

ANÁLISE NÃO LINEAR DE PÓRTICO POR ELEMENTOS FINITOS E COMPARAÇÃO COM AS CONSIDERAÇÕES DA NBR 8800:2008 PARA OS EFEITOS DE 2ª ORDEM

SANTANA, Jovynttino F. de Araujo

BRITO, Camila Lima

joyyuna@hotmail.com

camil92@hotmail.com

UFC

R. Cinco, 100 - Pres. Kennedy, 60355-636, Ceará, Brasil

UFERSA

R. Francisco Mota, 572 - Pres. Costa e Silvas, 59625-900, Rio Grande do Norte, Brasil

ANDRADE, Elvis Soares

elvissoares@hotmail.com

UFC

R. Cinco, 100 - Pres. Kennedy, 60355-636, Ceará, Brasil

ROSENDO SOBRINHO, Francisco

frs_sobrinho@hotmail.com

UFERSA

R. Francisco Mota, 572 - Pres. Costa e Silvas, 59625-900, Rio Grande do Norte, Brasil

BEZERRA, Eric M. F.

eric_mateusjes@hotmail.com

UFC

R. Cinco, 100 - Pres. Kennedy, 60355-636, Ceará, Brasil

Resumo. O presente trabalho procura realizar uma análise estrutural de vários tipos de pórticos planos com diferentes níveis de pavimentos e com isso diferentes características de deslocabilidade, para observar o comportamento do mesmo em relação aos esforços gerados e aos deslocamentos quando o mesmo é sujeito a um determinado carregamento de vento e obviamente ao restante dos carregamentos normalmente considerados, além da importância do uso de elementos de contraventamento na redução dos deslocamentos horizontais que a estrutura poderá sofrer global ente. As análises serão feitas utilizando o software de elementos finitos ABAQUS e também o software para análise d e estruturas FTOOL. Com isso será feita uma comparação entre os valores obtidos diretamente por uma análise pura não linear em pórticos planos por meio de elementos finitos utilizando o ABAQUS, com os valores que serão fornecidos pelo FTOOL e ajustados com as considerações pela norma brasileira de estruturas metálicas NBR 8800:2008 para amplificação dos esforços solicitantes para a consideração dos efeitos de segunda ordem nas estruturas $P\Delta$ e $P\delta$, para os comportamento s globais e locais da estrutura gerando assim uma análise próxima aceitável para uma análise de segunda ordem a partir da obtenção dos coeficientes B1 e B2. Ao final poderá ser observado as aproximações entre os resultados obtidos por meio das análises numéricas com os obtidos pelas equações um pouco mais conservadoras da referida norma. Buscando mostrar principalmente o poder das ferramentas de elementos finitos em representar de forma bastante aproximada o comportamento real de estruturas porticadas planas.

Palavra-Chave: Efeitos de 2ª Ordem. Combinação de Carregamentos. Elemento s Finitos. Análise Não-Linear.

1 Introdução

A NBR 8800:2008 classifica as análises estruturais quanto ao efeito dos deslocamentos em análises lineares ou não-lineares. Enquanto a análise linear (ou teoria de primeira ordem) se baseia na geometria indeformada da estrutura, a análise não-linear utiliza as deformações para determinação de novos deslocamentos e esforços internos. Por isso, a norma sugere que esta seja adotada sempre que os deslocamentos afetarem de forma significativa estes esforços.

O presente trabalho busca mostrar a influência da consideração dos efeitos de 2ª ordem na análise estrutural de um pórtico de aço sujeito à carregamentos transversais provocados pelo vento e longitudinais provocados pelos carregamentos de peso próprio e sobrecarga na estrutura. Procurando avaliar o quão aproximado do comportamento real da estrutura, as considerações normativas podem ser.

Será feita uma comparação entre os resultados para a majoração de esforços feitas pelas considerações dos efeitos de 2ª ordem pela NBR 8800:2008, usando a ferramenta FTOOL, com a análise não linear por elementos finitos utilizando o software ABAQUS.

Serão admitidas três estruturas de pórticos diferentes, em relação ao número de pavimentos e também as considerações de contraventamento da estrutura. Os resultados explorados serão os esforços de momento, cortante, normal e também modos de deslocamentos da estrutura.

Ao final será feita uma comparação principalmente levando-se em consideração a influência do aumento ou redução da deslocabilidade da estrutura e seu efeito na amplitude dos esforços e dos deslocamentos horizontais.

2 Pórticos Estruturais

Pórticos são compostos geralmente por elementos lineares (normalmente vigas e colunas), conectados em suas extremidades de forma a não permitir rotações relativas (conexões rígidas) (DÓRIA, 2007), como evidencia a Figura 1. São capazes de resistir a esforços normais, cortante e principalmente, aos esforços de flexão. Nas edificações, normalmente são utilizados em um padrão com repetições, resultando em estruturas hiperestáticas.

Os casos estruturais analisados aqui serão baseados no estudo de pórticos planos, trabalhando assim de forma bidimensional estável em duas dimensões.

