

Cálculo Estrutural de Edifícios de Múltiplos Andares em Aço: Análise Comparativa Entre As Abordagens Bidimensional e Tridimensional

Gabriel Amós Alves Cruz Lima¹, Higor Sérgio Dantas de Argôlo²

¹Universidade Federal de Sergipe/ Departamento de Engenharia Civil
/gabrielamos.eng@gmail.com

² Universidade Federal de Sergipe/ Departamento de Engenharia Civil /higorsergio@ufs.br

Resumo

O uso crescente de estruturas de aço e sistemas mistos de aço e concreto em edifícios reflete a necessidade de adoção de sistemas estruturais cada vez mais leves e eficientes. Ao mesmo tempo, o cálculo estrutural é um processo complexo, exigindo um estudo aprofundado sobre o posicionamento dos elementos estruturais e a determinação dos carregamentos atuantes para que o dimensionamento seja realizado de maneira adequada, atendendo aos diferentes estados-limites. A metodologia escolhida para a análise estrutural influencia diretamente a solução final da edificação e, conseqüentemente, a economia da estrutura. Dentre as diferentes abordagens da avaliação da estrutura, destaca-se a escolha entre realizar uma análise bidimensional ou tridimensional. A primeira leva em consideração pórticos planos trabalhando sem a interferência direta da rigidez dos elementos estruturais fora de seu domínio, consistindo em uma análise simplificada. A segunda, mais complexa que a primeira, proporciona a análise da interação da rigidez entre todos os elementos estruturais da edificação. O presente trabalho trata do cálculo de um edifício de múltiplos andares, dimensionado segundo a NBR 8800:2008, mediante a utilização de um sistema estrutural composto por vigas mistas de aço e concreto, pilares de aço e pórticos rígidos e contraventados. O cálculo estrutural é realizado duas vezes utilizando separadamente, análises bi e tridimensional, a fim de comparar os esforços obtidos em cada abordagem. A análise comparativa indicou esforços internos menores para os elementos do modelo tridimensional, o qual se demonstrou mais rígido devido à atuação conjunta dos diversos elementos estruturais, mesmo que posicionados em diferentes planos.

Palavras-chave

Cálculo estrutural; Edifício de múltiplos andares; Estruturas de aço; Análise bidimensional; Análise tridimensional.

Introdução

O cálculo estrutural é um processo pelo qual se busca obter uma solução ótima para a estrutura, baseado em critérios como menor custo, menor peso, maior facilidade de execução e máxima eficiência estrutural (Bellei et al, 2008). De modo geral, o processo segue as etapas de levantamento de informações sobre a obra e critérios de projeto, determinação das cargas, pré-dimensionamento dos elementos estruturais, análises para verificar o atendimento aos requisitos de resistência e utilização, e redimensionamento, se necessário (o que exige uma nova análise estrutural em um processo iterativo).

Com relação à análise estrutural, as normas adotam simplificações para simular o comportamento de uma estrutura tridimensional mediante uma abordagem

bidimensional. Como na atualidade há uma grande variedade de softwares capazes de realizar a análise considerando o modelo tridimensional, o uso dessas simplificações deve ser questionado.

O presente trabalho aborda o dimensionamento de um edifício de múltiplos andares em aço, seguindo as recomendações da ABNT NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, a partir de abordagens bi e tridimensional.

A análise tridimensional foi realizada com o auxílio de um software de elementos finitos gratuito, denominado MASTAN2, adotando os mesmos perfis obtidos no dimensionamento segundo a abordagem bidimensional (em todos os casos foi utilizado a análise de 2ª ordem elástica). Com isso, será possível realizar uma comparação entre os esforços internos de cada elemento estrutural das duas abordagens. O objetivo deste procedimento é constatar a vantagem, em termos de rigidez estrutural, que o modelo tridimensional proporciona em relação ao modelo bidimensional.

Metodologia

Para estudo de caso, foi realizado o dimensionamento de um edifício contendo 4 pavimentos-tipo, sendo o pé-direito de 2,73m. O edifício é retangular em planta, com dimensões 18mx9m. Na região central do edifício se localizam a escada e o elevador.

