autores (2019).

A Tabela 4, a seguir, reúne os valores de momentos máximos positivos, M(+)<sub>máx</sub>; momentos máximos negativos, M(-)<sub>máx</sub>; e do esforço cortante máximo (Q<sub>máx</sub>). Na viga do eixo Y (vertical), modelo PVE, o momento fletor positivo e o esforço cortante se mantiverem constantes.

**Tabela 4 – Valores dos esforços nos modelos**

Modelos	Viga eixo X			Viga eixo Y		
	M(+) <sub>máx</sub>	M(-) <sub>máx</sub>	Q <sub>máx</sub>	M(+) <sub>máx</sub>	M(-) <sub>máx</sub>	Q <sub>máx</sub>
PVC α 1,00	6,64 tm	3,00 tm	5,42 t	7,18 tm	1,47 tm	3,36 t
PVC α 0,95	6,67 tm	2,95 tm	5,44 t	7,19 tm	1,45 tm	3,35 t
PVC α 0,90	6,70 tm	2,91 tm	5,45 t	7,20 tm	1,42 tm	3,35 t
PVC α 0,85	6,74 tm	2,86 tm	5,47 t	7,22 tm	1,40 tm	3,35 t
PVC α 0,80	6,77 tm	2,80 tm	5,48 t	7,23 tm	1,37 tm	3,34 t
PVE α 1,00	6,75 tm	2,96 tm	5,00 t	7,12 tm	0,47 tm	2,69 t
PVE α 0,95	6,77 tm	2,92 tm	5,01 t	7,12 tm	0,40 tm	2,69 t
PVE α 0,90	6,81 tm	2,87 tm	5,03 t	7,12 tm	0,40 tm	2,69 t
PVE α 0,85	6,84 tm	2,82 tm	5,05 t	7,12 tm	0,45 tm	2,69 t
PVE α 0,80	6,87 tm	2,77 tm	5,07 t	7,12 tm	0,45 tm	2,69 t

Fonte: Autores (2019).

Na Tabela 5 são apresentados os resultados das análises de estabilidade global dos modelos propostos para o edifício 1 considerando a combinação de peso próprio, carregamento permanente e sobrecarga, representada pela letra C, combinada com as diferentes direções das cargas horizontais de vento. O maior deslocamento foi verificado no modelo PVE com α 0,80, com valor de 11,00 mm. Nesse modelo também foi verificado o valor máximo do parâmetro  $\gamma_z$ .

**Tabela 5 – Valores de deslocamentos máximos e parâmetro  $\gamma_z$**

Modelos	$\delta_{\text{máx}}$ (mm)	Parâmetro $\gamma_z$			
		C+Vento 0°	C+Vento 90°	C+Vento 0°	C+Vento 90°
PVC α 1,00	4,47	2,01	1,058	1,007	
PVC α 0,95	4,52	2,02	1,059	1,007	
PVC α 0,90	4,57	2,02	1,059	1,008	
PVC α 0,85	4,63	2,03	1,060	1,008	
PVC α 0,80	4,70	2,03	1,061	1,008	
PVE α 1,00	10,79	2,40	1,085	1,009	
PVE α 0,95	10,83	2,41	1,085	1,009	
PVE α 0,90	10,88	2,42	1,085	1,009	
PVE α 0,85	10,94	2,42	1,086	1,009	
PVE α 0,80	11,00	2,43	1,087	1,009	

Fonte: Autores (2019).

A Tabela 6 mostra que dentro de um mesmo modelo, mudando apenas os fatores de restrição à rotação, chegou-se a um aumento percentual acumulado de 5,09% para modelos do tipo PVC e 1,93% para modelos do tipo PVE com vento a 0°. Para 90°, o aumento percentual acumulado foi de 0,98% para modelos do tipo PVC e 1,24% para modelos do tipo PVE. As siglas APA e APT, da Tabela 5, significam, respectivamente, aumento percentual acumulado e aumento percentual total entre os modelos PVC e PVE.

