

Avaliação de Procedimentos não Lineares Estáticos com Carregamento Lateral Progressivo – Análise *Pushover*

Walter Francisco Hurtares Orrala¹

Silvio de Souza Lima²

Sergio Hampshire de Carvalho Santos³

Resumo

Este artigo apresenta uma avaliação dos Procedimentos Não Lineares Estáticos com Carregamento Lateral Progressivo, que na literatura técnica internacional são conhecidos como “*Pushover Analyses*” e que neste texto também são referidos como Análises *Pushover*. A avaliação consiste em comparar os resultados das duas abordagens dos procedimentos acima mencionados com os obtidos com o Procedimento Linear Estático das Forças Horizontais Equivalentes e com a Análise Espectral Multimodal. Faz-se também uma análise paramétrica variando-se a rotação máxima que cada viga pode ter. O modelo de análise é o prédio padronizado, de uso corrente em estudos no Departamento de Estruturas da Escola Politécnica da UFRJ, denominado de “*Model Building*”. Admite-se neste trabalho que o prédio está situado na República do Equador, em uma região de alto risco sísmico. No modelo o sismo é aplicado de forma independente em duas direções horizontais perpendiculares.

Palavras-chave: Análise sísmica; Análise não linear; Análise *Pushover*.

1 Introdução

Com o desenvolvimento de novos métodos de análise sísmica, juntamente com o aumento da capacidade de processamento dos computadores, surgiram os Procedimentos Não Lineares Estáticos, dentre eles, o do Carregamento Lateral Progressivo (*Pushover*), que interage a capacidade resistente da estrutura com as demandas externas. Esse método apresenta uma representação da não linearidade física por meio de curvas de capacidade estrutural e de curvas de demanda. A interseção entre as duas curvas é o chamado de Ponto de Performance (PP).

Diferentes formulações para os Procedimentos Não Lineares Estáticos estão disponíveis, estando entre os mais difundidos o CSM (*Capacity Spectrum Method*) apresentado pelo ATC-40 (ATC, 1996) e o método N2 (*Non-linear 2-model*) apresentado pelo *Eurocode 8* (CEN, 1998).

Um estudo muito importante dessa última década neste tema é o de PINHO *et al.* (2013). Nele os autores apresentam um estudo comparativo de várias estruturas analisadas para vários métodos não lineares,

dentre eles o CSM e o N2. Os resultados dos métodos encontrados para forças cortantes na base e deslocamentos no topo das estruturas foram similares. Esse estudo confirmou a aceitabilidade da utilização dos Procedimentos Não Lineares Estáticos.

No presente trabalho faz-se a verificação dos resultados dos dois Procedimentos Não Lineares Estáticos aqui considerados, por meio da comparação com os resultados do Procedimento Linear Estático das Forças Horizontais Equivalentes (FHE) e da Análise Espectral Multimodal (AEM).

Este trabalho resume os resultados obtidos na Dissertação de Mestrado do primeiro autor (ORRALA, 2017), sob a orientação dos dois outros autores. Nessa dissertação são também detalhadamente descritos os Métodos CSM do ATC-40 e o método N2 do *Eurocode 8*.

2 Estudo de Caso

Considera-se que o prédio em estudo esteja localizado na Cidade de Nueva Loja na província de

1 Mestre, Programa de Projeto de Estruturas da Escola Politécnica da UFRJ, Brasil – waltehur@hotmail.com

2 Professor Titular da Escola Politécnica da UFRJ, Brasil, sdesouzalima@gmail.com

3 Professor Titular da Escola Politécnica da UFRJ, Brasil, sergiohampshire@poli.ufrj.br

Sucumbíos no Equador, como mostrado na Figura 1. O Espectro de Resposta Linear de acelerações considerado é o da Norma Equatoriana da Construção – NEC-SE-DS (MIDUVI, 2014). Os valores definidos como característicos nominais para as ações sísmicas

são aqueles que têm 10% de probabilidade de serem ultrapassados, no sentido desfavorável durante um período de 50 anos, o que corresponde a um período de recorrência de 475 anos.