Os critérios utilizados para o dimensionamento dos elementos estruturais do edifício foram baseados na ABNT NBR 8800:2008. Os coeficientes de ponderação foram obtidos com base na ABNT NBR 8681:2003 e os valores para as cargas foram calculados com base na ABNT NBR 6120:1980 e ABNT NBR 6123:1988. Além das normas, o processo de dimensionamento foi efetuado seguindo o procedimento apresentado por Bellei et al (2008), com algumas adaptações julgadas como necessárias.

As vigas foram dimensionadas utilizando perfis metálicos W do tipo I, atuando como vigas mistas em conjunto com a laje de concreto armado e fôrma steel deck do tipo MF-50, sem escoramento. Na região da escada e elevador não há a colaboração de laje para atuar juntamente com a viga. Na direção de menor comprimento do edifício, as vigas estão biapoiadas, enquanto na direção de maior comprimento, os pórticos são rígidos.

Para o dimensionamento das colunas, foram considerados perfis metálicos W tipo H, onde os pórticos externos na direção do menor comprimento do edifício são contraventados por barras em X, rotuladas em suas extremidades e constituídas por perfil L. Os apoios das colunas externas são rotulados, enquanto os das internas são engastados.

A comparação entre os esforços obtidos nas duas abordagens foi realizada com o auxílio de gráficos construídos para cada tipo de esforço nas vigas e colunas. Adicionalmente, foi efetuada uma análise comparativa por meio do cálculo da diferença relativa entre os esforços da abordagem 3D e da abordagem 2D, determinando medidas de tendência central para esse parâmetro.

Os procedimentos seguidos na execução do trabalho são ilustrados no fluxograma apresentado na Figura 1.



Figura 1 – Fluxograma para metodologia utilizada no trabalho.
(Fonte: O autor)

Optou-se como método construtivo a utilização de lajes sem escoramento, proporcionando a liberação de espaço na obra durante a execução da estrutura, mas exigindo que o perfil de aço resista às solicitações sem a contribuição da laje até que o concreto atinja 75% de sua resistência característica à compressão (f_{c_k}).

O espaçamento entre vigas também foi projetado considerando o vão máximo que uma laje steel deck tipo MF-50 poderia trabalhar sem escoramento, conforme tabela da fabricante METFORM. O vão máximo para a fôrma steel deck adotada (de espessura igual a 0,95mm) foi de 3 metros, capaz de resistir a uma carga sobreposta de $3,51kN/m^2$, juntamente com uma laje de concreto de 70mm, totalizando uma altura de 120mm. A Figura 2 apresenta o vigamento adotado, com a nomenclatura utilizada para os tipos de vigas e pilares.

O aço utilizado foi do tipo ASTM A572 G50. O concreto possui resistência característica à compressão $f_{c_k} = 30MPa$, de densidade normal, com módulo de elasticidade $E_{c_0} = 27605MPa$.