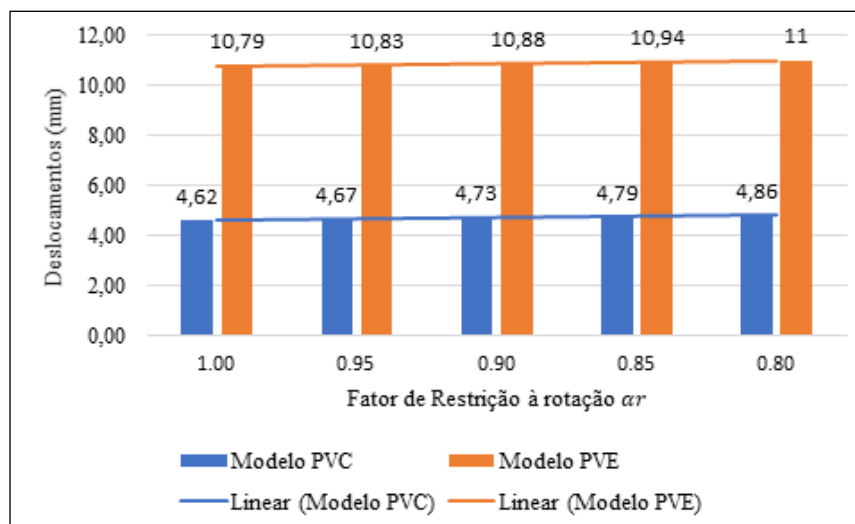
**Tabela 6** – Percentual de variação dos deslocamentos em cada modelo

Deslocamentos (mm)					
C+Vento 0°					
Modelos PVC	4,62	4,67	4,73	4,79	4,86
APA	0,0%	1,08%	2,36%	3,63%	5,09%
Modelos PVE	10,79	10,83	10,88	10,94	11,00
APA	0,0%	0,37%	0,83%	1,38%	1,93%
APT (PVE-PVC)	133,55%	131,91%	130,02%	128,39%	126,34%
C+Vento 90°					
Modelos PVC	2,01	2,02	2,02	2,02	2,03
APA	0,0%	0,49%	0,49%	0,49%	0,98%
Modelos PVE	2,40	2,41	2,42	2,42	2,43
APA	0,0%	0,42%	0,83%	0,83%	1,24%
APT (PVE-PVC)	19,40%	19,31%	19,80%	19,80%	19,70%

Fonte: Autores (2019).

O gráfico da Figura 9 mostra que, na combinação C + V(0°), a diferença entre os deslocamentos dos modelos do tipo PVC e PVE foi bem acentuada, chegando a um aumento percentual máximo de 133,55%, para o fator de restrição  $\alpha_r = 1,0$ . Isso se deve à grande influência da excentricidade da ligação viga e pilarparede, afetando consideravelmente a estabilidade global do sistema estrutural. Diniz (2017) obteve um valor de 27,16% para um modelo estrutural de seis pavimentos, com condições de contorno diferentes.

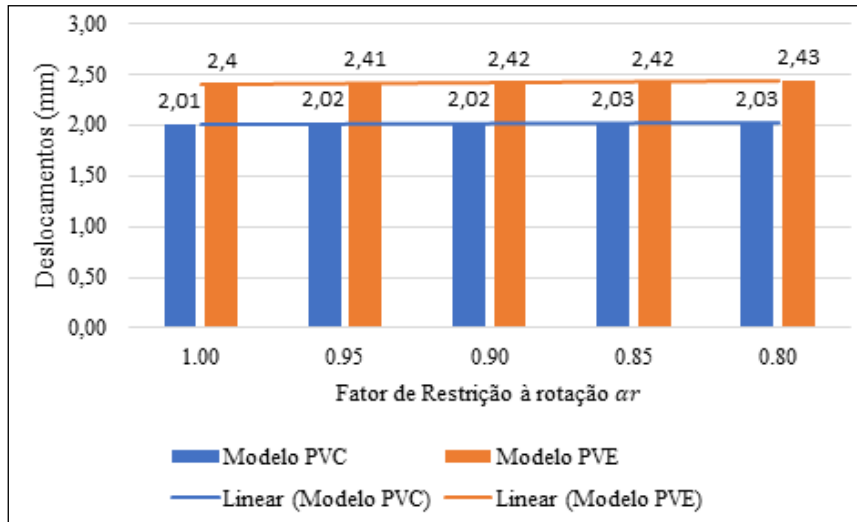
**Figura 9** – Deslocamentos máximos para modelos do tipo PVC e PVE na combinação C+Vento 0°



Fonte: Autores (2019).

O gráfico da Figura 10 mostra que, na combinação C + V(90°), a diferença entre os deslocamentos dos modelos de vigas centradas e vigas excêntricas foi bem menor, com um aumento percentual máximo de 19,80%, para  $\alpha_r = 0,9$  e para  $\alpha_r = 0,85$ . Nessa condição, a carga horizontal está atuando na direção de maior rigidez da estrutura, em que a maior dimensão do pilar-parede está no sentido do maior vão, logo a influência da excentricidade na ligação é bem menor do que na situação anterior.