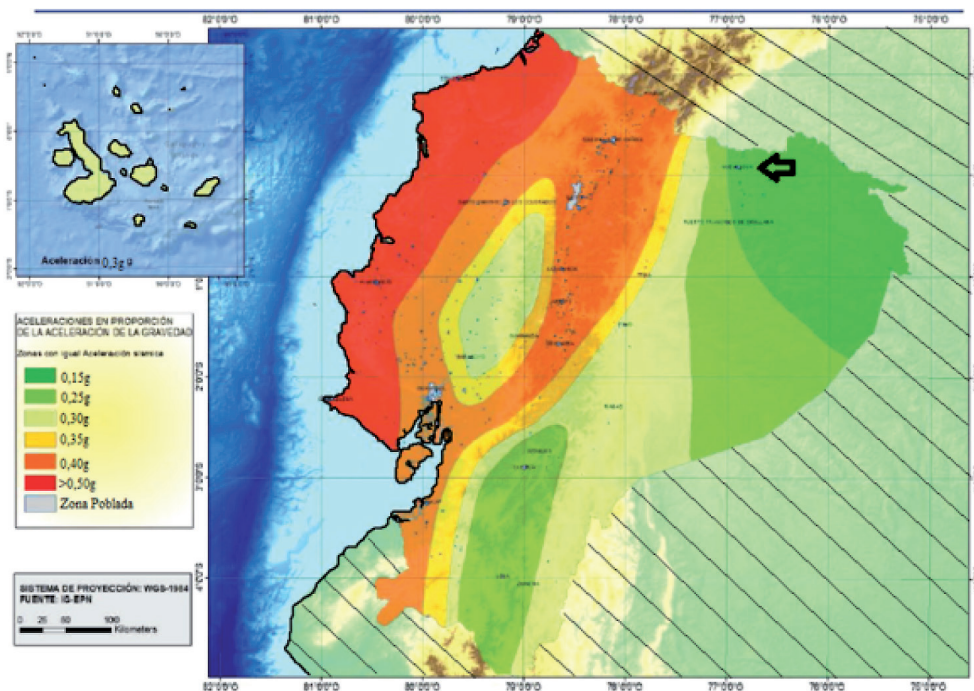


Figura 1 – Zonas Sísmicas do Equador e local do prédio.

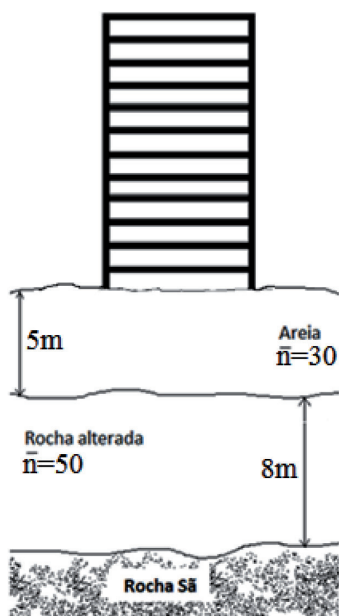


Figura 2 – Esquema do perfil geotécnico do local.

O prédio está assente em solo cujo perfil geotécnico esquemático é mostrado na Figura 2. Nessa

Figura, \bar{n} é o número de golpes do ensaio SPT (*Standard Penetration Test*) realizado no local.

Com as características do solo e as definições da NEC-SE-DS (MIDUVI, 2014) obtém-se o espectro de resposta elástico de acelerações, mostrado na Figura 3, expresso como uma fração da máxima aceleração na base da estrutura (*Peak ground acceleration* = $2,35 \text{ m/s}^2$).

