

HIERARCHICAL MODELING OF SHEAR-WALLS STRUCTURES

Carlos Henrique Rodrigues Batista da Silva

carloshcv@gmail.com

Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Petrus Gorgônio Bulhões da Nóbrega

petrus.nobrega@gmail.com

Departamento de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Selma Hissae Shimura da Nóbrega

shsnobrega@gmail.com

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Campus Universitário, Lagoa Nova, 59078-970, Natal-RN, Brasil

Abstract. The consideration of the horizontal displacements and forces produced by lateral actions such as wind or earthquake is mandatory for tall buildings. In order to reduce the effects generated by bending and twisting of the building, structural systems known as "bracing" are used. As examples of these systems, there are frames and shear-wall elements; this last one, usually located inside the buildings, with a small thickness when compared to the other dimension of the cross section. The Brazilian design of concrete structures standard code (NBR 6118:2014) has some procedures related to the shear-walls analysis. Although the NBR 6118 considers it as a surface structure, this code permits its representation by a linear element. This structural model simplification has advantages, but nowadays, considering the wide access to computational softwares for structural analysis, it is important to evaluate the shear-wall behavior and internal forces with more complex models. This paper analyses several mathematical models with increasing degree of complexity (hierarchical modeling) to simulate usual geometries of shear-walls such as rectangular, U, lipped-U and E sections, evaluating their behavior by a Finite Elements code. The results were compared to those obtained from the evaluation of a model considered more complex called the "comprehensive mathematical model". In addition, the main theoretical concepts of the hierarchical modelling are discussed.

Keywords: Shear-wall; Hierarchical modeling, Mathematical model

1 Introdução

Para o projeto de edifícios altos de concreto, é fundamental o conhecimento dos deslocamentos horizontais produzidos pelas ações laterais, como o vento ou o sismo, e a análise dos parâmetros de estabilidade da edificação. Ademais, para o controle das deformações e dos esforços decorrentes da flexão e da torção que se manifestam na edificação, concebe-se um sistema “de contraventamento”; o qual, no caso de prédios de concreto, é usualmente composto por pórticos, ou por pilares-parede, ou ainda por um sistema misto, no qual se tem conjuntos de pórticos trabalhando solidariamente a pilares-paredes. Estes últimos, muitas vezes, formam verdadeiros núcleos de rigidez, e comumente são executados nas regiões dos poços de elevadores, escadas ou laterais da edificação, formando as ditas “empenas”.

Os pilares, naturalmente, são modelados por barras, elementos unidimensionais; já os pilares-parede, por possuírem pequena espessura (ou largura), quando comparada às suas demais dimensões, constituem uma superfície simples (no caso de apresentarem seção transversal retangular) ou composta (com seção em formato L, U, por exemplo). Ressalta-se aqui: embora um pilar-parede possa ser matematicamente associado a um modelo de barra, representado por um único elemento cuja seção transversal teria uma área e as inércias à flexão e à torção iguais às do núcleo que se quer representar, claramente este não é o modelo mais adequado.

A norma brasileira NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (ABNT [1]) faz pouca referência quanto à análise dos pilares-parede, permitindo-se representá-los por elementos lineares, desde que seja considerada a deformação por cisalhamento e o ajuste de sua rigidez à flexão para o comportamento real. Não obstante, diante da atual facilidade de acesso aos programas computacionais para análise, torna-se importante avaliar estes elementos considerando-se outros modelos estruturais e que preservem ainda a característica da simplicidade.

Medeiros [2] relata que em casos onde a presença do núcleo de rigidez provoca assimetria na estrutura do edifício, pela não coincidência do centro de rigidez com o centro de massa do pavimento, a sua representação por uma barra única conduz a modelos que não captam de forma precisa o real comportamento da estrutura. Entende-se, portanto, que para tais situações a definição de modelos com hipóteses que envolvam maior complexidade na análise é crucial para a correta avaliação de seu comportamento estrutural.

Neste sentido, este trabalho propõe-se a estudar modelos matemáticos que correspondam às idealizações de uma estrutura (problema físico real), com grau de complexidade crescente, pela técnica conhecida como modelamento hierárquico (Bucalem e Bathe [3]). Nas análises serão estudadas as geometrias usuais de pilares-parede como o formato retangular, U, U enrijecido e E, e avaliados os respectivos comportamentos por meio de um código comercial baseado no Método dos Elementos Finitos, o ADINA versão 9.4.3. Os resultados foram comparados às soluções obtidas a partir da avaliação de um modelo considerado mais complexo. Além disso, foram discutidos os principais conceitos teóricos na definição do modelo matemático mais eficiente.

2 Pilares-parede

Os sistemas de contraventamento são conjuntos de elementos estruturais responsáveis por garantir a estabilidade lateral da estrutura, seja por redução do comprimento de flambagem das peças, seja por acréscimo de rigidez lateral, ocasionando a redução dos deslocamentos horizontais. Esses sistemas, a depender dos elementos que os compõem, podem apresentar comportamentos distintos quando de sua solicitação por ações externas. O desempenho e a configuração deformada de um contraventamento composto apenas por pórticos são diferentes dos apresentados por um sistema composto somente por pilares-parede. Para compreender esse fato é preciso ter em mente como esses elementos estruturais se comportam isoladamente.

Os pórticos se caracterizam pela associação de pilares e vigas trabalhando em conjunto para

resistir às solicitações horizontais e encontram-se submetidos preponderantemente aos efeitos de flexão. Por sua vez, os pilares-parede são submetidos predominantemente aos efeitos do momento fletor ou do esforço cortante, a depender de sua classificação quanto à esbeltez. Wight e MacGregor [4], ao tratar dos pilares-parede com seção transversal retangular, afirmam que os efeitos de cisalhamento são predominantes em elementos curtos, com relação altura/comprimento menor ou igual a 2. Destaca-se que a altura em questão corresponde à dimensão vertical total do pilar-parede (ou altura da edificação correspondente ao pilar-parede) e o comprimento trata da maior dimensão de sua seção transversal. Quando essa relação é superior a 3, o elemento estrutural é classificado como esbelto, ou delgado, e predominam os efeitos de flexão. Para o caso de pilares-parede com razão altura/comprimento variando entre 2 e 3, o comportamento apresentado é uma combinação dos efeitos de flexão e cisalhamento.

De acordo com Araújo [5], em um sistema de contraventamento misto, Fig. 1, o comportamento do conjunto é fortemente influenciado pelas forças de interação decorrentes da compatibilização dos deslocamentos, haja vista que o topo do pilar-parede apresenta maiores deslocamentos que os sofridos pelo pórtico. Desse modo, segundo Wight e MacGregor [4], o pórtico poderá ou não se constituir em um impedimento à deformação do pilar-parede, a depender de sua rigidez.

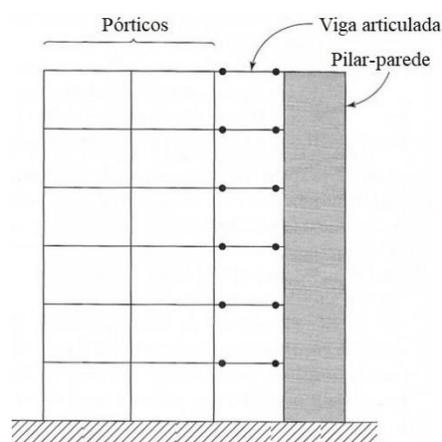


Figura 1. Sistema de contraventamento misto. Adaptado de Wight e MacGregor [4]

Para os casos em que o pórtico apresenta maior rigidez que o pilar-parede, a representação de seu efeito no modelo estrutural deste último, Fig. 2a, pode ser feita por meio de um apoio fixo no topo do pilar-parede. Caso contrário, o sistema pode ser modelado como uma viga vertical engastada na base e com extremidade livre. À medida que a rigidez lateral do pórtico diminui em comparação com a rigidez lateral do pilar-parede, a restrição ao deslocamento no topo desse último também diminui. Assim, o módulo da reação horizontal tenderá a zero no caso extremo em que se tem o pórtico muito flexível associado à parede estrutural.

Em função da rigidez dos pórticos e, conseqüentemente, da intensidade de restrição ao deslocamento do topo do pilar-parede, os diagramas de esforço cortante e momento fletor podem variar conforme ilustrados nas Figuras 2b e 2c, respectivamente.

De acordo com a NBR 6118:2014, em seu item 14.4.2.4, pilares-parede são definidos como “elementos de superfície plana ou casca cilíndrica, usualmente dispostos na vertical e submetidos preponderantemente à compressão, podendo ser compostos por uma ou mais superfícies associadas”. Além disso, para que a estrutura seja classificada como um pilar-parede, em alguma dessas superfícies a menor dimensão deve ser, obrigatoriamente, menor que 1/5 da maior, sendo ambas consideradas em relação à seção transversal do elemento estrutural.