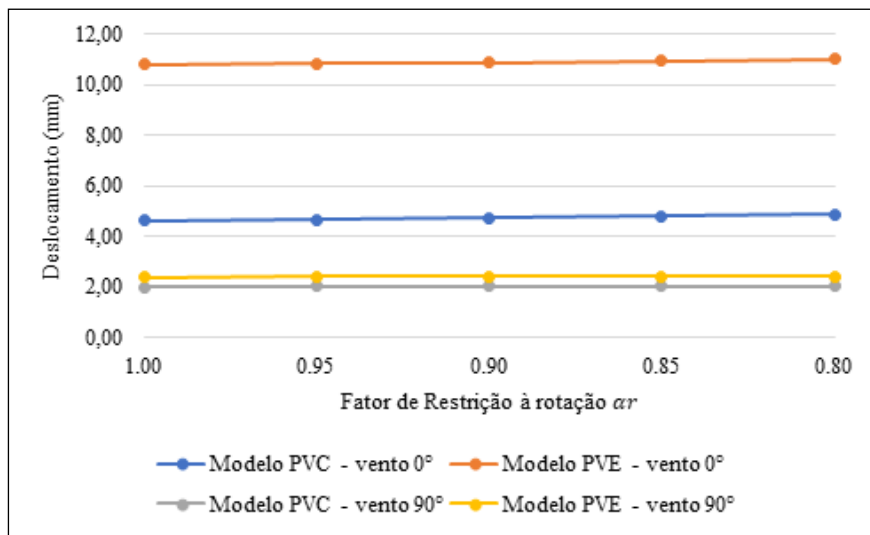
**Figura 10** – Deslocamentos máximos para modelos do tipo PVC e PVE na combinação C+Vento 90°



Fonte: Autores (2019).

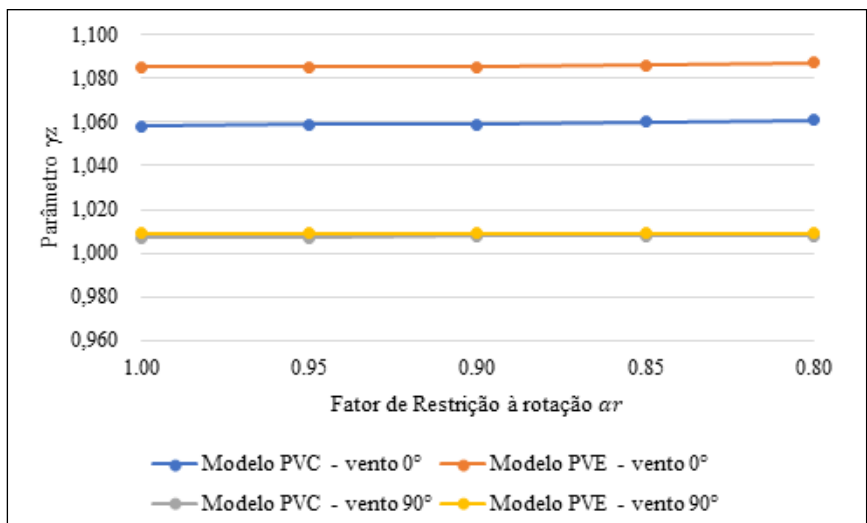
Nos gráficos das Figuras 9 e 10 observam-se os valores de deslocamento e o parâmetro  $\gamma_z$  em relação ao coeficiente de restrição à rotação da ligação viga e pilarparedo. Pode-se observar um pequeno crescimento, tanto dos valores de deslocamento quanto do parâmetro  $\gamma_z$ , **à medida que o valor de  $\alpha_r$  é reduzido**. Isso é explicado pelo maior grau de liberdade conferido pela diminuição do fator de restrição à rotação. O parâmetro gama-z se manteve sempre abaixo de 1,10 em todos os modelos analisados, configurando uma estrutura de nós rígidos.

**Figura 11** – Gráfico  $\delta_{\max} \times \alpha_r$



Fonte: Autores (2019).