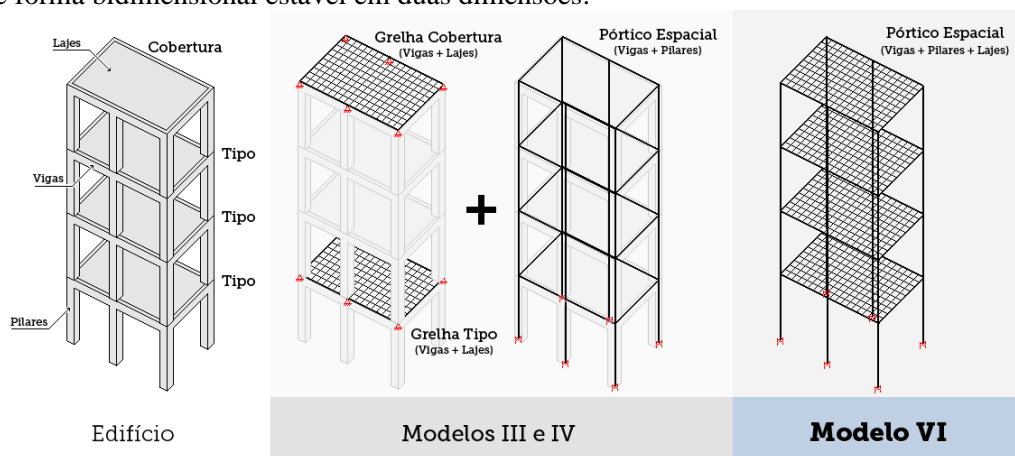


Figura 1 - Representação de modelo estrutural de edifício em pórtico tridimensional formado por barras (vigas e pilares) e grelhas (lajes). (CAD/TQS 16 Informática LTDA (2018)).

2.1 Efeitos de 2ª Ordem

O objetivo das análises de segunda ordem é calcular o equilíbrio interno de forças em uma estrutura deformada. Conforme destacado por Galambos (1998), o caráter de não-linearidade dos efeitos de 2ª ordem invalida a aplicação do princípio da superposição, comumente empregado nas análises estruturais elásticas. Isto aumenta fortemente a complexidade dos problemas.

Dentro das análises não-lineares geométricas de estruturas de barras, dois efeitos distintos podem ser considerados. Aqueles produzidos pelos deslocamentos dos nós são usualmente chamados de efeitos globais de segunda ordem ($P-\Delta$). Já os decorrentes da não-retilidade dos eixos de flexão das barras são classificados como efeitos locais de segunda ordem ($P-\delta$).

De acordo com Galambos (1998) pode-se afirmar que todas as estruturas estarão sujeitas aos efeitos $P-\Delta$ e $P-\delta$. Cabe ao engenheiro de projeto, portanto, analisar os impactos desses fenômenos e avaliar a necessidade de se promover uma análise não-linear da estrutura projetada.

2.2 Efeito Global de 2ª Ordem $P-\Delta$

Quando uma estrutura é solicitada por um carregamento, esta, se deforma até alcançar uma posição de equilíbrio de 1ª ordem. Caso os nós da estrutura não sejam fixos, estes poderão se deslocar uma distância Δ . Nesta situação, se um carregamento transversal Δ for aplicado, este irá interagir com a deformação inicial da estrutura, produzindo solicitações (momentos fletores) que não existiriam caso a configuração indeformada fosse considerada (PFEIL, 2009).

Ocorrerá então uma segunda etapa de deformação na estrutura, até que uma nova posição de equilíbrio seja encontrada. O fenômeno de interação entre as cargas e os deslocamentos dos nós, que acarreta numa modificação dos momentos fletores nas barras, é chamado de efeito global de 2ª ordem ou efeito $P-\Delta$, como mostra a Figura 2.

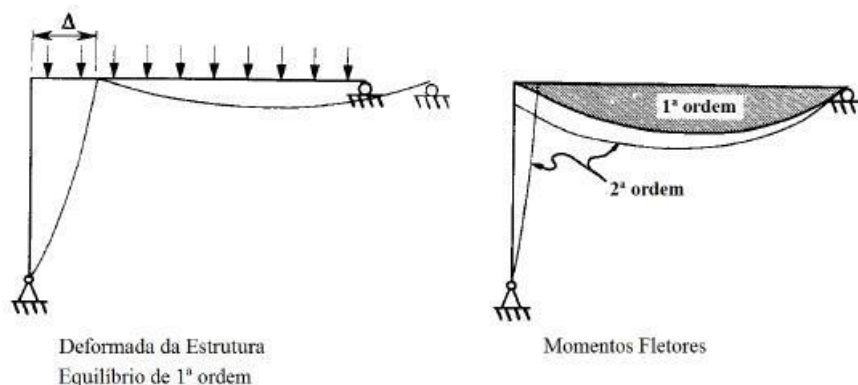


Figura 2 - Consideração para visualização dos efeitos globais (Galambos (1998)).

As consequências do fenômeno podem ser exemplificadas acima. Após ser solicitado, um pórtico apresenta um deslocamento Δ em seu nó não restringido (na situação de equilíbrio de 1ª ordem). Quando a carga de peso próprio da estrutura é aplicada na nova configuração, momentos fletores de 2ª ordem aparecem (devidos ao braço de alavanca Δ).

Ressalta-se que a barra vertical passa agora a ser fletida, comportamento não previsto caso os efeitos de 2ª ordem fossem negligenciados. Além disso, nota-se que até mesmo as cargas axiais produzem efeitos não-lineares, o que torna este tipo de análise ainda mais complexo.

2.3 Efeito Local de 2ª Ordem $P-\delta$

Semelhantemente ao efeito $P-\Delta$, o efeito local de segunda ordem ou efeito $P-\delta$ também é fruto da interação entre um carregamento e a estrutura deformada. Considere-se o mesmo pórtico apresentado do tópico anterior, mas, desta vez, o deslocamento horizontal da barra superior é impedido, como mostra a figura 3.

Ainda de acordo com Galambos (1998), quando carregado, o pórtico se deforma e os eixos das barras perdem sua retilidade. Esta perda pode ser exemplificada pelo deslocamento δ da barra vertical. Na situação de equilíbrio de 1ª ordem, quando as cargas de peso próprio são aplicadas, os deslocamentos dos eixos das barras provocam uma redistribuição dos momentos fletores.