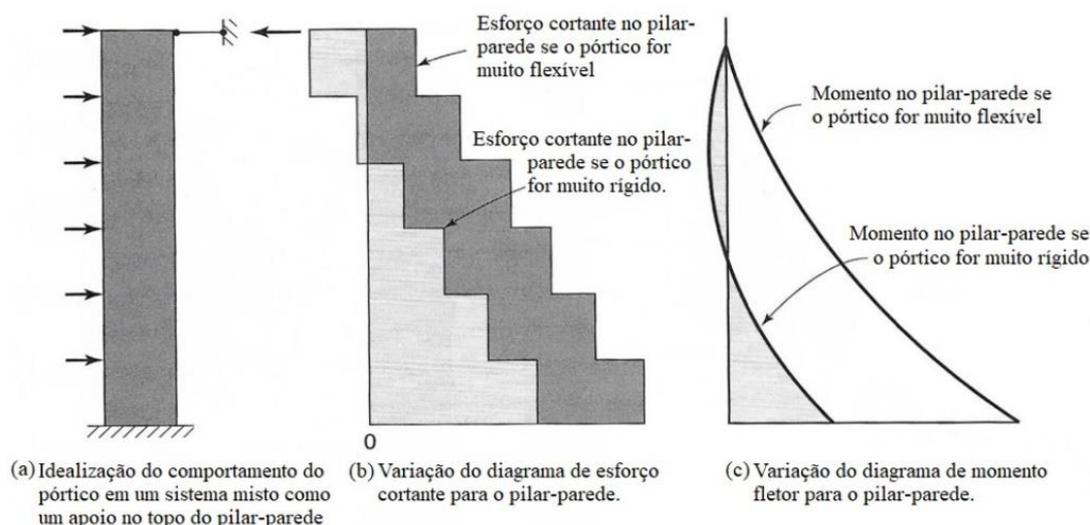


Figura 2. Modelo estrutural e diagramas de esforços em função da rigidez do pórtico. Adaptado de Wight e MacGregor [4]

Ainda segundo a mesma norma, conforme descrito no item 14.8.1, permite-se representar o pilar-parede por um elemento linear, desde que seja considerada a deformação por cisalhamento e o ajuste de sua rigidez à flexão para o comportamento real. Todavia, nela não há qualquer orientação ou referência acerca deste ajuste da viga à flexão. Existe, por fim, no item 15.9.1, um adendo para a consideração dos pilares-paredes como elementos lineares no conjunto resistente da estrutura: sua seção transversal deve ter a forma mantida por travamentos adequados em todos os pavimentos e deve-se proceder à avaliação dos efeitos de 2ª ordem locais e localizados. Para a consideração desses efeitos, quando já na fase do dimensionamento da armadura, permite-se dividir o pilar-parede em faixas verticais, conforme trata o item 15.9.3, que deverão ser analisadas como pilares isolados, Fig. 3. Este critério foi utilizado em um dos modelos do pilar-parede, devidamente discutido à frente.

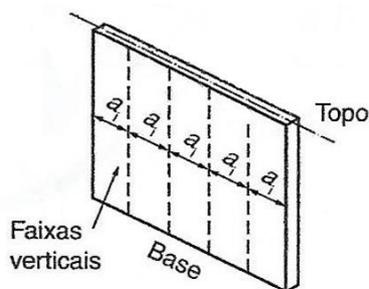


Figura 3. Pilar-parede em faixas verticais. Adaptado da NBR 6118:2014 [1]

É preciso destacar que, para a aplicação desse processo de dimensionamento, a esbelteza de cada superfície que compõe o pilar-parede deve ser inferior a 90, e a largura de cada faixa vertical deve respeitar a seguinte relação:

$$a_i = 3 h \leq 100 \text{ cm}$$

Onde: a_i é a largura da faixa i ; e h , a espessura da lâmina do pilar-parede.

3 Modelamento hierárquico

Inicia-se a discussão da estratégia do modelamento hierárquico apresentado por Bucalem e Bathe [3] a partir da conceituação de modelo matemático. Este nada mais é do que uma idealização da estrutura (real) que se pretende analisar, e a partir da qual será possível prever seu comportamento

estrutural extraindo-se as respostas necessárias (ou esperadas) para o projeto. Para isto, ele deve conter informações acerca da geometria, dos materiais utilizados, das ações impostas, e as equações (teorias e hipóteses) que associam tais dados aos fenômenos físicos que se deseja estudar. Evidentemente, este conceito pode ser expandido para uma vasta gama de problemas de engenharia incluindo problemas de fluidos, efeitos térmicos, magnéticos, dentre outros, tratando de variados meios (contínuo, fluido, poroso, etc.) e escalas diversas.

Durante o processo de análise de uma estrutura por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), as hipóteses podem ser alteradas para melhor representar o problema físico e, geralmente, isto é realizado após a análise e interpretação dos resultados. Neste ponto, surge um questionamento acerca destas respostas: até que ponto serão elas confiáveis e precisas na representação do problema real? É possível que apenas um modelo matemático seja suficiente para fornecer as respostas esperadas?

Insera-se aqui, a ideia do modelamento hierárquico.

A modificação ou consideração de novas hipóteses conduz a um aumento gradual da complexidade do modelo inicialmente proposto que passa a incorporar outros efeitos físicos de interesse. Desta forma, é possível considerar certo número de modelos matemáticos, em sequência pelo seu grau de complexidade e refinamento crescente, em um procedimento denominado “modelamento hierárquico”. Este consiste, portanto, em propor e analisar modelos com níveis de complexidade crescente em suas hipóteses (daí a sua numeração sequencial) até que se consiga alcançar, pelo menos conceitualmente, o “modelo matemático abrangente” que, por sua vez, é o mais completo e preciso na representação do problema físico (problema real), servindo como referência para a avaliação dos modelos de menor ordem, não havendo necessidade de ser resolvido.

Neste ponto, destaca-se que um modelo de baixa ordem hierárquica fornece uma ideia preliminar do comportamento estrutural e, pela sua simplicidade, envolve baixo custo computacional. Por este motivo, no procedimento hierárquico em análise estrutural pelo Método dos Elementos Finitos, o que se deseja é um modelo matemático de mais baixa ordem que forneça todas as respostas esperadas com precisão requerida. Considera-se que, para a avaliação da precisão dos resultados computacionais e para a decisão sobre a confiabilidade do modelo matemático empregado, é imprescindível a experiência do engenheiro, que deve ter em mente os dois conceitos: precisão das respostas e confiabilidade do modelo matemático.

Por precisão entende-se o quão próxima uma determinada resposta encontra-se de um parâmetro de referência (ou nível de precisão) estabelecido, e que pode ser alcançado por meio de uma malha de elementos finitos suficientemente discretizada. Por confiabilidade de um modelo matemático entende-se que o MEF deva fornecer uma resposta razoável para um modelo bem formulado e para uma malha razoável de elementos finitos (isenta de distorções graves nos elementos).

Desta forma, na busca pelo modelo que melhor represente o problema em estudo, deve-se pensar naquele de ordem hierárquica mais baixa, que seja confiável e produza resultados dentro de certo nível de precisão.

Analogamente na metodologia para descrever o modelamento hierárquico, desenvolvida por Bucalem e Bathe [3], mas diferente no objeto, este trabalho propõe-se a discutir a técnica empregando a estrutura de um pilar-parede. Com este procedimento, deseja-se tornar a abordagem do assunto mais objetiva e esclarecedora à medida que permite a discussão específica do problema proposto neste artigo.

Assim, para a definição do modelo matemático dos pilares-parede deve-se pensar nas seguintes questões:

Como representar as ações externas?

Os pilares-parede, por serem usualmente internos à edificação, não recebem de forma direta a ação externa atuante no edifício, mas de forma indireta, por meio da transmissão dos esforços entre os pórticos que constituem as fachadas e outros, internos, que os interligam. Portanto, para a determinação das ações específicas atuantes no pilar-parede, foi empregado, neste trabalho, o código computacional desenvolvido por Stabile *et al.* [6] que considera todos os elementos estruturais (ou subestruturas) da edificação (pórticos e/ou pilares-parede) na determinação das frações de carga que

atuam sobre cada um desses elementos. O programa fornece, dentre outras variáveis, a força horizontal e o momento torsor concentrados atuantes em cada pavimento, e estes foram considerados como ações impostas nos modelos matemáticos dos pilares-parede. Ressalte-se que o momento torsor pode surgir em função da não coincidência entre a posição do centro de cisalhamento do pilar-parede e a linha de ação da força lateral considerada sobre a edificação.

Percebam-se três aspectos, ao se proceder desta maneira: (a) os esforços solicitantes sobre o pilar-parede isolado são representativos da modelagem da estrutura como tridimensional (pelo programa de Stabile *et al.* [6]); (b) as respostas das análises de cada um dos modelos serão inicialmente comparadas às do modelo tridimensional, em raciocínio extensivo; e (c) a aplicação da força horizontal e do momento torsor manifestarão todos os esforços solicitantes ao longo do comprimento, como flexão, cortante, e torção.

Como representar as restrições ao movimento?

Os pilares-parede serão, como já descrito no item 2 deste artigo, considerados engastados na base com a extremidade livre.

Como representar a estrutura real?

A forma inicial para idealizar a estrutura do pilar-parede é proposta pela própria NBR 6118:2014, ou seja, um segmento linear vertical. Esta é a configuração do modelo matemático mais simples – Modelo Matemático 1, um conjunto de barras retilíneas dispostas verticalmente, localizada no centro de gravidade (CG) da seção do pilar-parede, com base engastada e forças aplicadas ao nível de cada pavimento. Deste modelo é possível obter os deslocamentos (lineares e de rotação) em cada nível e os esforços internos.