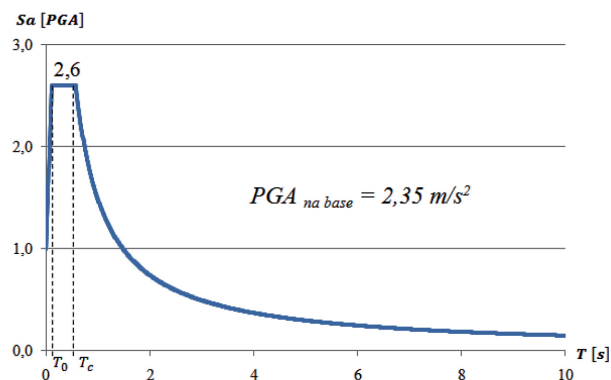


Figura 3 – Espectro de Resposta Linear para $\xi = 5\%$ (ORRALA, 2017).

Considera-se o uso do prédio para fins comerciais, exposto a uma agressividade ambiental de Classe I como definido na NBR 6118 (ABNT, 2014). O prédio tem dois sistemas básicos sismo-resistentes (Figuras 4 e 5); na direção X (longitudinal) é considerado um sistema de pórticos de concreto armado com detalhamento usual; na direção Y (transversal) existe um sistema dual, composto de pórticos e pilares-parede de concreto armado, ambos também com detalhamento usual.

No caso particular do método ATC-40 o prédio é considerado Tipo de Comportamento Estrutural SBTA.

O prédio tem doze pavimentos como mostrado na Figura 4, sendo a altura do primeiro andar igual a 4,90 m e a dos outros andares de 3,65 m cada. As dimensões (em metros) da planta são mostradas na Figura 5.

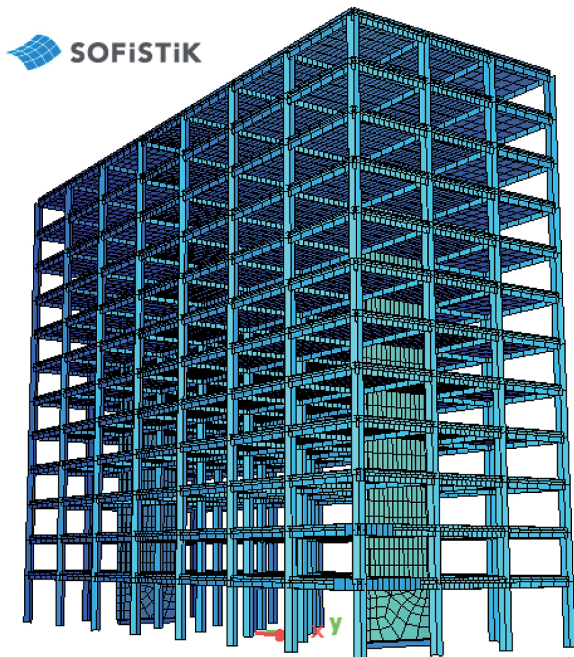


Figura 4 – Modelo do prédio (ORRALA, 2017).

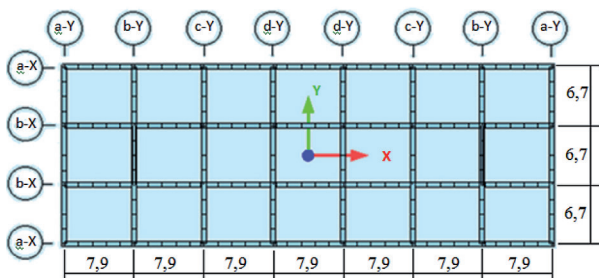


Figura 5 – Planta baixa, dimensões em metros (ORRALA, 2017).

Considera-se que os deslocamentos sejam pequenos, permitindo desconsiderar a não linearidade

geométrica. A não linearidade física é considerada no comportamento elasto-plástico nas ligações.

Define-se a distorção de cada andar como:

$$\text{Distorção}_i = \frac{\Delta_{\text{máx } i}}{h_i} \quad (1)$$

O deslocamento relativo $\Delta_{\text{máx } i}$ em cada andar será:

$$\Delta_{\text{máx } i} = u_i - u_{i-1} \quad (2)$$

Nestas expressões h_i é a altura do andar i e u_i é o deslocamento horizontal nesse andar.

Os materiais considerados são concreto com $f_{ck} = 28$ MPa (com módulo de elasticidade $E = 32000$ MPa) e aço CA-50.