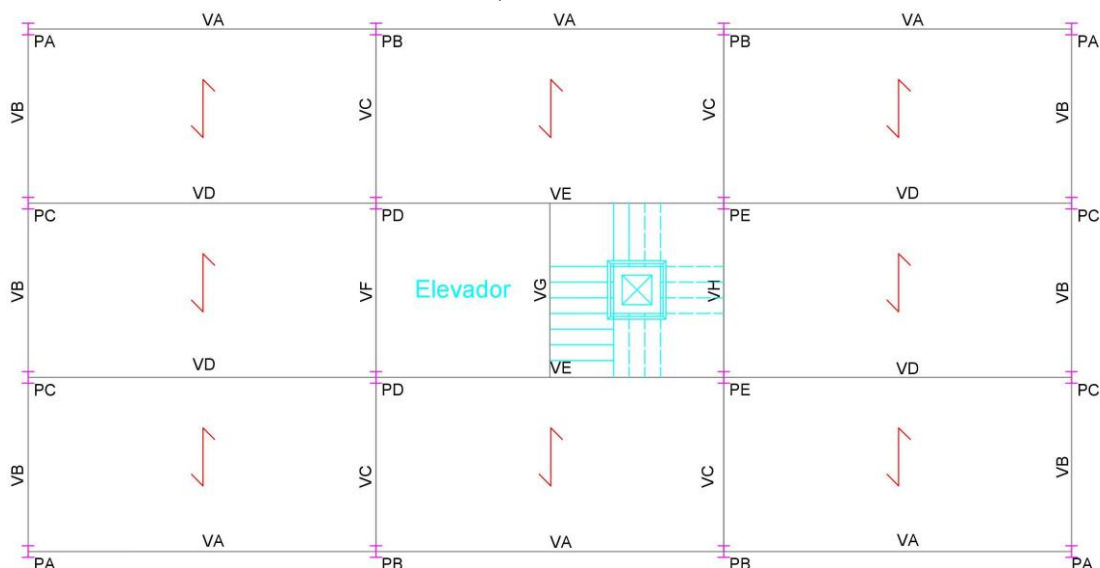


Figura 2 – Lançamento estrutural utilizado.
(Fonte: O autor)

Todos os conectores de cisalhamento são do tipo pino com cabeça, com diâmetro igual a 19 milímetros e aço ASTM A108 G1020. O grau de interação entre aço e concreto considerado foi $\eta = 70\%$.

O peso específico dos materiais, adotados com base nos valores sugeridos pela ABNT NBR 6120:1980, é apresentado na Tabela 1. O peso próprio da steel deck conforme tabela da METFORM, considerando uma altura total da laje de 12cm, é de $2,33kN/m^2$.

Tabela 1 – Peso específico adotado para os materiais.
(Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6120:1980)

Material	Concreto Armado	Aço	Argamassa de Gesso	Tijolo Furado	Argamassa de Cimento e Areia	Água
Peso Específico (kN/m³)	25	78,5	12,5	13	21	9,81

Resultados

As hipóteses utilizadas para avaliação das cargas permanentes foram baseadas no manual de Bellei e Bellei (2011). A Tabela 2 apresenta os valores de carga por unidade de área em planta utilizados para as cargas permanentes e variáveis no estudo de caso. Foram consideradas cargas lineares de parede, de 2,73m de altura, atuando ao longo do comprimento das vigas externas e internas.

Tabela 2 – Cargas permanentes e variáveis por unidade de área em planta.
(Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6120:1980)

Cargas Permanentes (kN/m ²)	Aço 0,36	Steel-deck + 7cm de concreto 2,33	Concreto armado (12cm) 3,00	Contrapiso (3cm) 0,63
Cargas Permanentes (kN/m ²)	Forro (3cm) 0,375	Paredes (por área vertical) 2,19	Impermeabilização (2cm) 0,50	Água 6,18
Cargas Variáveis (kN/m ²)	Pisos 2,0	Coberturas 0,5	Escada 3,0	Elevador 7,5

Para o cálculo das cargas de vento, foi utilizado o software Ciclone, desenvolvido pelo departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (EESCUSP). Foi considerado que as cargas de vento atuam apenas nos pórticos externos, a partir da hipótese de que, em cada superfície de incidência do vento, a carga fosse aplicada com uma excentricidade de 15% do comprimento horizontal da superfície.

Quanto às combinações de ações, para o cálculo das resistências dos estados-limites últimos, foram utilizadas combinações últimas normais. Para os estados-limites de serviço, foram utilizadas combinações frequentes de serviço para o estado-limite de vibrações excessivas e combinações raras de serviço para cálculo do estado-limite de deslocamentos excessivos.

Para a modelagem tridimensional do edifício no software MASTAN2, adotou-se a analogia de grelha proposta por Carvalho (2007) para modelar a laje de concreto, pois este software possui apenas elementos lineares. Foi realizada uma análise de segunda ordem, com módulo de elasticidade do aço reduzido para 80% de seu valor, conforme recomenda a NBR 8800 para casos de média deslocabilidade.

A Figura 3 apresenta o modelo tridimensional para a estrutura obtido no referido software.