É interessante notar que a distribuição dos momentos de 2ª ordem não é necessariamente a mesma da análise linear, conforme demonstra o diagrama da barra vertical do pórtico. Deste fato, conclui-se

que os efeitos P- δ e P- Δ podem não apenas gerar acréscimos nas solicitações, mas também novas distribuições dos esforços internos.

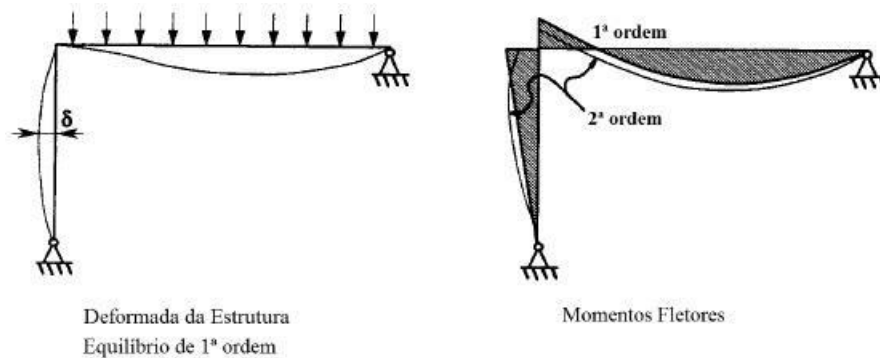


Figura 3 - Consideração para visualização dos efeitos locais (Galambos (1998)).

2.4 Avaliação da estabilidade segundo a NBR 8800:2008

A norma NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios estabelece as considerações necessárias para se classificar as edificações quanto a sua deslocabilidade e conseqüentemente permite definir coeficiente para estimar os efeitos de 1ª e 2ª ordem atuantes na estrutura, como veremos nos próximos tópicos.

Quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais em estruturas de pequena deslocabilidade, média deslocabilidade e grande deslocabilidade. O critério adotado para esta avaliação é a relação entre os deslocamentos laterais da estrutura obtidos na análise de 1ª ordem e aqueles obtidos na análise não-linear de 2ª ordem.

$$\text{Pequena de deslocabilidade: } \frac{u_2}{u_1} \leq 1,1 \quad (1)$$

$$\text{Média deslocabilidade: } 1,1 \leq \frac{u_2}{u_1} \leq 1,4 \quad (2)$$

$$\text{Grande deslocabilidade: } 1,4 < \frac{u_2}{u_1} \quad (\text{dificilmente acontece}) \quad (3)$$

Onde u_1 – deslocamento lateral de um andar em relação à base na análise de primeira ordem e u_2 – deslocamento lateral de um andar em relação à base na análise de segunda ordem.

2.5 Estruturas de pequenas deslocabilidades

Para este tipo de estrutura, a norma permite que os esforços solicitantes sejam determinados em análise linear. Assim, os efeitos globais de 2ª ordem (P- Δ) podem ser desconsiderados, desde que a estrutura atenda as seguintes exigências:

- As forças axiais solicitantes de cálculo de todas as barras cuja rigidez à flexão contribua para a estabilidade lateral da estrutura não sejam superiores à 50% da força axial correspondente ao escoamento da seção.
- Os efeitos das imperfeições iniciais geométricas sejam adicionados às combinações consideradas no dimensionamento (inclusive naquelas em que atuam cargas horizontais de vento).

Diferentemente dos efeitos P- Δ , os efeitos locais de 2ª ordem (P- δ) devem ser considerados no estudo das estruturas de baixa deslocabilidade. Isto é feito através da amplificação dos momentos fletores em todas as barras. O fator de amplificação (de cada barra) é dado pelo coeficiente B1:

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \frac{N_{sd1}}{N_e}} \geq 1,0 \quad (4)$$

Onde tem-se que Nsd1 - Força axial de compressão solicitante de cálculo na barra considerada, em análise de 1ª ordem; Ne - Força axial que provoca a flambagem elástica por flexão da barra (no plano de atuação do momento fletor), calculada com o comprimento real da barra e considerando, se for o caso, a imperfeição inicial de material e Cm - Coeficiente tomado conservadoramente como igual a 1,0 nas barras solicitadas por forças transversais entre as extremidades da barra no plano de flexão ou, no caso destas forças não existirem, igual a:

$$C_m = 0,60 - 0,40x \frac{M_{m1}}{M_{m2}} \quad (5)$$

A fração Mnt1/Mnt2 representa a relação entre o menor e o maior dos momentos fletores na estrutura nt no plano de flexão, nas extremidades apoiadas da barra.

Os efeitos das imperfeições iniciais geométricas devem ser considerados independentemente, em duas direções ortogonais da planta da estrutura a partir de um deslocamento horizontal relativo entre os níveis inferior e superior de cada andar de valor igual a h/333, onde h é a altura do andar em questão. Estes efeitos podem ser considerados por meio da aplicação, em cada andar, de uma carga horizontal equivalente, chamada Carga Nocional (qn), e foi exatamente o que foi feito nas análises feitas nesse trabalho. O valor desta carga (por andar) será dado por

$$q_n = 0,003x \sum N_{sd,n} \quad (6)$$

Onde $\sum N_{sd,n}$ é a carga gravitacional total que atua no andar considerado, em todos os elementos resistentes a cargas verticais.

Para os casos de pequenas deslocabilidades, os efeitos das imperfeições materiais podem ser desprezados.

2.6 Estruturas de médias deslocabilidades

No que se refere às imperfeições iniciais geométricas, as mesmas considerações feitas para as estruturas de pequena deslocabilidade podem ser aplicadas.