Figura 12 – Gráfico  $\gamma_z \times \alpha_r$

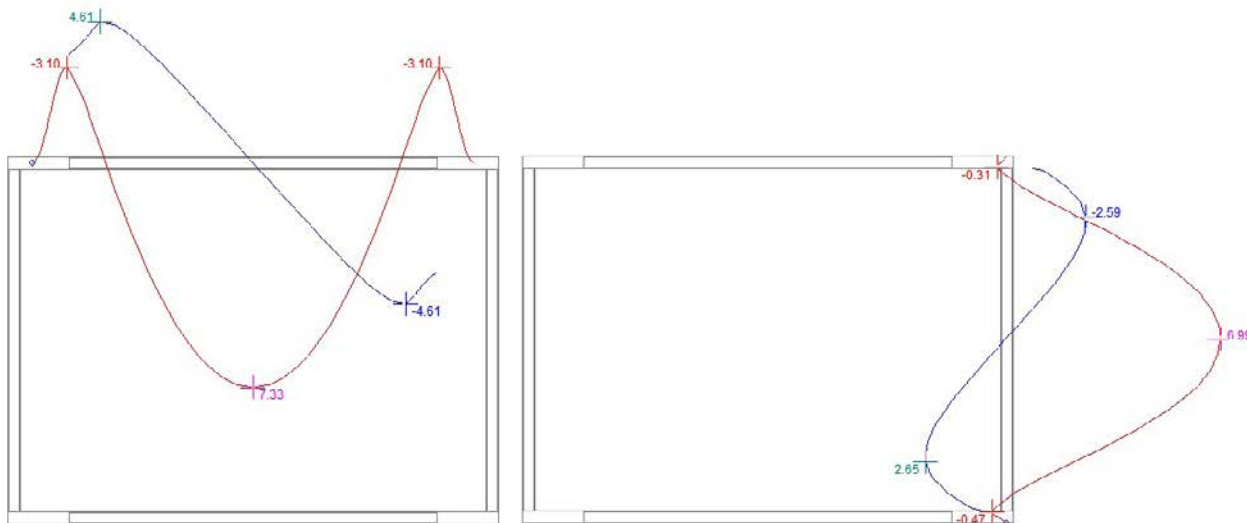


Fonte: Autores (2019).

#### 4.2 Edifício 2

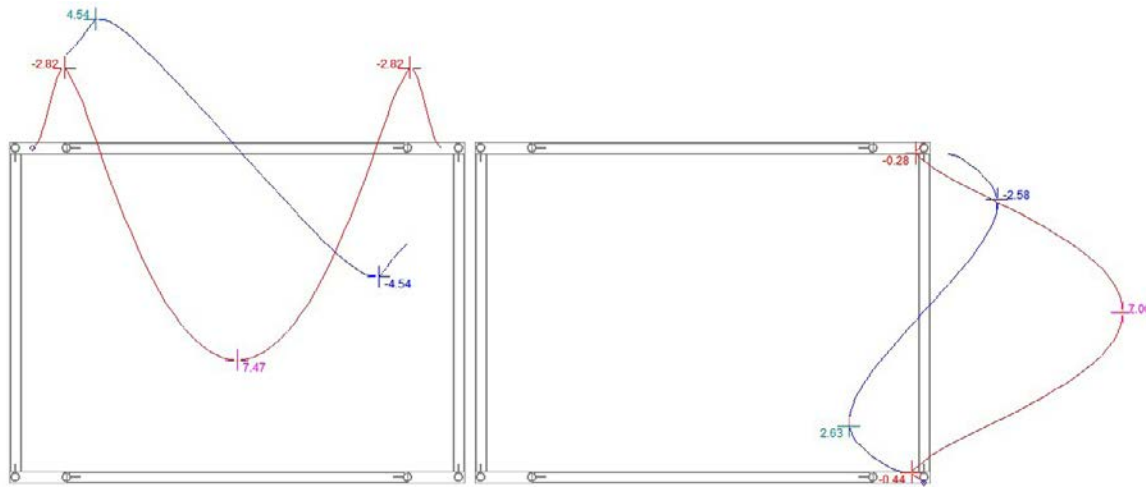
No edifício 2, a maior liberdade das ligações resultou num aumento dos fletores positivos e na diminuição dos fletores negativos. Os cortantes máximos nas vigas do eixo Y para os modelos PVC e PVE se mantiveram praticamente constantes. Somente nas vigas do eixo X (horizontal) a variação foi significativa. As Figuras 13 e 14 mostram a variação dos esforços nos modelos PVE, conforme a mudança do coeficiente de restrição à rotação.

Figura 13 – Momento fletor e esforço cortante no modelo PVE com  $\alpha_r = 1,0$



Fonte: Autores (2019).

**Figura 14** – Momento fletor e esforço cortante no modelo PVE com  $\alpha_r = 0,8$



Fonte: Autores (2019).

A Tabela 7, a seguir, reúne todos os valores de momentos máximos positivos,  $M(+)$ máx, momentos máximos negativos,  $M(-)$ máx, e esforço cortante máximo ( $Q$ máx). Na viga do eixo Y, modelo PVE, o momento fletor positivo e o esforço cortante também se mantiverem constantes, a exemplo do edifício 1, permitindo observar que a perda de rigidez resultante da excentricidade da ligação é significativa, de tal modo que a mudança dos fatores de restrição à rotação não influencia nos valores de momentos positivos e esforços cortantes.