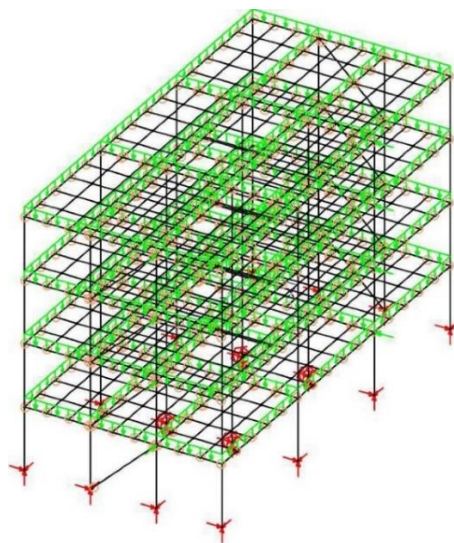
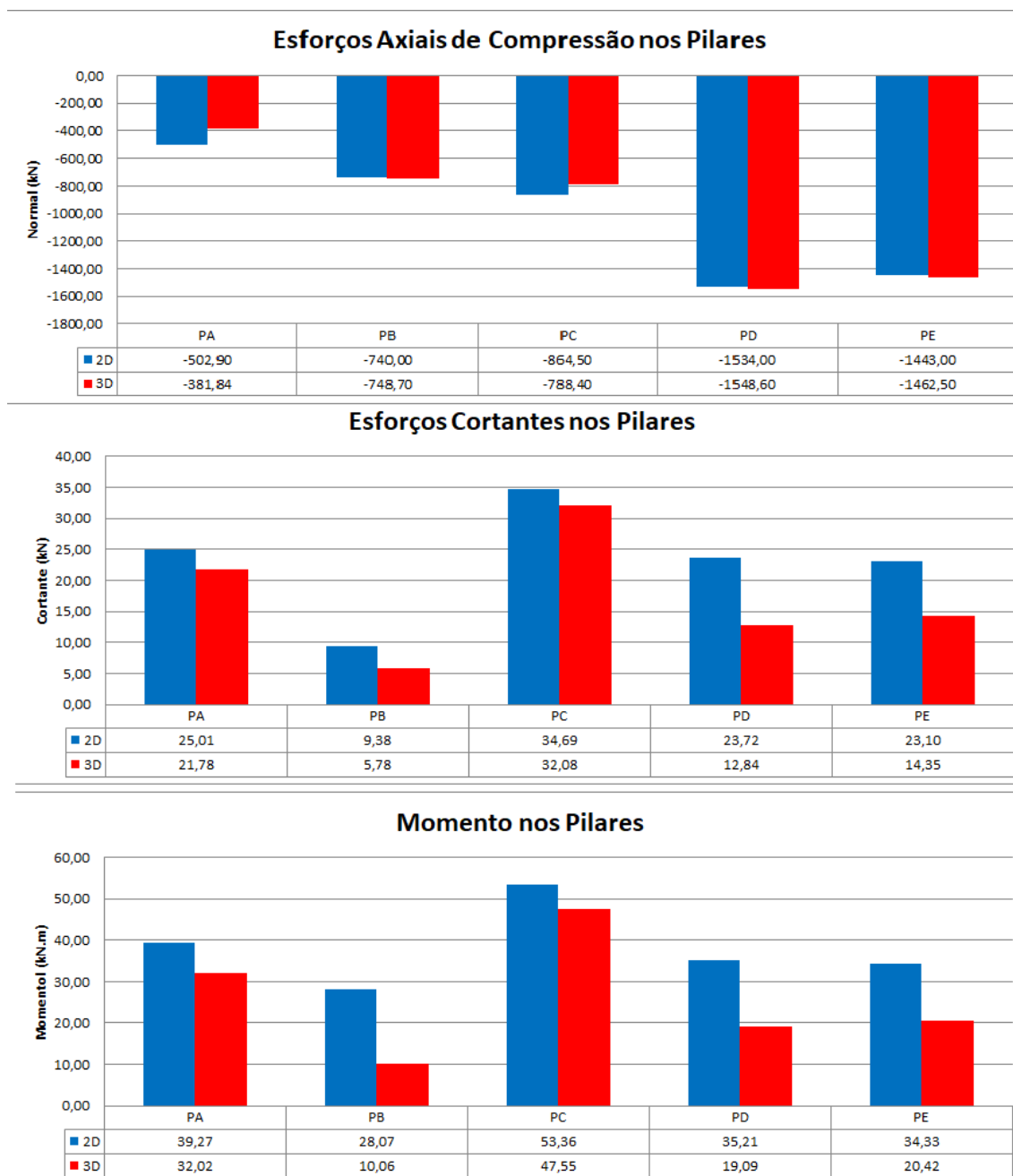