Já os efeitos das imperfeições iniciais de material devem ser considerados a partir da redução das rigidezes à flexão e axial, que devem ser levadas à 80% dos valores originais. Esta redução deve, inclusive, ser considerada no cálculo dos coeficientes B1 e B2 do método da amplificação dos esforços solicitantes. Com isso tem-se que a carga crítica para o elemento do andar analisado será dada por:

$$N_{cr} = 0,80x \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2} \quad (7)$$

Com l sendo o comprimento real da coluna.

2.7 Estruturas de grandes deslocabilidades

O método da amplificação dos esforços solicitantes possibilita uma avaliação dos efeitos P- δ e P- Δ em estruturas, para a execução de análises elásticas de 2ª ordem aproximadas. Este método se baseia na amplificação dos momentos fletores e esforços normais atuantes nas barras (os esforços cortantes

podem ser tomados como iguais aos da análise elástica de 1ª ordem), a partir de coeficientes lineares. Dessa forma amplificamos os esforços de momento fletores, normais e cortantes pelas seguintes relações:

$$M_{Sd} = B_1 \cdot M_{nt} + B_2 \cdot M_{lt} \quad (8)$$

$$N_{Sd} = B_1 \cdot N_{nt} + B_2 \cdot N_{lt} \quad (9)$$

$$V_{Sd} = B_1 \cdot V_{nt} + B_2 \cdot V_{lt} \quad (10)$$

Os esforços solicitantes de cálculo M_{nt} e N_{nt} devem ser obtidos através de uma análise elástica de 1ª ordem na qual os nós da estrutura são impedidos de se deslocar lateralmente (situação b mostrada na Figura 4). Já na determinação dos esforços solicitantes de cálculo M_{lt} e N_{lt} deve ser considerada a estrutura sujeita apenas aos efeitos dos deslocamentos horizontais dos nós.

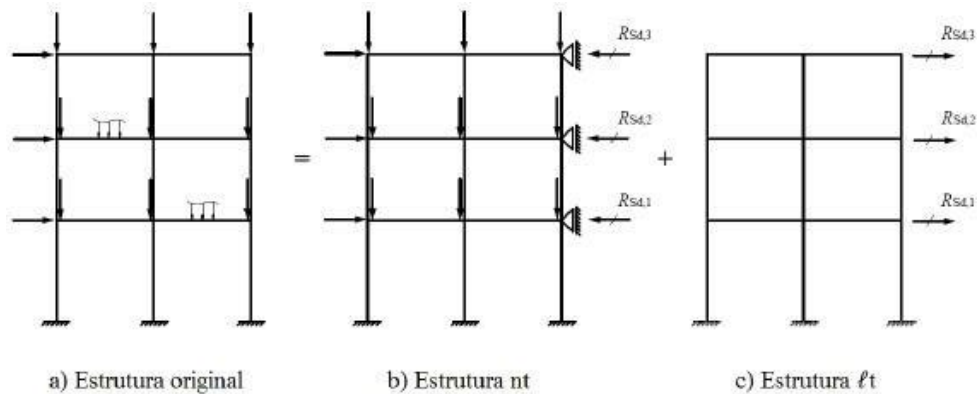


Figura 4 - Consideração para distribuição de esforços para a consideração dos efeitos de 2ª ordem em uma análise não linear feita utilizando a NBR 8800:2008 (NBR 8800 (2008)).

O coeficiente B_2 , que, observado nas fórmulas para amplificação dos esforços deverá ser obtido de acordo com a Equação 11:

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{1}{R_s} \cdot \frac{\Delta_h}{h} \cdot \frac{\sum N_{Sd}}{\sum H_{Sd}}} \quad (11)$$

Onde $\sum N_{Sd}$ sendo a carga gravitacional total que atua no andar considerado; $\sum H_{Sd}$ sendo a força cortante no andar considerado, produzida pelas forças horizontais de cálculo atuantes (usadas para determinar Δ_h);

Δ_h é o deslocamento horizontal relativo entre os níveis superior e inferior do andar considerado, obtido na análise de 1ª ordem; h é a altura do andar considerado (distância entre eixos da estrutura) e R_s é o Coeficiente de ajuste, igual a 0,85 para estruturas onde o sistema resistente a ações horizontais é constituído apenas por subestruturas de contraventamento formadas por pórticos, nos quais a estabilidade lateral é assegurada pela rigidez à flexão das barras e pela capacidade de transmissão de momentos das ligações, e igual a 1,00 para todas as outras estruturas.

3 Estruturas em Estudo

Foram analisadas nesse trabalho três situações estruturais de pórticos planos. Os elementos dos mesmos apresentaram as mesmas seções para todos os casos; variando-se principalmente o número de pavimentos e para um dos casos a inserção de elementos de contraventamento na estrutura. A Figura 5

mostra os 3 pórticos analisados e em destaque em cada um, o elemento de pilar que foi utilizado para se fazer a análise de amplificação dos esforços.

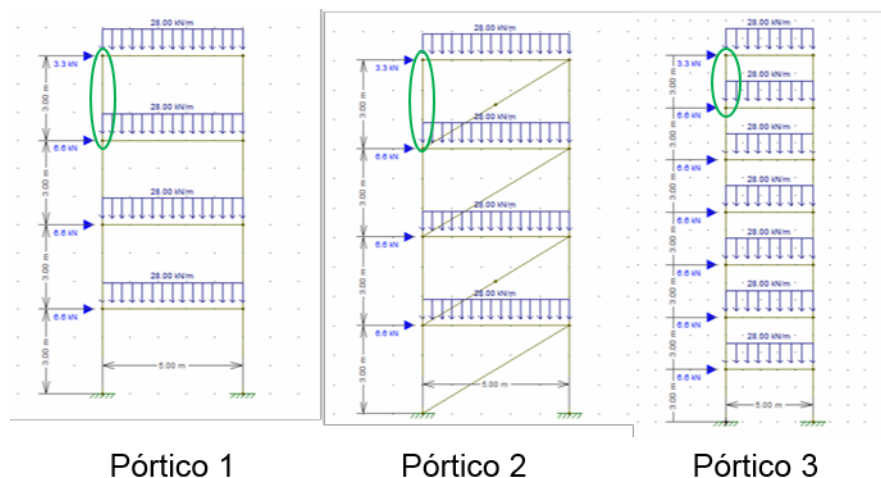


Figura 5 - Constituição estrutural dos pórticos analisados no trabalho e representação do pilar/elemento que foi analisado em cada estudo para os efeitos locais.