Destaca-se que embora os conceitos relativos aos termos centroide, centro de gravidade e centro de massa sejam específicos para cada um deles, em se tratando de estruturas compostas por um mesmo material (densidade homogênea) e submetidas a um mesmo campo gravitacional, sua localização coincide e, portanto, doravante, o termo centro de gravidade (CG) será adotado como referência.

Das hipóteses consideradas no Modelo Matemático 1 sobre as ações impostas, condições de vinculação e geometria, a que mais se destaca é a de se usar um conjunto de barras retilíneas para representar a estrutura. Evidentemente, a forma como estes parâmetros são impostos afeta diretamente a qualidade (e precisão) dos resultados obtidos quando comparados às respostas reais. Significa, portanto, que seria interessante propor outros modelos matemáticos associados a outras hipóteses e condições de análise, a fim de avaliar (e comparar) suas respostas às de referência.

Prosseguindo no exemplo do pilar-parede, os modelos matemáticos a serem considerados neste trabalho, e que serão avaliados por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), são:

Modelo Matemático 1 (ou **Modelo 1**), formado por um único segmento de barras retilíneas verticais (elementos de viga) localizado no CG da seção transversal do pilar-parede, com as forças e momentos torsores impostos no CG. Neste modelo serão contempladas as teorias de Bernoulli (**Modelo 1B**) e de Timoshenko (**Modelo 1T**); neste último considerados os efeitos de flexão e de cisalhamento;

Modelo Matemático 2 (ou **Modelo 2**), formado por barras retilíneas verticais (elementos de viga) posicionadas no CG de cada lâmina (ou parede, quando o pilar for uma superfície composta). Ao nível de cada pavimento, barras rígidas horizontais interligam o centro de cisalhamento (CC) da seção transversal aos nós das barras verticais, representando o comportamento do diafragma rígido, inspirado na proposta de Yagui, apud Pereira [7]. Neste modelo, as ações são impostas no centro de cisalhamento (CC);

Modelo Matemático 3 (ou **Modelo 3**), formado por uma malha de barras (elementos de viga) localizadas no CG de cada faixa de largura a_i definida segundo a recomendação da NBR 6118:2014 e, ao nível dos pavimentos são inseridas barras rígidas, unindo o CC (no qual as ações são impostas) e os nós das faixas. Após a avaliação dos modelos preliminares, verificou-se a necessidade de incluir dois

travamentos intermediários, igualmente espaçados entre os pavimentos, e unindo o nó da faixa central da alma aos nós das demais faixas, a fim de garantir uma configuração deformada compatível; e

Modelo Matemático 4 (ou **Modelo 4**), formado por elementos de superfície (elementos de casca) dispostos na vertical e considerando, como nos demais modelos, as ações impostas no CC.

A Fig. 4 ilustra a sequência dos modelos matemáticos descritos, tomando, para esta imagem, o pilar de formato U como exemplo.

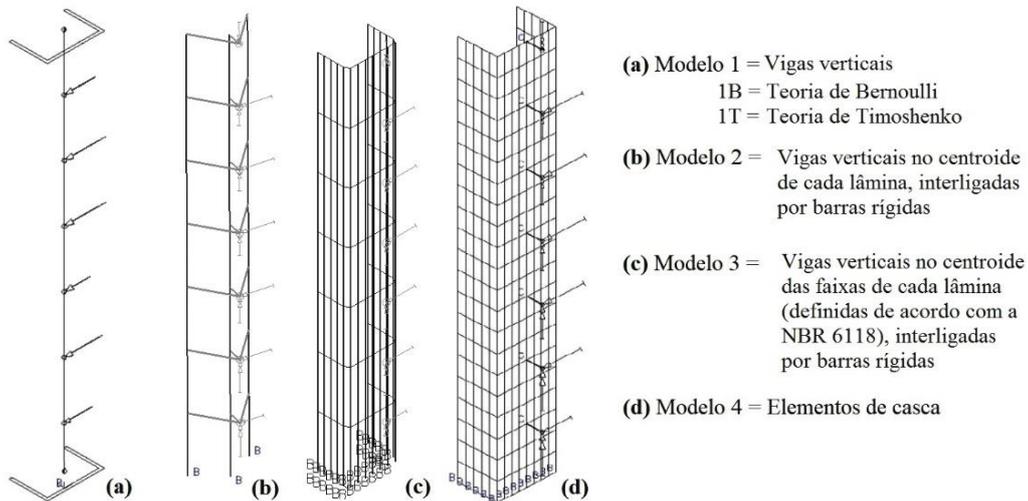


Figura 4. Modelos matemáticos hierárquicos 1, 2, 3 e 4

4 Modelamento hierárquico de pilares-parede

4.1 Características da estrutura em análise e ações

Características geométricas e de material

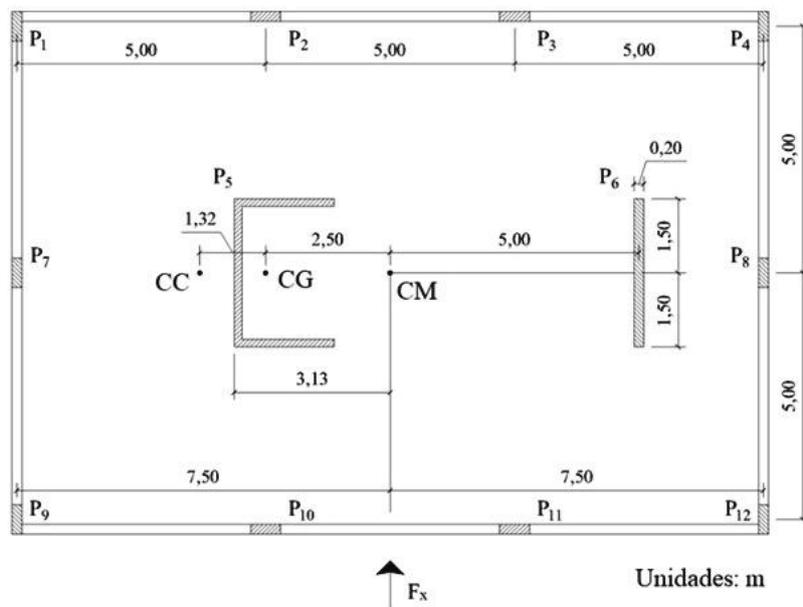


Figura 5. Pavimento-tipo. Adaptado de Araújo [5]

A Fig. 5 mostra o pavimento tipo de um edifício didático composto por 4 pórticos, um pilar-parede com formato U e uma parede estrutural (que não é objeto de estudo neste trabalho). As vigas apresentam seção retangular de 20 cm × 60 cm, os pilares 20 cm × 50 cm e a parede estrutural (P6), 20 cm × 300 cm. A mesma planta será empregada nas análises das configurações de pilares-parede de seção retangular, e de formatos U, U enrijecido e E, seguindo as dimensões apresentadas na Fig. 6, sempre inseridos na mesma posição do pilar-parede mostrado na Fig. 5. Foram analisados edifícios com 7 e 14 pavimentos, sendo a altura entre estes de 3,00 m.

Tem-se, na figura, que P_n é o n ésimo pilar da edificação; CC, o centro de cisalhamento do pilar-parede; CG, o centro geométrico do pilar-parede; CM, o centro de massa do pavimento; e F_x , a resultante da força no pavimento.

O módulo de deformação secante do concreto (E_{cs}) foi calculado conforme estabelece a NBR 6118:2014, considerando um concreto de classe C30, resultando em 26.838,400 MPa e o módulo de elasticidade transversal (G), 11.182,667 MPa.

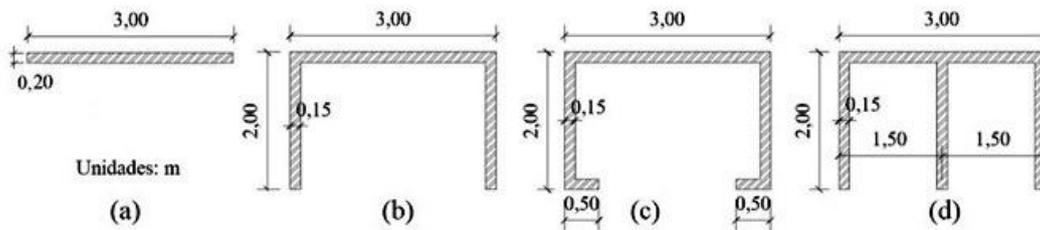


Figura 6. Seções transversais dos pilares-parede analisados

Ações externas

Considerou-se exclusivamente o vento como ação externa, determinado conforme preconiza a NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações (ABNT [8]). A fim de minimizar o volume de dados apresentado, neste artigo utilizou-se apenas a força a 90°, conforme indicado na Fig. 5. A Tabela 1 apresenta os módulos das forças horizontais em cada pavimento.

Destaca-se que os valores atribuídos para o último pavimento consideram a altura de influência de 1,5 m e que estas foram as forças consideradas no programa de Stabile *et al.* [6] para a determinação das frações de força e momento tórsor concentrados por pavimento, atuantes no pilar-parede em análise.