Considera-se para concreto armado peso específico de 25 kN/m^3 e coeficiente de Poisson igual a 0,2.

As dimensões dos elementos estruturais são descritos a seguir.

- Pilares: 60 cm x 60 cm.
- Vigas: 30 cm de base e 80 cm de altura.
- Lajes: 20 cm de espessura.
- Pilares-parede: 30 cm de espessura.
- Cobrimento nominal de 2,5 cm.

Todos os detalhes sobre a resistência das ligações elasto-plásticas estão apresentadas em ORRALA (2017).

As grandezas mais importantes para a análise dinâmica são a massa total do prédio (13228 t), os autovalores e os autovetores. Os maiores períodos de vibração são $T_1 = 1,84$ s (na direção X) e $T_2 = 1,26$ s (na direção Y), e os fatores de massa modal em cada direção são mostrados nas Figuras 6 e 7.

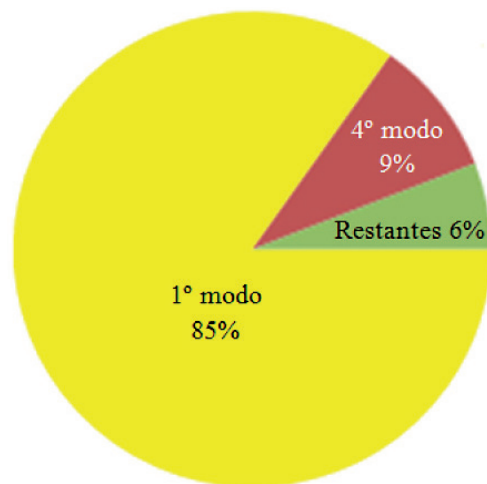


Figura 6 – Massa mobilizada por modo de vibração na direção X.

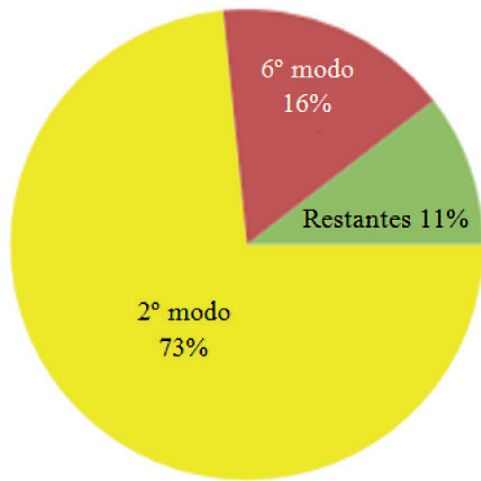


Figura 7 – Massa mobilizada por modo de vibração na direção Y.

Além do peso próprio, a estrutura é projetada para receber cargas não estruturais. Para os primeiros 11 pavimentos será considerado o valor de 1,5 kN/m² e na cobertura de 0,5 kN/m². Na cobertura, há quatro cargas pontuais de 900 kN cada, cuja resultante coincide com o centro de massa desse andar. As cargas acidentais serão de 6 kN/m² para os 11 primeiros pavimentos e 3 kN/m² para a cobertura.

As cargas horizontais dependem do método escolhido para se estimar a demanda sísmica, sendo diferentes nas direções X e Y.

3 Processamento

Será apresentada a análise sísmica estrutural por quatro métodos: Procedimento Linear Estático das Forças Horizontais Equivalentes (FHE), Análise Espectral Multimodal (AEM) e Procedimentos Não Lineares Estáticos de Carregamento Lateral Progressivo (*Pushover*) segundo o ATC-40 e segundo o *Eurocode 8*.

Um dos principais objetivos deste trabalho é a comparação entre resultados obtidos com cada método. Por isso, apesar de o Método Não Linear Estático de Carregamento Lateral Progressivo, segundo o *Eurocode 8*, estabelecer o uso de dois perfis de carga lateral, será considerado apenas um perfil, qual seja, o perfil do modo fundamental de vibração da estrutura na direção considerada.