Os pórticos foram analisados utilizando a ferramenta ABAQUS para a obtenção dos resultados da análise não linear e por meio da ferramenta FTOOL foram obtidos os resultados para as considerações dos efeitos de 2ª ordem utilizados pela NBR8800:2008.

Os pilares e vigas dos pórticos apresentam seção caixão de aço com dimensões de 15 x 15 cm e espessura de 2 cm e foram modelados considerando as características do aço ACTM 036.

As lajes dos pavimentos foram consideradas de concreto armado e apresentam as dimensões de 5,0 x 4,0 m com uma espessura de 10 cm. Onde o lado considerado para se apoiar nas vigas do pórtico plano estudados foi o lado de 5 metros, do qual será considerado para receber os carregamentos da laje, assim o lado de 4 metros para estimativa dos carregamentos distribuído ao longo do comprimento.

3.1 Ações de Carregamento

Os pórticos têm sua estrutura de pilares e vigas metálicas; as lajes são de concreto armado e sobre as vigas existe ainda a influência do carregamento de alvenarias. Com isso tem-se o Concreto ($\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$); Alvenaria ($\gamma = 13 \text{ kN/m}^3$); Aço ($\gamma = 78,5 \text{ kN/m}^3$, $E = 200 \text{ GPa}$ e $\nu = 0,3$) e para a sobrecarga ($P = 3,0 \text{ kN/m}^2$). A Tabela 1 mostra os valores obtidos para os carregamentos que as vigas dos pórticos estão sujeitas.

Tabela 1 – Carregamentos considerados sobre as vigas dos pórticos estudados (Autor (2019)).

Peso da Laje	Sobrecarga	Peso Alvenaria	Peso Próprio	C. Total
R laje (kN/m)	R sobr (kN/m)	R alv (kN/m)	R pp (kN/m)	R total (kN/m)
10,0	12,0	5,85	0,12229	28,0

3.1.1 Ação do Vento

As admissões feitas para a estimativa do carregamento do vento sobre a estrutura foram obtidas a partir da NBR 6123:1988 – Forças devido ao vento em edificações. Que fixa as condições exigíveis na consideração das forças devido á ação estática e dinâmica do vento nas edificações. Para as análises feitas nesse trabalho, foram consideradas apenas as considerações da norma referentes a uma análise estática.

A Tabela 2 mostra os valores considerados e definidos com base na norma para se estimar a influência do vento sobre os pórticos estudados.

Tabela 2 – Valores considerados com base na NBR 2123:1988 para a definição da pressão dinâmica provocada pelo vento nos pórticos analisados (Autor (2019)).

Velocidade Básica	Fator Topográfico	Fator de Rugosidade	Fator Probabilístico	Velocidade Característica	Pressão Dinâmica
V_o (m/s)	S1	S2	S3	V_p (m/s)	q (kN/m)
30,0	1,0	1,0	1,0	30	551,7

Para se definir o carregamento nodal gerado pelo vento na estrutura, deve ser analisado o esquema mostrado na Figura 6; por meio dele o carregamento do vento foi transformado em cargas concentradas que atuarão diretamente no nós da estrutura.

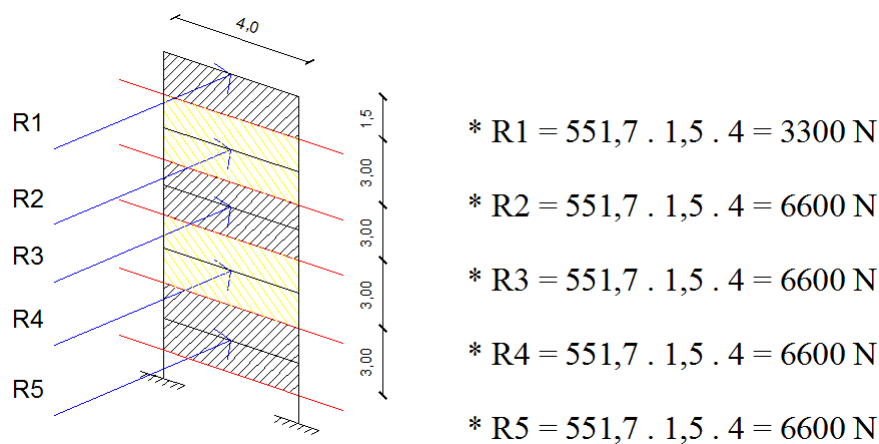


Figura 6 - Diagrama para definição da ação do vento sobre a estrutura do pórtico em cargas concentradas (Autor (2019)).

3.2 Considerações para a Análise pelo MEF

Utilizando o software ABAQUS de elementos finitos, pode fazer uma análise não linear das várias estruturas estudadas. Por meio da utilização do comando Imperfection, pode-se estudar a estrutura considerando-se uma certa não linearidade.