**Tabela 7** – Valores dos esforços nos modelos

Modelos	Viga eixo X			Viga eixo Y		
	$M(+)$ máx	$M(-)$ máx	$Q$ máx	$M(+)$ máx	$M(-)$ máx	$Q$ máx
PVC $\alpha$ 1,00	7,48 tm	3,20 tm	4,73 t	7,24 tm	1,22 tm	3,23 t
PVC $\alpha$ 0,95	7,51 tm	3,14 tm	4,72 t	7,25 tm	1,21 tm	3,22 t
PVC $\alpha$ 0,90	7,55 tm	3,07 tm	4,70 t	7,26 tm	1,19 tm	3,22 t
PVC $\alpha$ 0,85	5,59 tm	3,00 tm	4,68 t	7,27 tm	1,17 tm	3,21 t
PVC $\alpha$ 0,80	7,63 tm	2,92 tm	4,66 t	7,28 tm	1,14 tm	3,21 t
PVE $\alpha$ 1,00	7,33 tm	3,10 tm	4,61 t	6,99 tm	0,47 tm	2,65 t
PVE $\alpha$ 0,95	7,36 tm	3,03 tm	4,59 t	7,00 tm	0,46 tm	2,64 t
PVE $\alpha$ 0,90	7,39 tm	2,97 tm	4,58 t	7,00 tm	0,45 tm	2,64 t
PVE $\alpha$ 0,85	7,43 tm	2,90 tm	4,56 t	7,00 tm	0,45 tm	2,64 t
PVE $\alpha$ 0,80	7,47 tm	2,82 tm	4,54 t	7,00 tm	0,44 tm	2,63 t

Fonte: Autores (2019).

A Tabela 8 mostra os resultados das análises dos modelos propostos para o edifício 2, com as mesmas combinações presentes no edifício 1. Nesta situação, o maior deslocamento também foi verificado no modelo PVE com  $\alpha$  0,80, porém com um valor menor, igual a 5,69 mm. Neste modelo também foi verificado o valor máximo do parâmetro  $\psi_z$ .

**Tabela 8** – Valores de deslocamentos máximos e parâmetro  $\gamma_z$ .

Modelos	$\delta_{\max}$ (mm)	Parâmetro $\gamma_z$		
	C+Vento 0°	C+Vento 90°	C+Vento 0°	C+Vento 90°
PVC $\alpha$ 1,00	5,03	2,23	1,064	1,010
PVC $\alpha$ 0,95	5,09	2,25	1,064	1,010
PVC $\alpha$ 0,90	5,15	2,27	1,065	1,011
PVC $\alpha$ 0,85	5,22	2,28	1,066	1,011
PVC $\alpha$ 0,80	5,29	2,30	1,067	1,011
PVE $\alpha$ 1,00	5,55	2,21	1,077	1,011
PVE $\alpha$ 0,95	5,58	2,22	1,077	1,011
PVE $\alpha$ 0,90	5,61	2,22	1,077	1,011
PVE $\alpha$ 0,85	5,67	2,26	1,078	1,011
PVE $\alpha$ 0,80	5,69	2,28	1,078	1,011

Fonte: Autores (2019).

A Tabela 9 mostra um aumento percentual acumulado de 5,07% para modelos do tipo PVC, e de 2,69% para modelos do tipo PVE com vento a 0°. Para o modelo de vigas centradas, os valores obtidos no edifício 1 e 2 foram praticamente iguais, com diferença de apenas 0,02%. No modelo de vigas excêntricas, o valor obtido para a configuração com pilares-parede de menor largura foi maior, revelando uma maior influência do fator de restrição à rotação nos deslocamentos quando a seção é diminuída. Para C+V(90°), o aumento percentual acumulado foi de 3,10% para modelos do tipo PVC, valor superior aos valores 0,98% obtido no edifício 1, e 3,12%, para modelos do tipo PVE, superior aos 1,24% da configuração anterior. As siglas APA, APT e DPT, da Tabela 7, significam, respectivamente, aumento percentual acumulado, aumento percentual total e diminuição percentual total entre os modelos PVC e PVE.