Tabela 1: Forças horizontais resultantes nas lajes dos pavimentos [kN]

Pav.	Altura (m)	Força (N)	
		Edif. 7 pavs.	Edif. 14 pavs.
1	3,00	14.500,0	15.600,0
2	6,00	19.400,0	21.100,0
3	9,00	21.500,0	23.400,0
4	12,00	23.100,0	25.200,0
5	15,00	24.600,0	26.700,0
6	18,00	25.800,0	27.900,0
7	21,00	13.200,0	29.100,0
8	24,00	-	30.000,0
9	27,00	-	30.900,0
10	30,00	-	31.800,0
11	33,00	-	32.400,0
12	36,00	-	33.300,0
13	39,00	-	33.900,0
14	42,00	-	17.200,0

Modelos matemáticos

As forças e os momentos torsores são aplicados nos nós associados a cada pavimento no caso do Modelo Matemático 1, composto por vigas verticais, ou no centro de cisalhamento do pilar-parede (Modelos Matemáticos 2, 3 e 4), conforme mostra a Fig. 4 que destaca o pilar de formato U. Todos os demais formatos tiveram em seus modelos, considerações semelhantes para a aplicação das ações. Para conectar o centro de cisalhamento ao nó do pilar-parede na lâmina mais próxima, foram usadas barras rígidas com a condição de vinculação usando nós “mestres” (ou “master”), onde as forças são aplicadas; e os nós “escravos” (ou “slaves”) que seguem os deslocamentos dos nós mestres.

Destaca-se que as vigas verticais do Modelo Matemático 3, para os pilares-parede de formato retangular, U, U enrijecido e E, localizadas no CG de cada faixa do pilar, seguem a divisão indicada na Fig.7.

As condições de contorno representam a base do pilar-parede engastada e, ao longo da estrutura, há restrições à rotação em torno do eixo de menor inércia do pilar-parede, assim como à sua rotação em torno do eixo vertical.

Na discretização dos Modelos Matemáticos em elementos finitos foram considerados, na composição de todos os segmentos verticais dos Modelos 1, 2 e 3, elementos de viga (“beam”) de 2 nós. Para o Modelo 4, com elementos de casca, foram efetuados testes de convergência, resultando na definição de 16 nós por elemento.

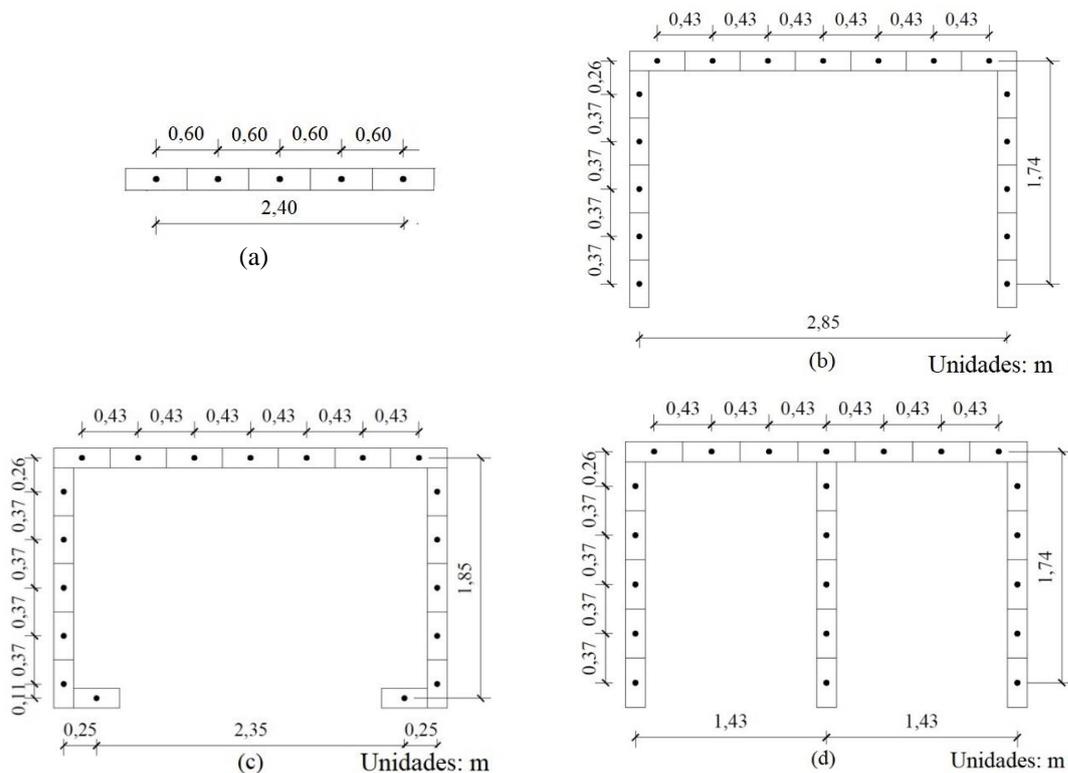


Figura 7 – Subdivisão em faixas verticais de acordo com a NBR 6118:2014 [1]

4.2 Resultados da análise estática linear

O código computacional, baseado no Método dos Elementos Finitos, ADINA (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis) versão 9.4.3, comercializado pela ADINA R&C Inc. foi utilizado para a análise dos modelos matemáticos dos pilares-parede. As respostas obtidas foram confrontadas àquelas resultantes do programa de Stabile *et al.* [6] que, por considerar todos os elementos estruturais em sua formulação, podem ser interpretadas como representativas do comportamento tridimensional da edificação.

Os principais resultados de cada um dos modelos matemáticos serão apresentados nos itens subsequentes, destacando que, para os deslocamentos horizontais no topo da edificação, serão mostrados os valores normalizados em relação aos deslocamentos de referência. Para o cálculo do percentual de variação entre duas respostas quaisquer, toma-se a diferença delas, sempre dividindo-a pelo valor menor dentre as respostas.

Pilar-parede com seção retangular.

As forças e os momentos torsores considerados nos modelos são apresentados na Tabela 2. A Tabela 3 mostra os resultados dos deslocamentos laterais no topo do edifício; os valores ($\delta_{\text{norm.edifício}}$) dos deslocamentos normalizados em relação à resposta de Stabile *et al.* [6] e que, por considerar todos os demais elementos estruturais da edificação em seu modelo, serão identificados neste trabalho como resultados “do edifício”; e os deslocamentos ($\delta_{\text{norm.casca}}$) normalizados pela resposta produzida no modelo de casca (Modelo 4) também são utilizados por representar o modelo hierarquicamente superior. Os valores de referência utilizados como resultado “do edifício” são iguais a 0,37296 cm e 4,19507 cm para 7 e 14 pavimentos, respectivamente.

A Tabela 3 mostra alguns de seus valores destacados com “*” e outros com “#”, simbologia que será empregada nas tabelas comparativas relacionadas à análise estática, com a finalidade de indicar os resultados que mais se aproximam das de referência e as que são menos satisfatórias, respectivamente.

Observa-se que as forças horizontais são todas positivas, agindo no mesmo sentido, exceto no último pavimento, indicando que os pórticos passaram a atuar na restrição ao deslocamento lateral.

Tabela 2 - Forças [N] e momentos [N.m] atuantes no pilar-parede retangular

Pav.	Altura (m)	7 pavimentos		14 pavimentos	
		Força	Torsor	Força	Torsor
1	3,00	17.098,1	129,3	40.632,6	395,3
2	6,00	16.763,5	19,5	36.106,7	126,8
3	9,00	14.312,0	-38,8	27.205,6	-16,9
4	12,00	12.779,1	-63,1	20.435,9	-85,1
5	15,00	12.169,9	-63,9	15.623,9	-114,4
6	18,00	11.010,5	-43,4	13.258,9	-125,2
7	21,00	-9.886,9	-61,8	10.890,4	-126,6
8	24,00	-	-	9.847,2	-124,1
9	27,00	-	-	8.714,2	-119,3
10	30,00	-	-	8.811,9	-112,0
11	33,00	-	-	7.815,2	-98,9
12	36,00	-	-	6.175,8	-77,3
13	39,00	-	-	2.021,2	-45,3
14	42,00	-	-	-18.084,0	182,2

Tabela 3: Deslocamentos laterais e normalizados no topo do pilar-parede retangular

Modelo	7 pavimentos			14 pavimentos		
	δ_{lateral} (cm)	$\delta_{\text{norm.edifício}}$	$\delta_{\text{norm.casca}}$	δ_{lateral} (cm)	$\delta_{\text{norm.edifício}}$	$\delta_{\text{norm.casca}}$
1B	0,42632	* 1,14307	# 0,97921	4,44526	* 1,05964	# 0,99388
1T	0,43718	# 1,17219	1,00416	4,48221	# 1,06845	1,00214
2	0,42632	* 1,14307	# 0,97921	4,44526	* 1,05964	# 0,99388
3	0,43637	1,17002	* 1,00230	4,47947	1,06779	* 1,00153
4	0,43537	1,16733	1,00000	4,47262	1,06616	1,00000

Os deslocamentos laterais no topo da edificação indicam que todos os modelos propostos são flexíveis em comparação aos valores “do edifício”. Com relação aos Modelos 1B e 1T, sabe-se que elementos estruturais esbeltos apresentam predomínio dos efeitos de flexão, enquanto que para os menos esbeltos, prevalecem efeitos de flexão e de cisalhamento. Neste sentido, verifica-se que a resposta do Modelo 1B para 14 pavimentos apresenta a resposta normalizada ($\delta_{norm.edifício}$) mais próxima à resposta “do edifício” e pequena variação em relação à resposta do Modelo 1T, indicando a predominância de efeitos de flexão. Para o edifício com 7 pavimentos a diferença percentual entre suas respostas (2,55%) é superior aos dos mesmos modelos para 14 pavimento (0,83%), indicando influência dos efeitos de cisalhamento.