Figura 3 – Modelo tridimensional do edifício.
(Fonte: Captura de tela do software MASTAN2)

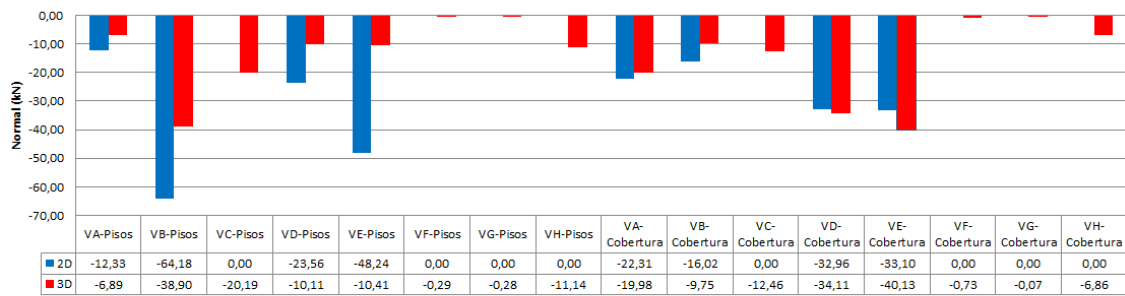
Foi realizada então uma comparação dos esforços, considerando cada tipo de elemento estrutural. Os esforços mais críticos obtidos no modelo 3D foram comparados com os esforços utilizados no dimensionamento do modelo 2D.

As comparações foram realizadas para os esforços normais de compressão, cisalhamento e momento fletor atuantes nas vigas e colunas. Os gráficos das Figuras 4 e 5 ilustram essas comparações.