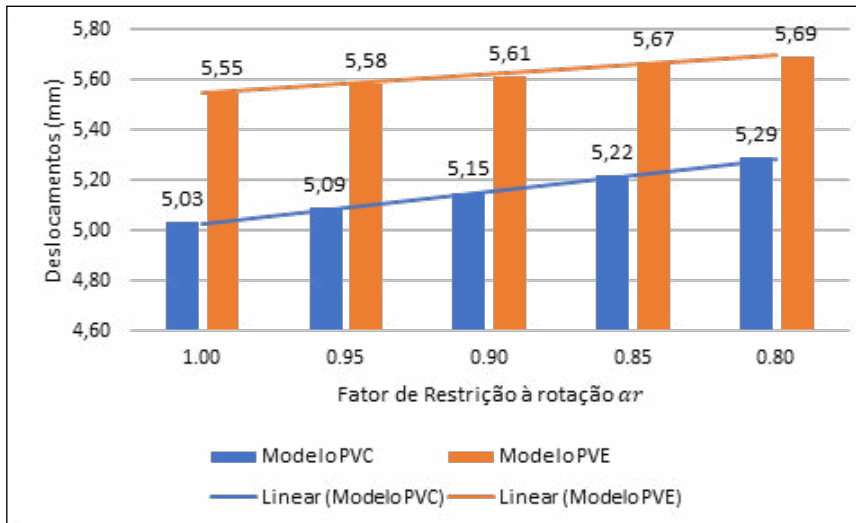
**Tabela 9** – Percentual de variação dos deslocamentos em cada modelo.

Deslocamentos (mm)					
<b>C+Vento 0°</b>					
Modelos PVC	5,03	5,09	5,15	5,22	5,29
APA	0,0%	1,19%	2,37%	3,73%	5,07%
Modelos PVE	5,55	5,58	5,61	5,67	5,69
APA	0,0%	0,54%	1,08%	1,62%	2,69%
APT (PVE-PVC)	10,34%	9,63%	8,93%	8,62%	7,56%
<b>C+Vento 90°</b>					
Modelos PVC	2,23	2,25	2,27	2,28	2,30
APA	0,0%	0,89%	1,78%	2,22%	3,1%
Modelos PVE	2,21	2,22	2,24	2,26	2,28
APA	0,0%	0,45%	1,35%	2,24%	3,12%
DPT (PVE-PVC)	0,89%	1,33%	1,32%	0,88%	0,87%

Fonte: Autores (2019).

O gráfico da Figura 15 mostra que, na combinação C + V(0°), houve um aumento percentual máximo de 10,34% entre os modelos PVC e PVE, valor bem abaixo do encontrado no edifício 1. A explicação para isso é a menor superfície de aplicação da carga de vento devido à diminuição da largura do pilar-parede, de 1,20 m para 1,0 m, reduzindo a influência da excentricidade da ligação viga e pilar no aumento dos deslocamentos.

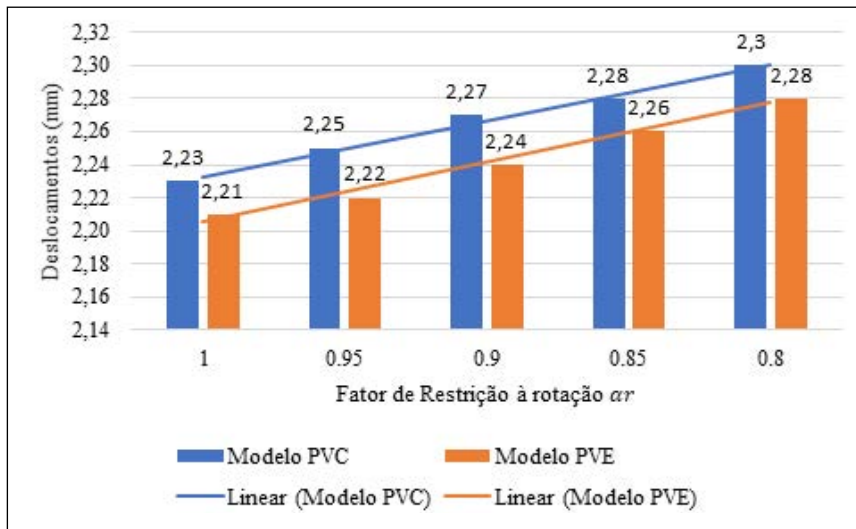
**Figura 15** – Deslocamentos máximos para modelos do tipo PVC e PVE na combinação C+Vento 0°



Fonte: Autores (2019).

O gráfico da Figura 16 mostra que, na combinação C + V(90°), a diferença não foi tão significativa entre os deslocamentos dos modelos de vigas centradas e vigas excêntricas, em torno de 1,33% considerando o modelo com fator de restrição igual 0,95. Nessas condições, a carga horizontal está atuando na direção de maior rigidez da estrutura, em que a maior dimensão do pilar-parede está no sentido do maior vão, logo a influência da excentricidade na ligação é bem menor do que na situação anterior.