Para agilizar o processamento de dados do programa de análise (SOFiSTiK, 2014), substituíram-se as lajes por diafragmas. O arranjo das ligações de restrição é tal que todas as ligações que compõem o diafragma convergem no centro de massa do piso. A massa da laje é aplicada nas vigas correspondentes de cada pavimento.

3.1 Procedimento Linear Estático das Forças Horizontais Equivalentes (FHE)

Esse procedimento não é mais do que uma análise linear estática. Serão considerados os coeficientes definidos pela NBR 15421 (2006) para modificar os resultados das análises lineares e assim considerar os efeitos da não linearidade física.

Com os primeiros períodos em cada direção, $T_1 = 1,84$ s (Direção X) e $T_2 = 1,26$ s (Direção Y), se obtêm na Figura 3 as acelerações $S_{a1} = 1,894$ m/s² e $S_{a2} = 2,768$ m/s², respectivamente.

As forças horizontais a serem aplicadas à estrutura são $V_x = 9279$ kN e $V_y = 13561$ kN. A distribuição é realizada como estabelece a NBR 15421 e descrito por ORRALA (2017). Os deslocamentos horizontais de cada pavimento são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Deslocamentos FHE.

Andar	u-X (mm)	u-Y (mm)
1	32,9	10,4
2	59,9	23,4
3	86,5	39,4
4	112,5	57,4
5	137,7	76,7
6	161,7	96,6
7	184,0	116,6
8	204,4	136,2
9	222,1	155,1
10	236,6	173,2
11	247,5	190,3
12	254,2	205,8

3.2 Procedimento Linear Estático de Análise Espectral Multimodal (AEM).

Essa é uma análise dinâmica do tipo espectral multimodal em que cada modo de vibração produz as diversas respostas (forças nodais, deslocamentos nodais, velocidades, acelerações, forças cortantes, etc.). São em seguida obtidas respostas finais, resultado da combinação das respostas individuais de cada modo. A combinação de respostas usada neste trabalho é a *Complete Quadratic Combination* (CQC) (WILSON *et al.*, 1981).

São considerados 20 modos para a AEM. As forças cortantes na base obtidas são: $V_x = 8366$ kN e $V_y = 11176$ kN. Os deslocamentos obtidos por esse método, nas direções X e Y, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Deslocamentos AEM.

Andar	u-X (mm)	u-Y (mm)
1	29,3	7,7
2	52,6	16,9
3	74,4	28,1
4	94,8	40,6
5	113,5	53,9
6	130,6	67,6
7	146,0	81,3
8	159,5	94,7
9	171,0	107,8
10	180,4	120,5
11	187,3	132,6
12	191,6	143,6

3.3 Procedimentos Não Lineares Pushover ATC-40 e EC-8

As cargas horizontais a serem aplicadas à estrutura foram estabelecidas por ORRALA (2017), e a escala foi escolhida com base na eficiência para se traçar a Curva de Capacidade. As cargas primárias são: $P_x = 530,10$ kN e $P_y = 493,20$ kN. Os perfis de distribuição de forças são o perfil de deslocamentos do 1º modo (na direção X) e do 2º modo (na direção Y). As cargas horizontais são consideradas como ações excepcionais (E) em concordância com a NBR 6118 (2014).

As análises não lineares são realizadas considerando-se os fatores de ponderação para Combinação Excepcional Última do Estado Limite Último da NBR 6118. Esses fatores são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Fatores de ponderação.

Ação	Símbolo	γ
Permanente	G	1,2
Variável	Q	1,0
Excepcional	E	1,0

A Curva *Pushover* é traçada por todos os carregamentos criados a partir da expressão.

$$F = 1,2 Q + 1,0 Q + i \cdot 1,0 E \tag{3}$$

em que i é o fator progressivo que no caso deste trabalho varia de 1 a 20.

Quando a direção X é analisada, as parcelas excepcionais E se tornam P_x exclusivamente. Da

mesma maneira, E se tornam P_y quando analisada a direção Y.

Os deslocamentos resultantes, devidos à aplicação dos 20 carregamentos em cada direção, fazem com que a Curva *Pushover* seja traçada como mostrado nas Figuras 8 e 9.