Os Modelos 2, 3 e 4 possuem ordem hierárquica crescentes, mas os deslocamentos apresentam a mesma ordem grandeza dos obtidos pelos modelos anteriores.

Desta forma, a normalização em relação à resposta “do edifício” mostra que os Modelos 1B e 2 fornecem os mesmos resultados, sendo estes satisfatórios; e a obtida em função do modelo de casca indica que dentre os modelos de vigas verticais, aquele que melhor representa o comportamento do pilar-parede é o Modelo 3, enquanto que o Modelo 2 apresenta os resultados menos satisfatórios.

Pilar-parede com seção U.

As Tabelas 4 e 5 mostram, de forma semelhante ao item anterior, as forças e os momentos torsores, e os resultados dos deslocamentos no topo do edifício e seus valores normalizados em relação à resposta “do edifício” e à do Modelo 4, respectivamente. As respostas de referência “do edifício” são 0,33043 cm e 3,72179 cm para os edifícios com 7 e 14 pavimentos, respectivamente.

Tabela 4: Forças [N] e momentos [N.m] no pilar-parede com seção “U”

Pav.	Altura (m)	7 pavimentos		14 pavimentos	
		Força	Torsor	Força	Torsor
1	3,00	9.702,8	1.046,4	17.683,5	2.524,4
2	6,00	12.993,0	1.013,9	22.256,5	2.235,3
3	9,00	14.085,3	816,4	22.603,7	1.578,2
4	12,00	14.506,5	696,3	21.828,1	1.083,9
5	15,00	14.558,8	652,7	20.461,6	763,5
6	18,00	13.649,9	578,4	19.591,3	613,7
7	21,00	343,0	-661,4	18.219,5	475,3
8	24,00	-	-	17.190,4	434,2
9	27,00	-	-	15.834,8	391,4
10	30,00	-	-	14.973,0	434,7
11	33,00	-	-	13.074,8	409,1
12	36,00	-	-	10.372,7	349,9
13	39,00	-	-	5.637,2	129,7
14	42,00	-	-	-12.478,2	-910,6

Tabela 5: Deslocamentos laterais e normalizados no topo do pilar-parede “U”

Modelo	7 pavimentos			14 pavimentos		
	$\delta_{lateral}$ (cm)	$\delta_{norm.edifício}$	$\delta_{norm.casca}$	$\delta_{lateral}$ (cm)	$\delta_{norm.edifício}$	$\delta_{norm.casca}$
1B	0,23842	0,71319	0,91230	3,22292	# 0,86596	0,97262
1T	0,25806	0,78098	* 0,98745	3,30080	0,88688	* 0,99611
2	0,23009	# 0,69633	# 0,88042	3,63952	* 0,97789	# 1,09834
3	0,27262	* 0,82505	1,04316	3,35811	0,90228	1,01341
4	0,26134	0,79091	1,00000	3,31366	0,89034	1,00000

Os deslocamentos laterais indicam que os modelos têm um comportamento mais rígido que o do modelo “do edifício” e, destes, o Modelo 3 (para o edifício com 7 pavimentos) e o Modelo 2 (para o de 14 pavimentos) são os que apresentam melhor aproximação à resposta “do edifício”. Em análise semelhante à efetuada para o pilar-parede de formato retangular, entre os deslocamentos laterais produzidos pelos Modelos 1B e 1T, observa-se que para 7 pavimentos a estrutura apresenta comportamento influenciado pelo cisalhamento (diferença de 8,24%), enquanto que para 14 pavimentos, predominam os efeitos de flexão (diferença de 2,42%).

A melhor aproximação à resposta “de casca” corresponde ao Modelo 1T para as edificações com 7 e 14 pavimentos. Novamente, verifica-se que o Modelo 2 é o que apresenta os resultados menos satisfatórios, por uma avaliação geral.

Pilar-parede com seção U enrijecido

As forças atuantes sobre o pilar-parede U enrijecido são as indicadas na Tabela 6. A Tabela 7 apresenta os deslocamentos no topo do pilar-parede considerando os seguintes valores de resultados “do edifício” para fins de comparação: 0,33079 cm e 3,69434 cm para 7 e 14 pavimentos, respectivamente. Na mesma tabela são mostrados, também, os deslocamentos normalizados em relação ao Modelo 4.

Tabela 6: Forças [N] e momentos [N.m] no pilar-parede com seção “U enrijecido”

Pav.	Altura (m)	7 pavimentos		14 pavimentos	
		Força	Torsor	Força	Torsor
1	3,00	9.177,2	2.050,5	16.052,0	5.022,2
2	6,00	12.556,6	1.932,3	20.894,1	4.334,3
3	9,00	13.807,5	1.532,9	21.718,8	3.021,9
4	12,00	14.350,8	1.291,1	21.355,2	2.040,3
5	15,00	14.489,4	1.202,7	20.296,9	1.401,2
6	18,00	13.709,6	1.067,5	19.612,4	1.092,1
7	21,00	1.373,7	-1.380,3	18.401,5	816,9
8	24,00	-	-	17.449,2	730,3
9	27,00	-	-	16.158,2	647,4
10	30,00	-	-	15.291,7	730,4
11	33,00	-	-	13.435,9	689,6
12	36,00	-	-	10.810,7	590,0
13	39,00	-	-	6.284,9	189,7
14	42,00	-	-	-11.157,7	-1.801,7

Tabela 7: Deslocamentos laterais e normalizados no topo do pilar-parede “U enrijecido”

Modelo	7 pavimento			14 pavimento		
	$\delta_{lateral}$ (cm)	$\delta_{norm.edificio}$	$\delta_{norm.casca}$	$\delta_{lateral}$ (cm)	$\delta_{norm.edificio}$	$\delta_{norm.casca}$
1B	0,22846	0,69065	0,92006	3,09125	0,83675	0,96690
1T	0,24904	0,75395	* 1,00294	3,19670	0,86530	* 0,99989
2	0,20604	# 0,62288	# 0,82977	2,79997	# 0,75791	# 0,87579
3	0,25342	* 0,76610	1,02058	3,21403	* 0,86999	1,00531
4	0,24831	0,75066	1,00000	3,19706	0,86539	1,00000

Nesta análise, o comportamento dos modelos estudados é mais rígido, como indicam os deslocamentos normalizados pela resposta “do edifício”. A diferença percentual entre as respostas dos Modelos 1B e 1T, para 7 e 14 pavimentos são, respectivamente, 9,01% e 3,41%, confirmando a influência do cisalhamento para o primeiro caso e da flexão para o segundo. O Modelo 3 foi o que mostrou resultados mais satisfatórios e, portanto, mais próximos à resposta de referência.

Com relação aos deslocamentos normalizados pela resposta do modelo de casca, o Modelo 1T mostra as melhores aproximações repetindo o comportamento do pilar-parede U analisado no item anterior, posto que a sua geometria apenas difere na existência das abas enrijecedoras, todas as demais dimensões foram preservadas. Novamente, destaca-se o resultado produzido pelo Modelo 2 que mostra não ser o modelo mais adequado na representação do pilar-parede.

Pilar-parede com seção E

Na Tabela 8 são mostrados os valores das forças e momentos torsores considerados no pilar-parede E, e na Tabela 9, os deslocamentos laterais no topo do edifício obtidos das análises e os valores correspondentes normalizados pela resposta “do edifício” segundo os deslocamentos 0,33034 cm e 3,72099 cm, para 7 e 14 pavimentos, respectivamente. Foram, ainda, incluídos na mesma tabela os deslocamentos normalizados pela resposta do Modelo 4.