**Figura 16** – Deslocamentos máximos para modelos do tipo PVC e PVE na combinação C+Vento 90°



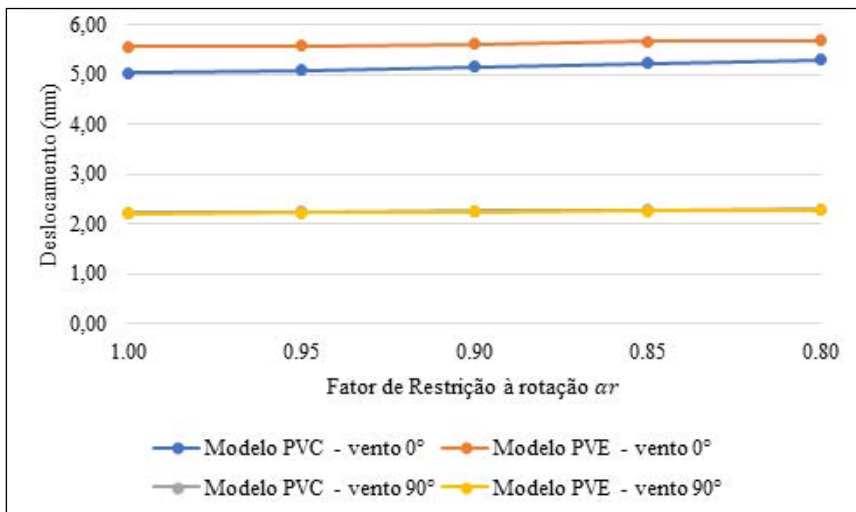
Fonte: Autores (2019).

Nos gráficos das Figuras 17 e 18 observam-se os valores de deslocamento e o parâmetro  $\gamma_z$  em relação ao coeficiente de restrição à rotação da ligação viga e pilarparede. Pode-se observar um pequeno crescimento, tanto dos valores de deslocamento quanto do parâmetro  $\gamma_z$ , à medida que o valor de  $\alpha_r$  é reduzido. Isso é explicado pelo maior grau de liberdade conferido pela diminuição do fator de restrição à rotação. O maior



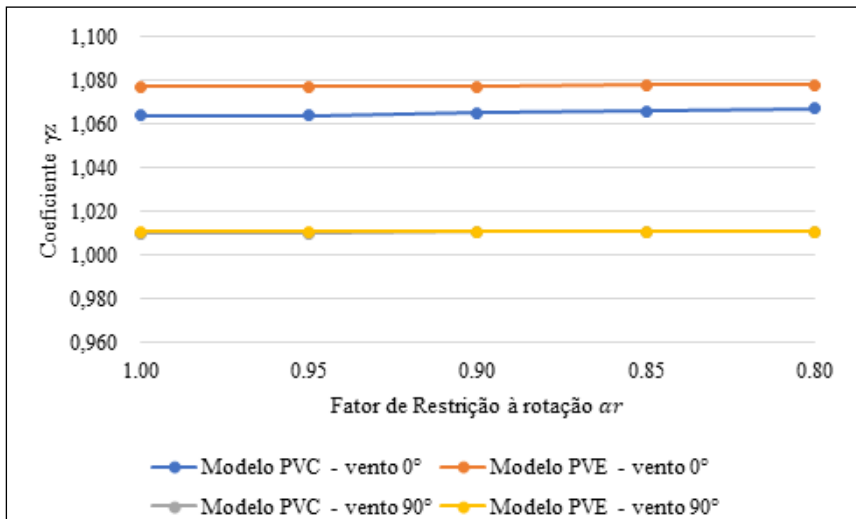
valor do parâmetro gama-z foi de 1,078, abaixo de 1,10, também configurando uma estrutura de nós rígidos, a exemplo do edifício 1. Destaca-se, também, que os deslocamentos permaneceram sempre menores que 6,0 mm.

**Figura 17** – Gráfico  $\bar{\delta}_{\max} \times \alpha_r$



Fonte: Autores (2019).

**Figura 18** – Gráfico  $\gamma_z \times \alpha_r$



Fonte: Autores (2019).

## 5 Conclusão

Após a análise dos efeitos decorrentes da mudança do eixo da ligação entre vigas e pilares-parede, e do fator de restrição à rotação, conclui-se que a estrutura sofreu importantes variações nos esforços, deslocamentos e no parâmetro de estabilidade global gama-z. No geral, com a diminuição do fator  $\alpha_r$ , os momentos positivos aumentaram e os negativos diminuíram. Com exceção das vigas no eixo Y dos modelos PVE, que mantiveram um valor constante devido à perda de rigidez inicial causada pela excentricidade da ligação.