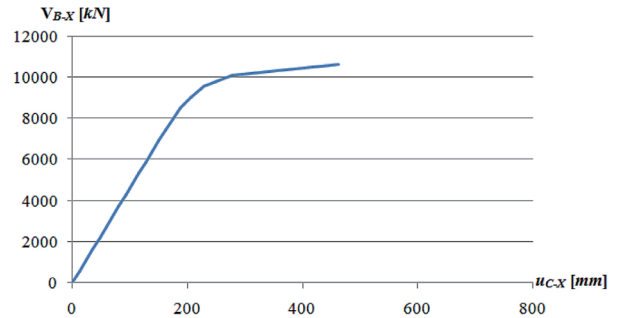


Figura 8 – Curva *Pushover*, direção X.

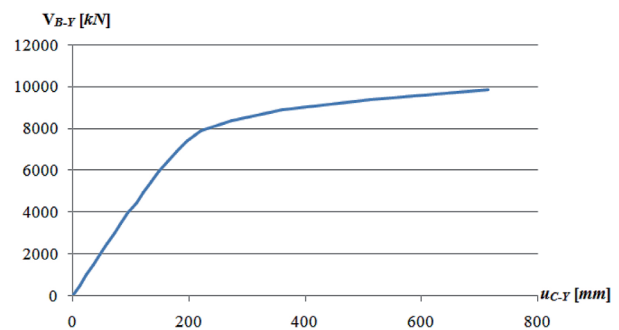


Figura 9 – Curva *Pushover*, direção Y.

Nas Figuras 8 e 9 os subscritos B e C significam Base e Nó de Controle, respectivamente.

Os Pontos de Performance (PP) calculados segundo os métodos ATC-40 e EC-8, nas direções X e Y, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Pontos de Performance.

Direção	Método	V (kN)	u_c (mm)
X	ATC-40	9785	251
X	EC-8	10178	314
Y	ATC-40	8207	254
Y	EC-8	8721	332

Nas Figuras 10 a 13 a Demanda Linear, a Demanda Não Linear e a Curva de Capacidade e o Ponto de Projeto (PP) são mostrados para cada tipo de análise.

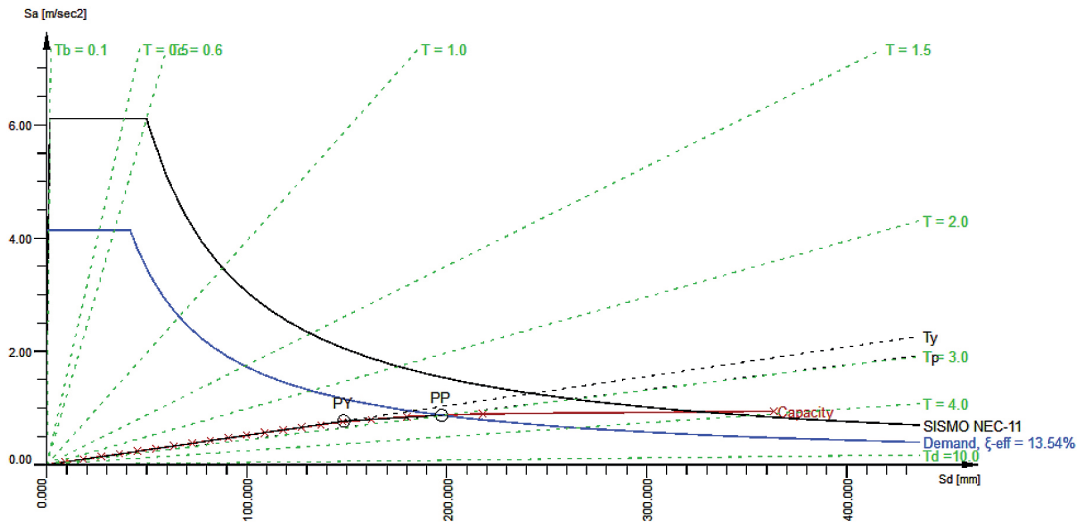


Figura 10 – PP, direção X, ATC-40.