Tabela 8: Forças [N] e momentos [N.m] no pilar-parede com seção “E”

Pav.	Altura (m)	7 pavimentos		14 pavimentos	
		Força	Torsor	Força	Torsor
1	3,00	9.693,0	959,7	17.655,3	2.270,3
2	6,00	12.988,5	965,6	22.241,8	2.083,2
3	9,00	14.084,3	796,7	22.598,4	1.505,3
4	12,00	14.507,3	691,9	21.828,2	1.062,4
5	15,00	14.559,8	652,4	20.464,5	773,5
6	18,00	13.649,8	575,3	19.595,5	641,1
7	21,00	350,6	-567,6	18.224,2	513,4
8	24,00	-	-	17.195,2	476,0
9	27,00	-	-	15.839,5	433,4
10	30,00	-	-	14.976,9	471,8
11	33,00	-	-	13.077,8	439,7
12	36,00	-	-	10.374,3	371,3
13	39,00	-	-	5.636,9	143,6
14	42,00	-	-	-12.473,3	-828,0

Tabela 9: Deslocamentos laterais e normalizados no topo do pilar-parede “E”

Modelo	7 pavimentos			14 pavimentos		
	δ_{lateral} (cm)	$\delta_{\text{norm.edifício}}$	$\delta_{\text{norm.casca}}$	δ_{lateral} (cm)	$\delta_{\text{norm.edifício}}$	$\delta_{\text{norm.casca}}$
1B	0,23838	0,72162	0,89775	3,22272	0,86609	0,96413
1T	0,26214	0,79355	* 0,98723	3,31689	0,89140	0,99231
2	0,23005	# 0,69641	# 0,86638	3,05593	# 0,82127	# 0,91424
3	0,27347	* 0,82784	1,02990	3,36156	* 0,90340	* 1,00567
4	0,26553	0,80380	1,00000	3,34260	0,89831	1,00000

Novamente, os deslocamentos normalizados pela resposta “do edifício” são inferiores à unidade, indicando comportamento rígido dos modelos. Os Modelos 1B e 1T apresentam, entre si, a diferença percentual de 9,97% e 2,92% para 7 e 14 pavimentos, respectivamente. As conclusões acerca destes valores mostram a influência dos efeitos predominantes de cisalhamento em edifícios com 7 pavimentos e de flexão para os de 14 pavimentos. Os valores apresentados para os Modelos 2, 3 e 4

reforçam que o Modelo 3 fornece resultados mais satisfatórios, tanto pela análise dos deslocamentos normalizados pela resposta “do edifício”, quanto pelo modelo de casca.

Como nos casos precedentes, o Modelo 2 se destaca por mostrar os resultados menos satisfatórios.

A seguir, a fim de facilitar a análise dos resultados, as Fig. 8a e 8b sintetizam todas os deslocamentos normalizados pela resposta “do edifício” para os diferentes modelos de pilares-parede estudados, considerando edifícios com 7 e 14 pavimentos, respectivamente. As Fig. 9a e 9b, por sua vez, indicam os deslocamentos normalizados em relação ao modelo de casca.

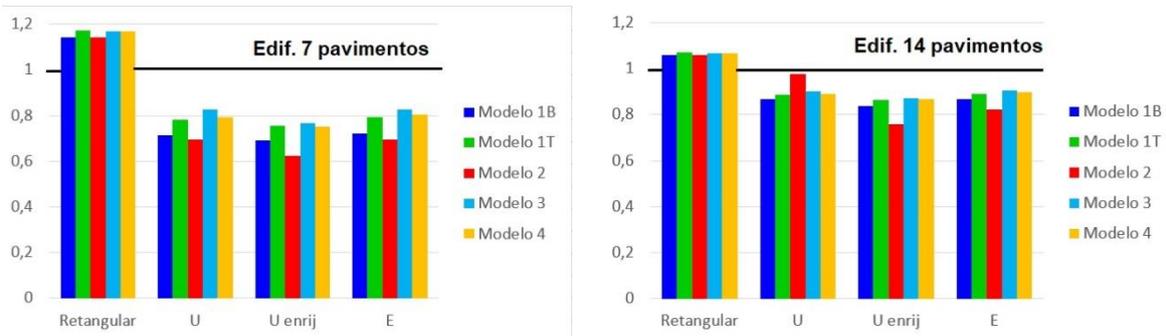


Figura 8. Deslocamentos normalizados pela resposta “do edifício”

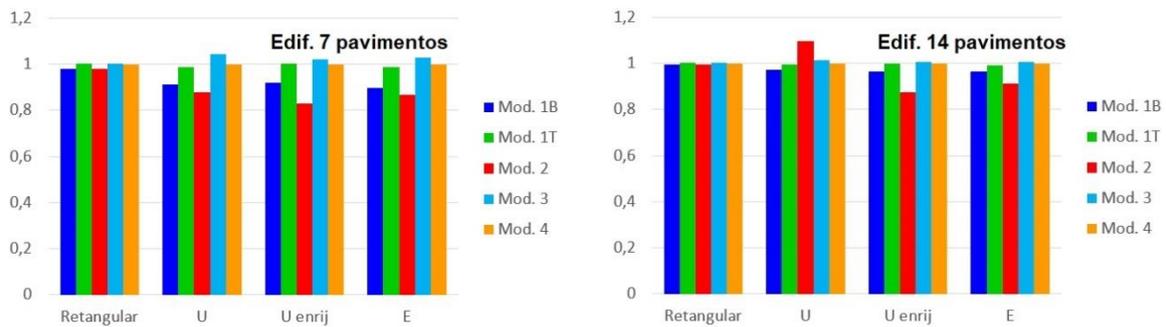


Figura 9. Deslocamentos normalizados pela resposta do modelo de casca

Em síntese, os gráficos da Fig.8 mostram que os modelos matemáticos utilizados para os pilares-parede de formato retangular fornecem respostas flexíveis, enquanto que para as demais configurações, são mais rígidos. De todos os modelos matemáticos, o Modelo 2 (cor vermelha) é aquele que apresenta resultados menos satisfatórios e o Modelo 3 (cor ciano), malha de vigas, mesmo apresentando deslocamentos laterais inferiores aos de referência “do edifício” é o que mostra melhor aproximação.

Em relação ao modelamento hierárquico, confirma-se, pela Fig. 9, na qual são representados os deslocamentos normalizados pela resposta do modelo de casca (cor laranja), que o Modelo 3 é o que melhor representa a resposta estrutural, e que o Modelo 2, não produz respostas satisfatórias. O Modelo 1T também fornece valores próximos aos de casca, porém possui limitações por ser um elemento unidimensional, o que será discutido em sequência.

Ressalta-se que os modelos matemáticos, desde os mais simples como os Modelos 1B e o 1T, assim como os de ordem hierárquica superior, Modelos 2, 3 e 4, apresentam as reações para cada nó da base engastada, ou seja, forças nas direções X e Z e momento em torno do eixo Y. A análise pura destes valores emitidos pelo programa ADINA não permite conclusões; porém o pós-processamento considerando os conceitos de forças equivalentes e áreas de influência possibilita a obtenção das forças reativas, distribuídas na dimensão da seção transversal do pilar em estudo. A Fig. 10 mostra, como exemplo, as reações verticais na base do pilar-parede U, na região da alma e do flange, respectivamente, obtidas como respostas dos modelos 1B, 2, 3 e 4 do edifício com 14 pavtos.

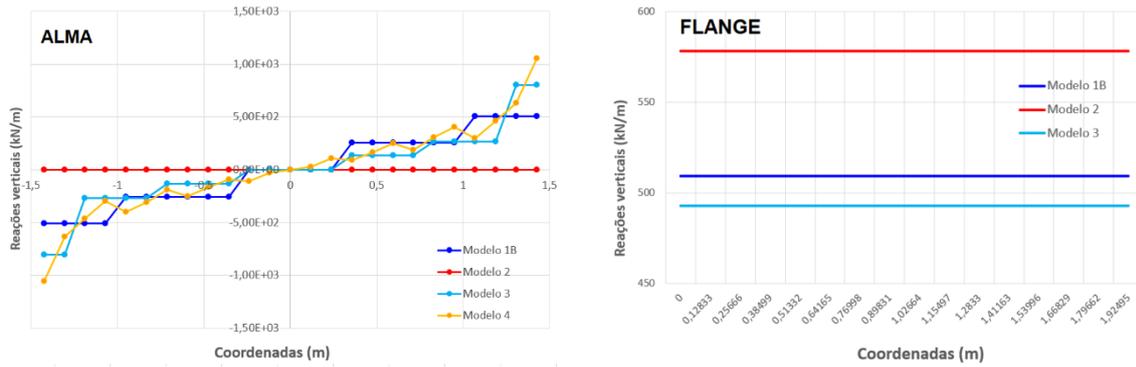


Figura 10. Reações verticais do pilar-parede U – 14 pavimentos.

Destaca-se, na Fig. 10, que em relação à alma, o Modelo 2 apresenta reação vertical nula, pois o mesmo forneceu as reações existentes apenas nos flanges. Para os demais modelos, as forças distribuídas nas larguras de influência produziram valores próximos e comportamentos semelhantes. Relativamente ao flange, a Fig 10 mostra valores de reações verticais constantes para os Modelos 1B, 2 e 3, dos quais o apresentado para o Modelo 2 se distancia dos demais por não considerar a alma na distribuição dos esforços. As reações verticais do Modelo 4 não foram inseridas pois apresentam picos de valores nos nós das arestas, necessitando de uma verificação mais apurada.

O Modelo 4 é o mais complexo da série hierárquica e o único que fornece as tensões diretamente. Se o objetivo do estudo for a determinação, por exemplo, das tensões máximas desenvolvidas ao longo da estrutura, os modelos simples não serão capazes de fornecê-los. A Fig. 10 ilustra a distribuição das tensões normais na direção Z, na região da alma.