A seguir será citado o procedimento para criação e análise dos elementos finitos analisados:

- 1) A estrutura foi lançada no plano com componente de arame (wire);
- 2) Foram inseridas as propriedades dos materiais, as características das seções (Create section >> Beam >> Box) e as condições de apoio da estrutura;
- 3) Foram inseridos os carregamentos de acordo da estrutura original, sujeito aos carregamento já mencionados anteriormente, após se criar um passo para uma análise não-linear.
- 4) A malha criada foi escolhida para conter elemento de tamanho aproximado à 0.4 e com isso para o elemento analisado, a divisão ficou em 8 elementos finitos para serem analisado pelo programa;
- 5) A análise foi linear completa para um elemento Beam Shear Flexible (Cisalhamento Flexível).
- 6) Para se considerar a não linearidade foi-se necessário gerar um novo Step e criar-se um diretório para a inserção das características de imperfeição e com isso chegar aos resultados que serão mostrados mais posteriormente.

4 Análises e Resultados

A seguir serão mostrados os resultados esforços e deslocamentos obtidos para as análises com base nas prescrições da NBR 8800:2008 com o auxílio da ferramenta FTOOL e também nas análises não-lineares por elementos finitos com o auxílio da ferramenta ABAQUS.

4.1 NBR 8800:2008

Modelo de Pórtico 1, Figura 7:

Coeficientes de Amplificação dos Carregamentos:						OBSERVAÇÃO:					
1ª Ordem	B1 =	0,315	2ª Ordem	B2 =	0,609698	Como B1 < 1, adota-se:					
Cm	0,319		Rs	0,85		B1 =	1,0				
Nsd1	-67,9		Δh (m)	3,50E-02				Forças Ficcionalis (kN)		Forças Nocionalis (Kn)	
Ne (80%)	5261,512		h (m)	3				Rs1	3	Carga Vertical por Pav.	(28kN/m x 10 m)
			ΣNsd (kN)	-140				Rs2	8		
			ΣHsd (kN)	3				Rs3	7,4		
								Rs4	7,8	Fn1	0,84
ESTRUTURA Original										Fn2	0,84
N (kN)	V (kN)	Mf (kN.m)	desl. (mm)							Fn3	0,84
-68,3	-24,7	42,1	31,67							Fn4	0,84
ESTRUTURA Nt											
Elemento	N (kN)	V (kN)	Mf (kN.m)	N (kN)	V (kN)	Mf (kN.m)	desl. (mm)	Nsd (kN)	Vsd (kN)	Msd (kN.m)	desl. (mm)
P1	-69,6	-25,8	45,4	1,7	1,5	4,2	34,94	-68,56	-24,30	47,96	34,94

Figura 7 – Considerações e resultados obtidos para os esforços e deslocamentos das análises no modelo de Pórtico 1 com base na NBR 8800:2008 (Autor, (2019)).

Modelo de Pórtico 2 (estrutura com contraventamento, Figura 8):

Coeficientes de Amplificação dos Carregamentos:						OBSERVAÇÃO:					
1ª Ordem	B1 =	0,304	2ª Ordem	B2 =	1,119845	Como B1 < 1, adota-se:					
Cm	0,307		Rs	0,85		B1 =	1,0				
Nsd1	-68,8		Δh (m)	1,19E-03				Forças Ficcionalis (kN)		Forças Nocionalis (Kn)	
Ne	6576,89		h (m)	3				Rs1	-57,4	Carga Vertical por Pav.	(28kN/m x 5 m)
			ΣNsd (kN)	-138,06				Rs2	24,3		
			ΣHsd (kN)	-0,6				Rs3	24,2		
								Rs4	34,5	Fn1	0,84
ESTRUTURA Original										Fn2	0,84
N (kN)	V (kN)	Mf (kN.m)	desl. (mm)							Fn3	0,84
-68,8	-25,9	44,8	1,176							Fn4	0,84
ESTRUTURA Nt											
Elemento	N (kN)	V (kN)	Mf (kN.m)	N (kN)	V (kN)	Mf (kN.m)	desl. (mm)	Nsd (kN)	Vsd (kN)	Msd (kN.m)	desl. (mm)
P1	-68,6	-25,7	44,5	-0,2	-0,2	0,3	1,186	-68,82	-25,90	44,84	1,186

Figura 8 - Considerações e resultados obtidos para os esforços e deslocamentos das análises no modelo de Pórtico 2 com base na NBR 8800:2008 (Autor, (2019)).

Modelo de Pórtico 3, Figura 9:

Coeficientes de Amplificação dos Carregamentos:				OBSERVAÇÃO:	
1ª Ordem	B1 =	0,317	2ª Ordem	B2 =	0,336156
Cm	0,321		Rs	0,85	Como B1 < 1, adota-se:
Nsd1	-68		Δh (m)	1,19E-01	B1 =
Ne (80%)	5261,512		h (m)	3	1,0
			ΣN_{sd} (kN)	-140	
			ΣH_{sd} (kN)	3,3	
ESTRUTURA Original					
N (kN)	V (kN)	Mf (kN.m)	desl. (mm)		
-68,3	-24,6	42	111		

Forças Fictícias (kN)		Forças Nocionais (Kn)	
Rs1	1,3	Carga Vertical por Pav.	(28kN/m x 5 m)
Rs2	8,5		
Rs3	7,3		
Rs4	7,7	Fn1	0,84
Rs5	7,7	Fn2	0,84
Rs6	7,7	Fn3	0,84
Rs7	7,9	Fn4	0,84
		Fn5	0,84
		Fn6	0,84
		Fn7	0,84

Elemento	ESTRUTURA Nt			ESTRUTURA Lt			ESFORÇOS AMPLIFICADOS DE CÁLCULO - 2ª ORDEM				
	N (kN)	V (kN)	Mf (kN.m)	N (kN)	V (kN)	Mf (kN.m)	desl. (mm)	Nsd (kN)	Vsd (kN)	Msd (kN.m)	desl. (mm)
P1	-69	-24,8	43,9	1,1	0,7	2,8	118,70	-68,63	-24,10	44,84	118,70

Figura 9 - Considerações e resultados obtidos para os esforços e deslocamentos das análises no modelo de Pórtico 3 com base na NBR 8800:2008 (Autor, (2019)).