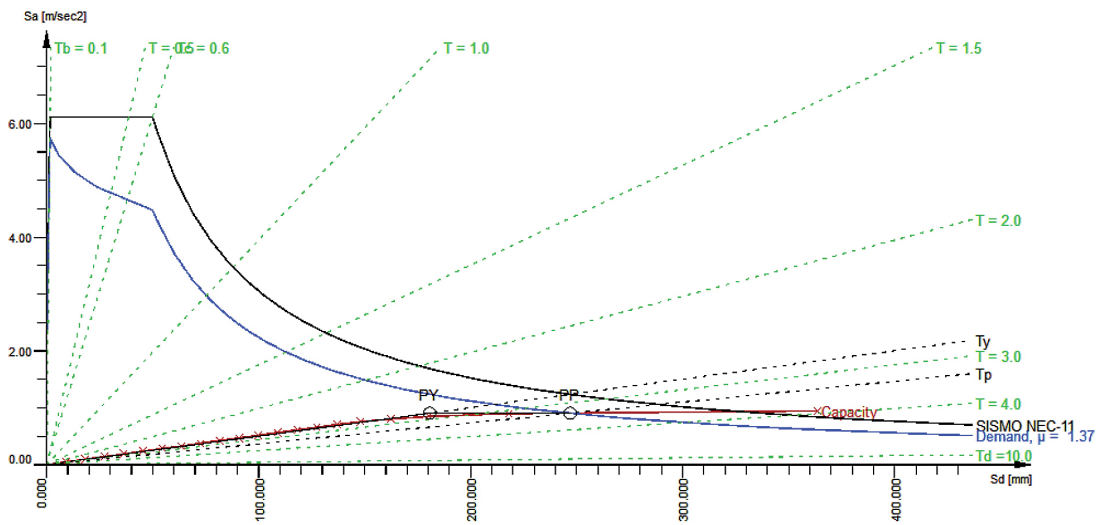


Figura 11 – PP, direção X, EC-8.

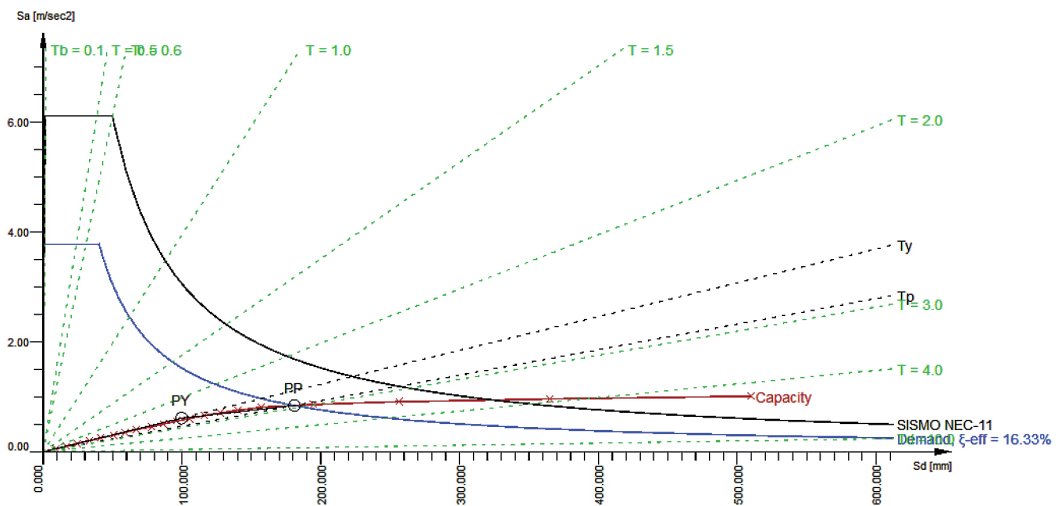


Figura 12 – PP, direção Y, ATC-40.