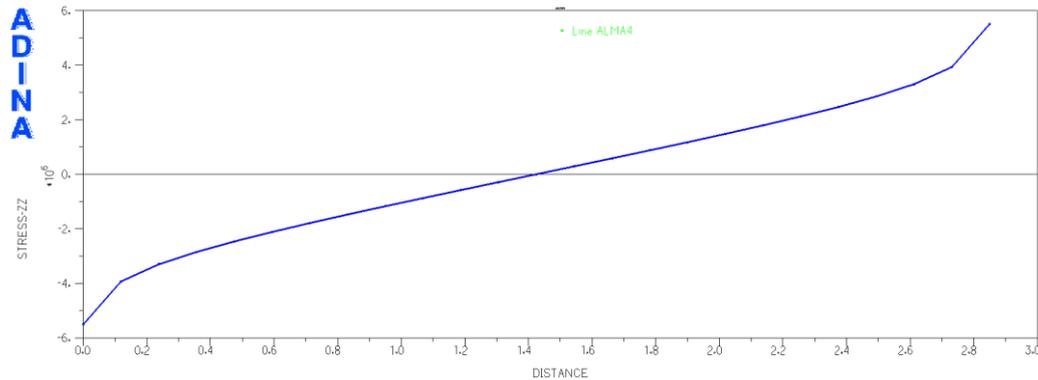


Figura 10. Tensões normais na base do pilar-parede U – Modelo 4

4.3 Resultados da análise modal

De forma complementar à análise estática, são apresentados os resultados de frequência e modos de vibração obtidos da análise modal, a fim de que se possa efetuar uma avaliação adequada sobre os modelos matemáticos em estudo. De fato, o cálculo das propriedades modais considera toda a rigidez da estrutura, ou do elemento, os quais se constituem bons indicadores da precisão dos modelos.

A fundamentação para as conclusões a serem apresentadas a respeito da análise modal pode ser inferida, qualitativamente, nas simples definições de frequência natural (f) e frequência cíclica natural (ω) de um sistema massa-mola com 1 grau de liberdade.

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{onde } \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Onde k representa a rigidez, e m a massa.

Assim, foram determinados os valores das frequências e os modos de vibração dos modelos 1B, 2, 3 e 4, sendo apresentadas, nas Tabelas 10 e 11, a primeira frequência natural de cada um dos edifícios. Os símbolos “*” e “#” destacam as frequências naturais mais baixas e as mais elevadas, respectivamente. Observa-se, também, que os valores do Modelo 2 para o pilar-parede retangular foram omitidos por terem resultado em frequências não compatíveis em comparação às calculadas nos demais modelos.

Tabela 10: Primeira frequência natural (Hz) – 7 pavimentos

	Retangular	U	U enrijecido	E
Modelo 1B	* 0,24003	# 4,98242	# 4,97172	# 4,41866
Modelo 1T	* 0,24003	4,76790	4,67027	4,19074
Modelo 2	---	4,94832	4,95659	4,37191
Modelo 3	* 0,24003	4,62944	* 4,62951	* 4,12150
Modelo 4	# 0,24098	* 4,56787	4,67921	4,17946

Tabela 11: Primeira frequência natural (Hz) – 14 pavimentos

	Retangular	U	U enrijecido	E
Modelo 1B	0,06135	1,25275	1,25002	1,10964
Modelo 1T	* 0,06001	1,23851	1,22964	1,09442
Modelo 2	---	# 1,25867	# 1,26318	# 1,11074
Modelo 3	* 0,06001	* 1,22839	* 1,22646	* 1,08930
Modelo 4	# 0,06135	1,23554	1,22889	1,08964

Observa-se, inicialmente, que as frequências de cada seção de pilar-parede são muito próximas, considerando-se os diferentes modelos. As frequências do pilar-parede com formato retangular indicam que a estrutura é muito mais flexível comparada às demais configurações. Isso é evidente, pois a seção retangular possui rigidez significativa apenas em uma direção, e na perpendicular sua inércia é reduzida. Por outro lado, os demais modelos possuem rigidez substancial nas duas direções ortogonais.

De forma semelhante, é possível concluir, para a sequência iniciada pelo formato U, seguida pelo U enrijecido e pelo E, a influência da rigidez lateral à flexão (pouco alterada pelas abas do U enrijecido, ou pela parede central do pilar-parede E) é inferior ao acréscimo de massa observado. Assim, quanto maior a massa, menor a frequência natural associada, o que explica os valores inferiores de frequência dos pilares-parede com geometria “E” das Tabelas 10 e 11.

Com relação aos modelos matemáticos de baixa ordem, as frequências obtidas com a consideração dos efeitos de cisalhamento (Modelo 1T) são inferiores aos do Modelo 1B, indicando que os deslocamentos laterais do primeiro modelo deverão ser superiores ao do segundo. Esta afirmação pode ser confirmada nas Tabelas 5, 7 e 9. Quanto aos Modelos 2, 3 e 4 do mesmo pilar-parede, verifica-se que, à exceção do pilar-parede U, em edificação com 7 pavimentos, em todas as outras situações de análise, a frequência do Modelo 3 resultou inferior, conduzindo à conclusão de que este modelo é mais flexível. Por ser apresentar esta característica, seus deslocamentos laterais seriam superiores e, portanto, favoráveis à segurança nas considerações de projeto. Esta afirmação pode ser verificada nas Tabelas 7 e 9.

Para uma melhor avaliação dos modelos matemáticos, nas Fig. 11 e 12 são apresentadas as duas primeiras frequências naturais e os dois primeiros modos de vibração associados para os pilares-parede em formato U e E, respectivamente. Destaca-se que as imagens são apresentadas em perspectiva isométrica para melhor visualização.

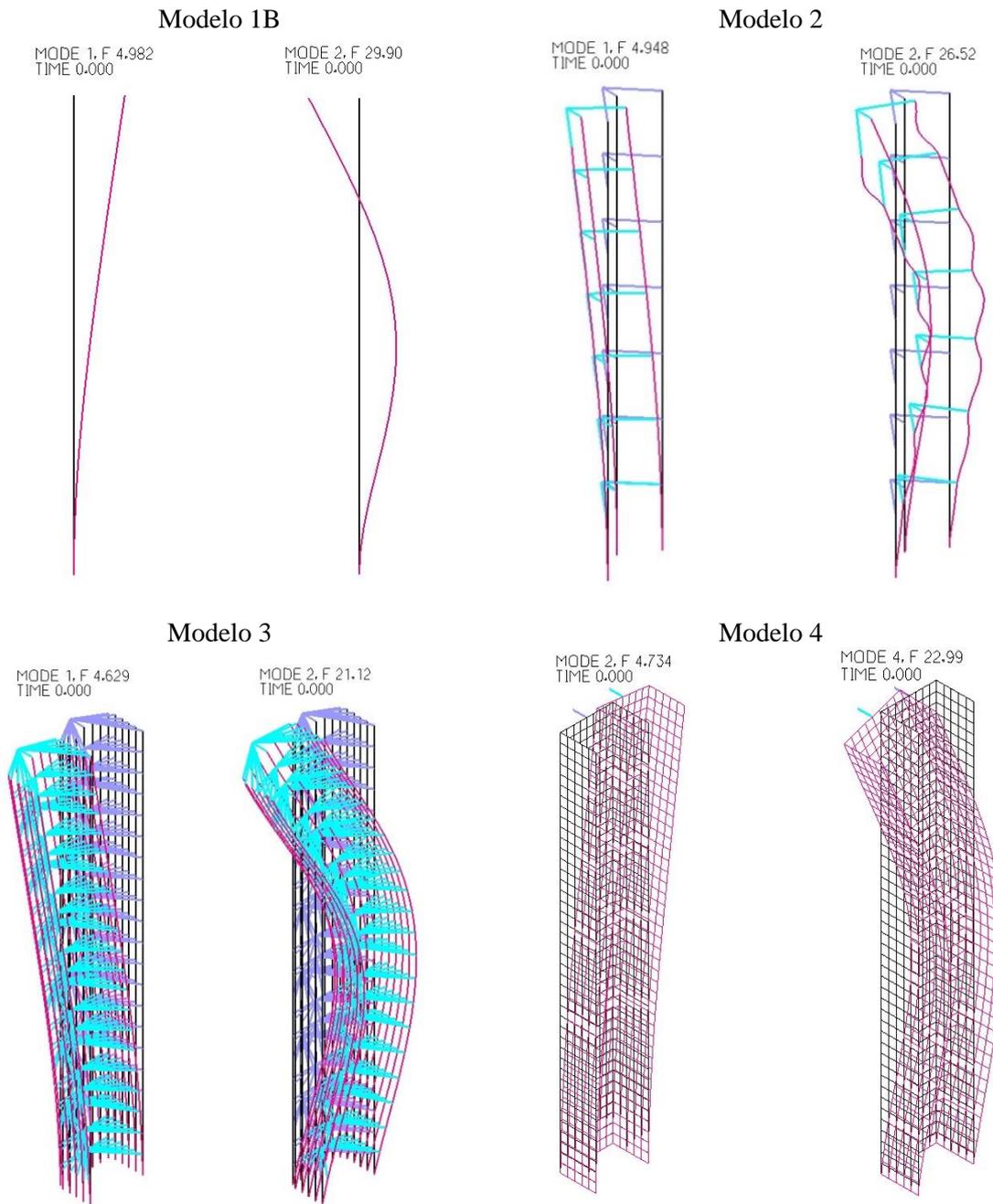


Figura 11. Frequências e modos de vibração para o pilar-parede U

As frequências correspondentes ao 1º e 2º modos de vibração correspondem à flexão do pilar-parede de formato U no plano do eixo de maior inércia. O perfil do 2º modo de vibração do Modelo 2, com os elementos verticais “ondulados”, comprova que este não é adequado para a análise estrutural. Os Modelos 1, 3 e 4 mostram que os modos têm as mesmas características e são fisicamente adequados, reforçando a viabilidade do Modelo 3 para as análises estruturais.