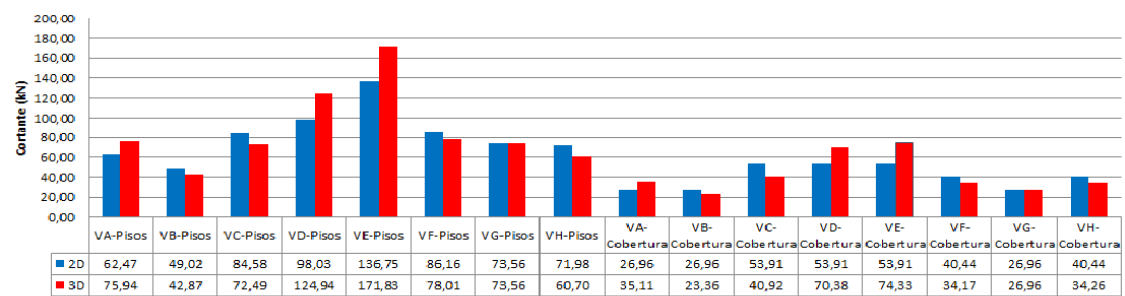


**Figura 4 – Comparação dos esforços para os pilares.
(Fonte: Elaborado pelo autor)**

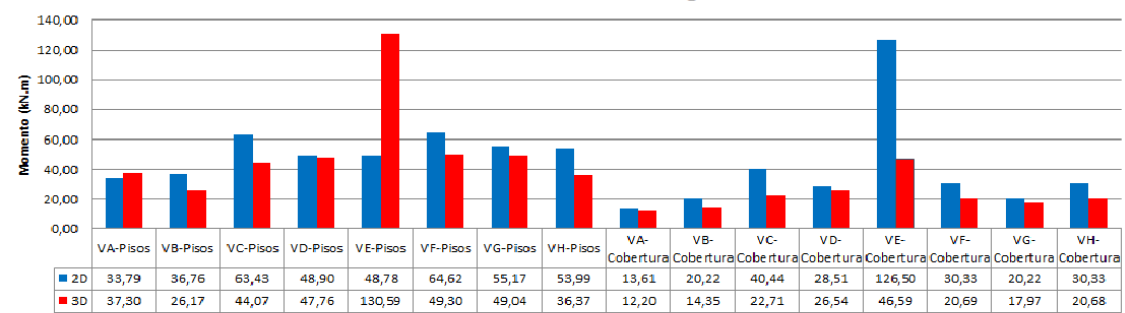
Esforços Axiais de Compressão nas Vigas



Esforços Cortantes nas Vigas



Momento Positivo nas Vigas



Momento Negativo nas Vigas

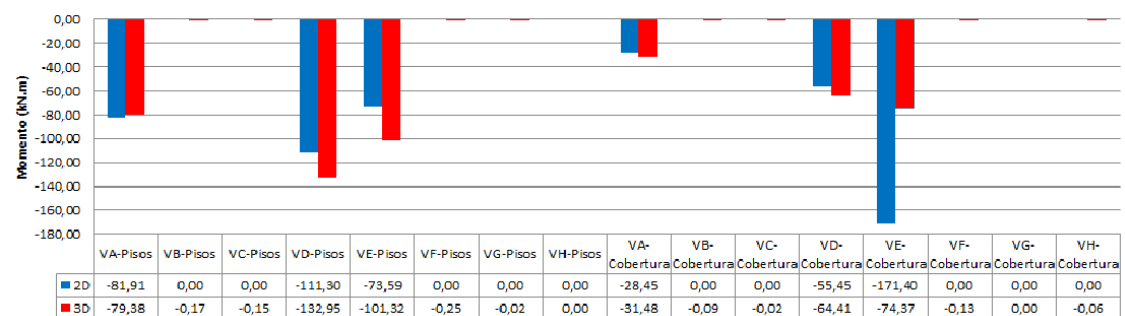


Figura 5 – Comparação dos esforços para as vigas.
(Fonte: Elaborado pelo autor)

A fim de realizar uma análise geral da diferença entre os esforços, foi utilizada uma análise estatística da diferença relativa entre os esforços do modelo 3D em relação aos do modelo 2D. Desse modo, mantendo os sinais dos esforços, tem-se que a diferença relativa é dada pela equação 1. Observa-se que uma diferença negativa indica que o valor do esforço 3D é o menos crítico.

$$Desvio = \frac{Esforço_{3D} - Esforço_{2D}}{Esforço_{2D}} \quad (1)$$

Foram utilizados dois parâmetros de medida central para cada conjunto de valores: a média truncada, calculada excluindo-se 10% dos valores extremos, e a mediana. Os valores médios encontrados para cada tipo de esforço para vigas e colunas estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Diferença relativa entre esforços na abordagem 2D e 3D.
(Fonte: O autor)

Esforço	Elementos	Diferenças relativas	
		Média	Mediana
Compressão	Viga	-30,5	-39,1
	Coluna	-5,9	0,5
Cortante	Viga	3,3	0,0
	Coluna	-28,5	-25,4
Momento Positivo	Viga	-11,2	-23,7
Momento Negativo	Viga	4,0	10,7
Momento	Coluna	-36,0	-29,5

Conclusões

Visando apresentar as vantagens do emprego de uma análise tridimensional em relação à análise bidimensional de edifícios de aço, esse trabalho propôs calcular a estrutura de um edifício composto por colunas de aço e piso composto por vigas mistas de aço e concreto com fôrma steel deck, com o auxílio do software MASTAN2.

Ao analisar os resultados dos gráficos das figuras 4 e 5, é possível observar uma tendência geral dos esforços da análise tridimensional serem menores do que aqueles da abordagem bidimensional, ou seja, o modelo 3D, ao possibilitar uma representação mais fidedigna da estrutura, apresenta-se mais rígido.

Essa conclusão é confirmada pela análise estatística apresentada na Tabela 3, onde, no geral, os esforços encontrados pela análise 3D foram menores do que os utilizados para abordagem 2D, com exceções apenas do momento negativo e do cortante nas vigas. Além disso, observou-se também que as maiores reduções de esforços foram encontradas para os esforços momento e cortante nas colunas e o esforço de compressão nas vigas.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988. 66 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas — procedimento. Rio de Janeiro, 2003. 15 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008. 237 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 256 p.



- BELLEI, I.; PINHO, F.; PINHO, M. Edifícios de Múltiplos Andares em Aço. PINI, 2008.
- BELLEI, I.; BELLEI, H. Edifícios de Pequeno Porte Estruturados em Aço. 4. ed. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2011.
- CARVALHO, R. C.; FILHO, J. R. F. Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado segundo a NBR 6118:2003. 3. ed. São Carlos: EdUFSCar 2007.