Para as combinações com vento a  $0^\circ$ , o aumento percentual total máximo dos deslocamentos ( $APT_{\text{máx}}$ ) entre os modelos com viga centrada e viga excêntrica foi de 133,55% para o edifício 1 e de 10,34% para o edifício 2, enquanto que, nas combinações com vento a  $90^\circ$ , o aumento percentual máximo entre os modelos foi de apenas 19,80% para o primeiro caso e apenas 1,33% para o segundo caso. Portanto, a estrutura teve a estabilidade mais afetada quando o carregamento horizontal atuou no sentido da menor dimensão dos pilaresparede. Quando o vento atuou no sentido do maior vão (8,00 m) e de maior rigidez dos pilares, os deslocamentos para ambos os modelos foram bem pequenos e quase iguais. Porém, no edifício 2, com pilaresparede de menor largura, a influência da excentricidade da ligação nos deslocamentos foi bem menor devido à redução da superfície de aplicação da carga horizontal de vento.

Nas combinações C+V( $0^\circ$ ) e C+V( $90^\circ$ ), a alteração da rigidez na ligação viga e pilarparede dentro de um mesmo modelo provocou um aumento dos deslocamentos, de maneira suave, mas linear, indicando forte correlação entre as variáveis. Considerando a influência de  $\alpha_r$  o maior percentual acumulado foi também na direção de menor rigidez, porém os maiores aumentos percentuais acumulados foram obtidos nos modelos de vigas centradas, iguais a 5,09% e 5,07% para os edifícios 1 e 2, respectivamente.

Em relação ao parâmetro gama-z, conclui-se que, quanto menor o fator de restrição  $\alpha_r$ , maior será o aumento do valor desse parâmetro. Além disso, ao variar a posição da viga em relação ao pilar-parede, ocorre mudança significativa na estabilidade global de um edifício, pois quanto mais excêntrica é a viga, maior será o valor do parâmetro gama-z. Mesmo com a mudança na largura dos pilares, os modelos dos edifícios 1 e 2 se comportaram como estruturas de nós rígidos. Diante disso, mostra-se a importância da ligação entre vigas e pilares-parede, tanto em relação à excentricidade quanto a restrição à rotação, na estabilidade global, visto que a análise estrutural deve ser cuidadosa a fim de reduzir deslocamentos excessivos na estrutura.

## Referências

- ALVA, G. M. S. **Estudo teórico-experimental do comportamento de nós de pórtico de concreto armado submetidos a ações cíclicas**. São Carlos. 218p. Tese (Doutorado)—Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2004.
- ARAÚJO, J. M. **Curso de concreto armado**. Porto Alegre: Dunas, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto armado – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- BERTERO, V. V.; POPOV, E. P. Seismic Behavior of Ductile Moment-Resisting Reinforced Concrete Frames. **ACI Special Publication**, [S. l.], v. 53, p. 247-292, 1977.
- DINIZ, C. W. da S. **Estabilidade global de estrutura de edifícios considerando a influência da excentricidade na ligação viga-pilar parede**. 2017. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2017.
- FRANCO, M.; VASCONCELOS, A.C. Practical assessment of second order effects in tall buildings. *In*: COLOQUIUM ON THE CEB-FIP MC90, 1991, Rio de Janeiro. **Proceedings[...]**. Rio de Janeiro, 1991.
- KIMURA, A. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado**: cálculo de edifícios com o uso de sistemas computacionais. São Paulo: PINI, 2007.

- LINS, F. F. V. **Contribuição à avaliação da estabilidade global e pré-dimensionamento de pórticos planos em concreto pré-moldado**. 2013. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- LIMA, J. S. **Verificações da punção e da estabilidade global em edifícios de concreto: desenvolvimento e aplicação de recomendações normativas**. 2001. 248 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- MONCAYO, W. J. Z. **Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado**. 2011. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011
- OLIVEIRA, D. M. **Estudo dos processos aproximados utilizados para a consideração das não-linearidades físicas e geométricas na análise global das estruturas de concreto armado**. Belo Horizonte, 2007. 396 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- PINTO, R. S. **Não-linearidade física e geométrica no projeto de edifícios usuais de concreto armado**. 1997. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.
- SCADELAI, M. A. **Dimensionamento de pilares de acordo com a NBR 6118:2003**. 2004. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- STRAMANDINOLI, R. S. B. **Modelo de elementos finitos para análise não linear física e geométrica de vigas e pórticos planos de concreto armado**. 2007. 237 f. (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

## Sobre os autores

---

### **Pablo Juan Lopes e Silva Santos**

Engenheiro civil pela Universidade Federal do Piauí – UFPI. Mestrando em Engenharia de Materiais pelo Instituto Federal do Piauí - IFPI. Tem experiência como docente na área de estruturas.

### **Carlos Henrique Leal Viana**

Engenheiro Civil pela Universidade Estadual do Piauí – Uespi. Mestrando em Engenharia de Materiais pelo Instituto Federal do Piauí – IFPI.

---

**Recebido em:** 10/11/2019

**Aceito em:** 17/12/2019