Conclusões semelhantes podem ser tecidas para o pilar-parede de formato E, cujos modos de vibração são apresentados na sequência:

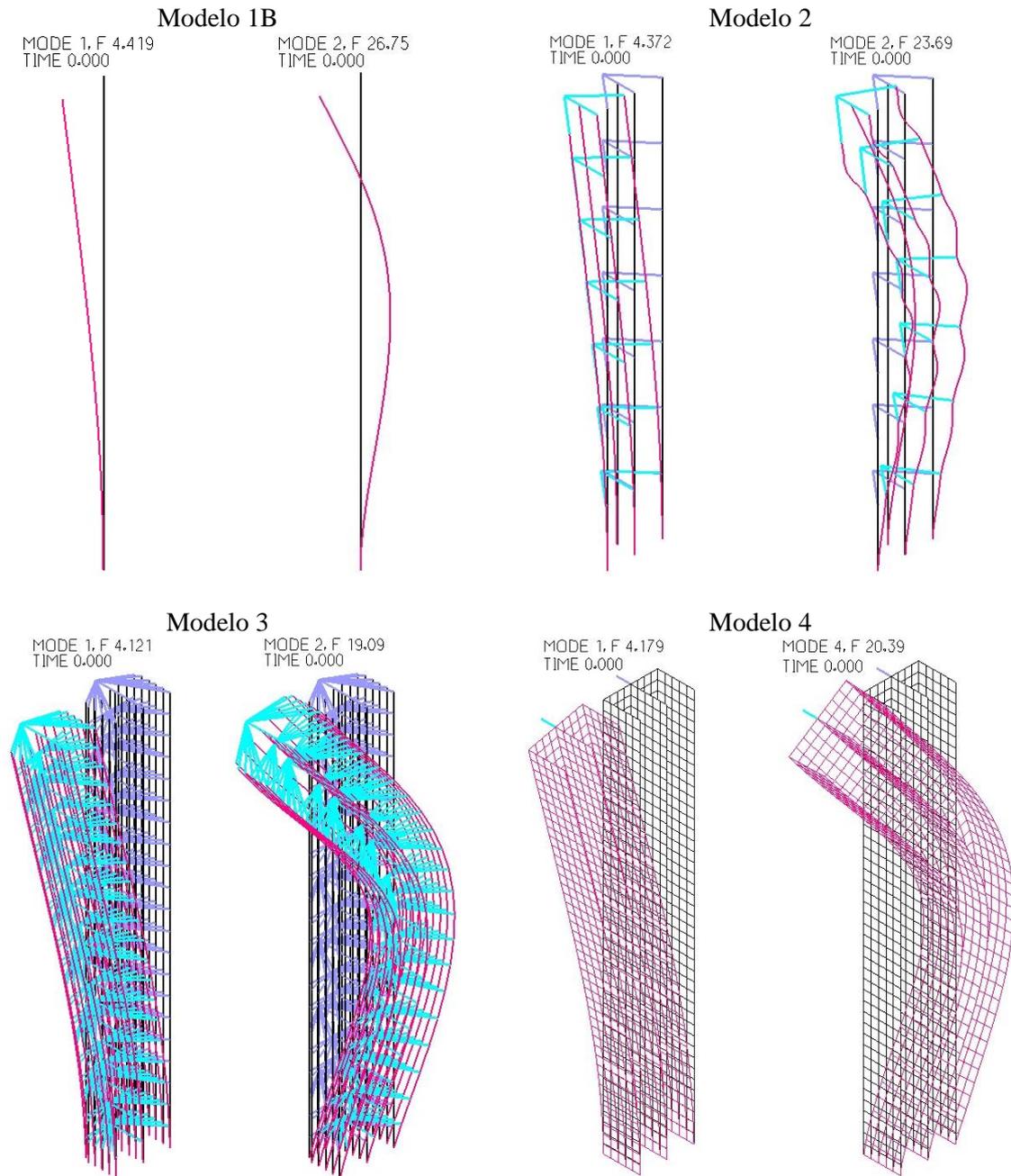


Figura 12. Frequências e modos de vibração para o pilar-parede E

5 Conclusões

Neste trabalho estudou-se o tema “Modelamento Hierárquico” aplicável às análises de estruturas por meio do Método dos Elementos Finitos, abordando seu conceito a partir do estudo de pilares-parede de seções transversais em formato retangular, U, U enrijecido e E. Para cada uma destas geometrias, foram analisados modelos matemáticos em ordem crescente de complexidade a começar pelo Modelo 1B (pilar representado por um único segmento vertical formado por elementos de viga, em teoria de Bernoulli); Modelo 1T (segmento vertical único formado por elementos de viga e consideração da teoria de Timoshenko, ou seja, com efeitos de cisalhamento); Modelo 2 (segmentos verticais em cada superfície do pilar-parede, travadas por barras rígidas ao seu centro de cisalhamento-CC); Modelo 3 (segundo a NBR6118:2014, composta por segmentos verticais em cada uma das faixas

em que as superfícies do pilar-parede são divididas, formando malhas de vigas, e interligadas ao CC por meio de barras rígidas); e, por fim, o Modelo 4 (com as superfícies discretizadas em elementos de casca). Foram realizadas análises estáticas em um edifício didático com 7 e 14 pavimentos para a avaliação dos deslocamentos laterais desenvolvidos no topo do pilar-parede. As reações na base da estrutura e as tensões normais foram apresentadas, discutindo-se os principais aspectos do modelamento hierárquico, ou seja, a capacidade de cada um dos modelos matemáticos em fornecer as respostas requeridas. As respostas em termos de deslocamentos laterais tiveram dois parâmetros de referência para a avaliação do seu grau de confiabilidade: os resultados provenientes de um código que considera todas as subestruturas da edificação (pórticos e pilares-parede) e os decorrentes do modelo hierarquicamente superior, o modelo de cascas (Modelo 4).

As principais conclusões da análise estática foram:

- Os Modelos 1B e 1T confirmaram, a partir dos deslocamentos laterais produzidos nas análises, que os efeitos de flexão associados aos de cisalhamento podem ser observados nos edifícios de pequena altura (no caso, 7 pavimentos), enquanto os efeitos de flexão ocorrem em edifícios elevados (14 pavimentos).

- O Modelo 2, para o pilar-parede de formato retangular, apresentou os mesmos valores de deslocamentos do Modelo 1B, indicando que mesmo com barras rígidas nos pavimentos para representar as lajes, seu comportamento recai na hipótese de Bernoulli, independente da altura do edifício. Para os demais formatos, o Modelo 2 foi o que apresentou respostas menos satisfatórias.

- O Modelo 3, embora não seja o de grau hierárquico superior, foi o que resultou mais satisfatório dentre os modelos estudados.

Com o objetivo de possibilitar uma avaliação mais adequada dos modelos, foi realizada a análise modal a fim de examinar os primeiros e segundos modos de vibração e as frequências associadas, concluindo-se:

- Todos os modelos apresentam seus dois primeiros modos associados à flexão, ou seja, possuem a mesma característica comportamental.

- Os modos de vibração confirmaram a inadequação do Modelo 2 para as análises estruturais e justificam a qualidade das respostas na análise estática.

- O Modelo 3 mostrou-se ser o mais adequado para a análise estrutural. É um modelo matemático com um grau hierárquico superior aos modelos 1B, 1T e 2, e que produz respostas confiáveis e satisfatórias. Em termos de sua geometria é de fácil elaboração, necessitando, para que a sua configuração deformada seja fisicamente compatível, que dois níveis de travamentos horizontais sejam posicionados entre os pavimentos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a ADINA R&C Inc. pela cessão da licença de uso do código ADINA, versão 9.4.3 .

Referências

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- [2] S. R. P. Medeiros. Modelos estruturais de núcleos de edifícios – barra vs. casca. *TQS News*, São Paulo, n. 39, p. 29-35, ago. 2014.
- [3] M. L. Bucalem e K. J. Bathe. *The mechanics of solids and structures – Hierarchical modeling and the finite element solution*. Berlin: Springer, 2011.
- [4] J. K. Wight e J. G. MacGregor. *Reinforced concrete: mechanics and design*. 6. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2012.
- [5] J. M. Araújo. *Curso de concreto armado*. v. 3. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014.
- [6] A. F. Stabile, S. H. S. Nóbrega e P. G. B. Nóbrega. Numerical analysis of shear-wall elements in tall buildings structures. In: Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em

Engenharia, 38, 2017, Florianópolis. *Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*. Belo Horizonte: ABMEC, 2017. <http://dx.doi.org/10.20906/CPS/CILAMCE2017-0703>.

[7] A. C. O. Pereira. Estudo da influência da modelagem estrutural do núcleo nos painéis de contraventamento de edifícios altos. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

[8] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 6123: *Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.