4.2 Elementos Finitos

Modelo de Pórtico 1, Figura 10:

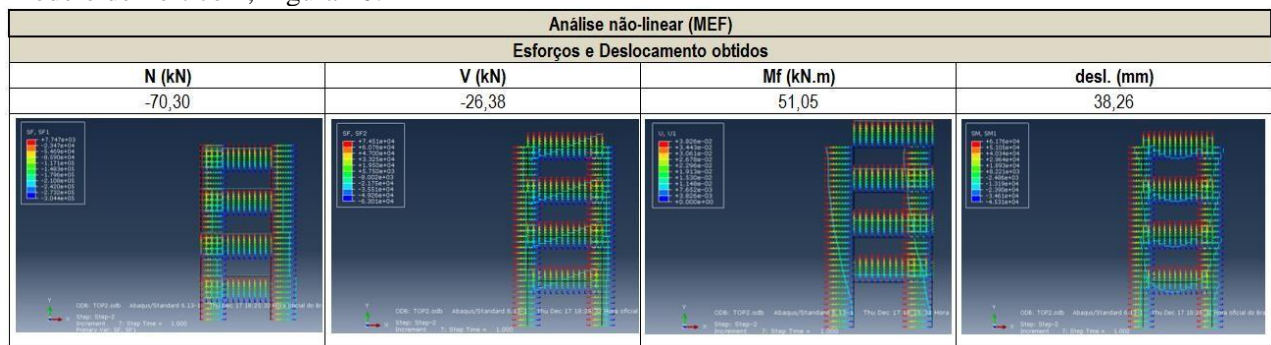


Figura 10 - Considerações e resultados obtidos para os esforços e deslocamentos das análises no modelo de Pórtico 1 com base no Método dos Elementos Finitos (Autor, (2019)).

Modelo de Pórtico 2, Figura 11 (estruturas com contraventamento):

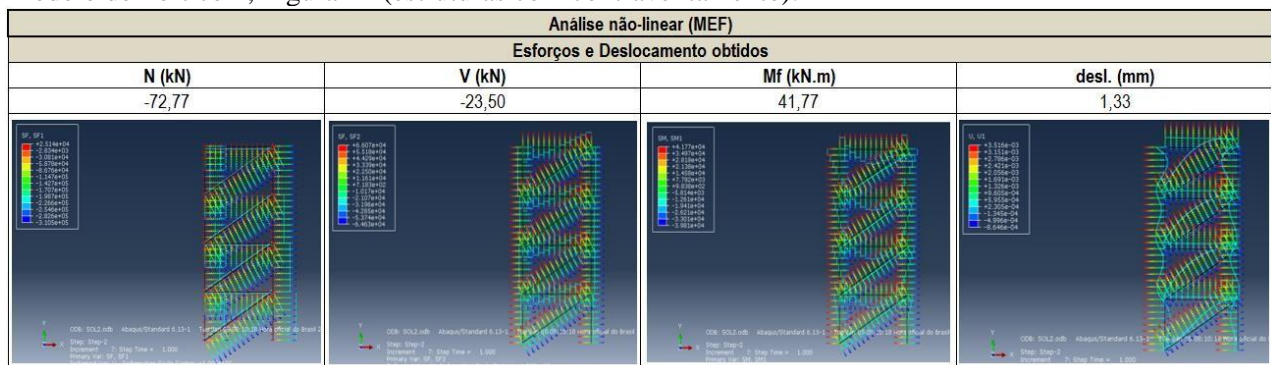


Figura 11 - Considerações e resultados obtidos para os esforços e deslocamentos das análises no modelo de Pórtico 2 com base no Método dos Elementos Finitos (Autor, (2019)).

Modelo de Pórtico 3, Figura 12:

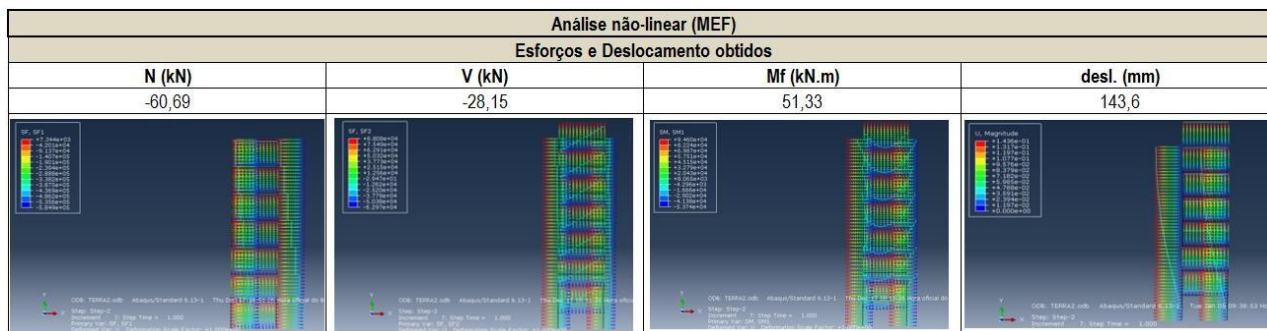


Figura 12 - Considerações e resultados obtidos para os esforços e deslocamentos das análises no modelo de Pórtico 3 com base no Método dos Elementos Finitos (Autor, (2019)).

4.3 Comparação entre os Resultados

Na tabela 3 vemos um comparativo entre os resultados obtidos para as análises feitas nos diferentes tipos de pórticos planos estudados, mostrando-se as diferenças percentuais entre os modelos gerados usando Elementos Finitos (ABAQUS) e os modelos usando as prescrições da NBR 8800:2008.

As análises feitas pela metodologia de Elementos Finitos usando a ferramenta ABAQUS foram consideradas como os resultados mais aproximados do comportamento real das estruturas em estudo, já que pôde-se considerar uma certa não-linearidade em suas análises.

Tabela 3 – Comparação entre os resultados de esforços e deslocamentos obtidos para as análises em estudo.

		Normal	Cortante	Fletor	Delocamento
		N (kN)	V (kN)	Mf (kN.m)	(mm)
Modelo de Pórtico 1	NBR 8800	-68,56	-24,30	47,96	34,94
	MEF	-70,30	-26,38	51,05	38,26
	Dif. (%)	2%	8%	6%	9%
Modelo de Pórtico 3	NBR 8800	-68,63	-24,10	44,84	118,70
	MEF	-60,69	-28,15	51,33	143,60
	Dif. (%)	13%	14%	13%	17%
Modelo de Pórtico 2 (contraventado)	NBR 8800	-68,82	-25,90	44,84	1,19
	MEF	-72,77	-23,50	41,77	1,33
	Dif. (%)	5%	10%	7%	11%

Com relação ao Pórtico 1, o qual apresenta média deslocabilidade, e em sua análise os efeitos de 2ª ordem foram considerados utilizando as prescrições da NBR 8800.

Para essa situação pode-se notar deslocamentos horizontais maiores que 3,0 cm e podemos concluir que as considerações da norma realmente fornecem resultados satisfatórios para uma estrutura como essa, devido terem fornecido valores seguros em relação aos obtidos pela análise não linear pura feita por Elementos Finitos.

As diferenças percentuais entre os modelos não são consideráveis e todos estão a favor da segurança, garantindo assim uma certa confiança para considera-los em análises mais práticas de dimensionamento de estruturas, o que de certa forma também caracteriza um maior e aceitável conservadorismo das estimadas equações da NBR 8800:2008 para levar em consideração os efeitos de 2ª ordem no projeto de estruturas metálicas.

Para o Pórtico 3, observa-se que o mesmo tem uma esbelteza bem a maior que do que o anterior, o que levou a grandes deslocamentos horizontais que passam dos 11,0 cm, o que era de se esperar devido à estrutura analisada se bem mais esbelta quando relacionado com as demais.

Para essa análise obteve-se maiores diferenças percentuais entre as análises quando com paradas com as obtidas para as outras estruturas estudadas, principalmente com relação aos esforços de momentos fletores e também com relação aos deslocamentos horizontais.

Isto caracteriza o fato de que as prescrições da NBR 8800:2008 acabam se tornando cada vez mais conservadoras à medida que a estrutura vai se tornando mais esbelta e conseqüentemente dependente de um projeto estrutural cada vez mais bem planejado e seguro.

Para o Pórtico 2, observa-se que houve uma considerável redução dos deslocamentos horizontais da estrutura com a utilização dos elementos de contraventamento, passando de aproximadamente 3,0cm (Pórtico 1) para 2,0mm (Pórtico 2).

Com relação aos demais esforços, podemos observar novamente que as diferenças percentuais entre as análises da norma com as análises não-lineares, foram menores; o que caracteriza novamente o fato de que quanto menor a deslocabilidade da estrutura, mais aceitáveis e próximos do comportamento real são as admissões feitas pela NBR 8800:2008.

5 Conclusões

Pode-se concluir ao final desse estudo, que quanto maior a deslocabilidade da estrutura, menos precisa são as considerações feita pela NBR8800:2008 para a obtenção dos esforços e deslocamentos atuantes para uma análise não linear com base na consideração da amplificação dos esforços de cálculo da norma.

Sendo assim, para estruturas com grande possibilidade de deslocamentos horizontais e de considerável esbeltez, é interessante que seja feita um certo estudo de contraventamento da mesma, para reduzir assim sua deslocabilidade, mantendo-a sempre entre uma média ou baixa deslocabilidade para que assim as considerações feitas utilizando a norma NBR 8800:2008, se aproximem melhor de uma análise não linear pura e que os resultado sejam mais favoráveis para uma utilização mais aprimorada na prática.

Além disso, o uso de ferramentas computacionais baseadas no Método dos Elementos Finitos para a geração dos modelos e mostram-se capazes de representar o comportamento das estruturas da forma mais aproximada possível de seu comportamento real e dessa maneira também são essenciais para a elaboração de um projeto de estruturas metálicas cada vez mais preciso e capaz de aliar segurança, conforto e economia.

Referências

- [1] SIMULIA ABAQUS/CAE. ABAQUS Analysis User's Manual. Version 6.10 [Software]. Johnston, Rhode Island, USA, 2010
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800, 2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mista de aço e concreto de edifícios – Procedimento. Rio de Janeiro. Setembro de 2008.
- [3] GALAMBOS, Theodore V.; SUROVEK, Andrea V.. Structural Stability of Steel – Concepts and Applications for Structural Engineers. Published for John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey. EUA, 2008.
- [4] PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. ESTRUTURAS DE AÇO. Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008. 8ª Edição – Editora LTC. Rio de Janeiro 2009.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123, 1988 - Forças devido o vento em edificações – Procedimento. Rio de Janeiro. 1988
- [6] CAD/TQS 16 Informática LTDA, 2018. Modelo VI – Análise estrutural com pórtico espacial completo com Pilares + lajes + vigas. Disponível em: <
<http://www.tqs.com.br/v16/destaques/modelo-vi-projeto-estrutural> >. Acesso em: 21 de Julho de 2018.