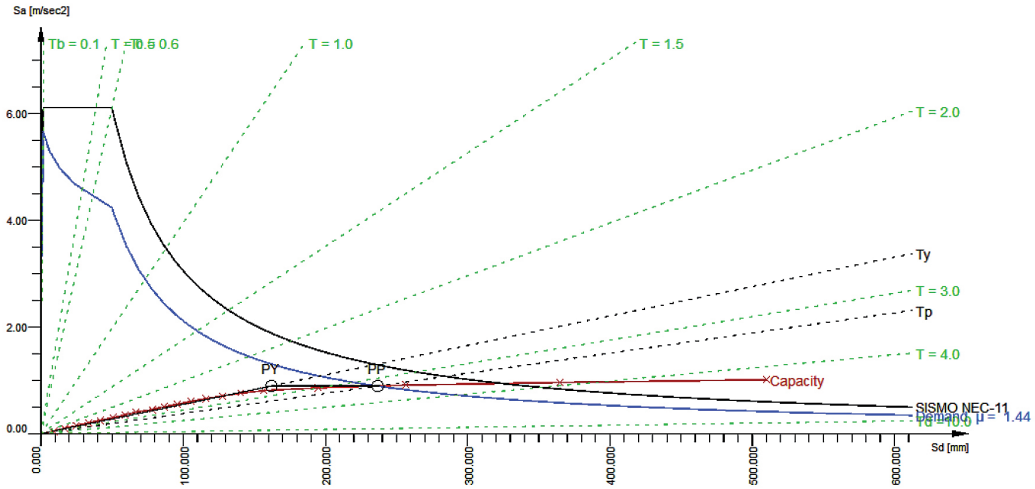


Figura 13 – PP, direção Y, EC-8.

Tabela 5 – Deslocamentos ATC-40.

Andar	u-X (mm)	u-Y (mm)
1	41,5	48,6
2	78,0	77,2
3	110,4	104,1
4	137,8	129,2
5	161,1	152,0
6	181,7	172,6
7	200,0	191,2
8	215,8	208,2
9	229,0	223,1
10	239,3	235,8
11	246,6	246,6
12	251,2	254,1

Tabela 6 – Deslocamentos EC-8.

Andar	u-X (mm)	u-Y (mm)
1	57,4	65,1
2	108,6	107,9
3	154,3	148,7
4	190,5	186,1
5	218,2	217,6
6	240,7	243,3
7	260,2	264,8
8	276,9	283,3
9	290,7	299,2
10	301,6	312,7
11	309,4	324,2
12	314,2	332,2

A Tabela 5 mostra os deslocamentos obtidos pela ATC-40, e a Tabela 6 mostra os deslocamentos obtidos pela EC-8.

Os deslocamentos mostrados, correspondem ao centro de massa de cada pavimento, e foram calculados considerando-se a condição (força x deslocamento) de cada PP.

4 Resultados

A Figura 14 apresenta as Forças Cortantes obtidas com os métodos de Força Horizontal Equivalente (FHE), Análise Espectral Multimodal (AEM), Ponto de Performance do ATC (PP ATC-40) e Ponto de Performance do Eurocode 8 (PP EC-8).

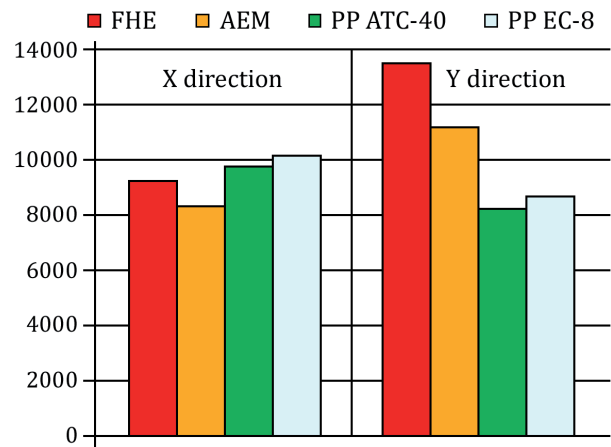


Figura 14 – Forças Cortantes nas direções X e Y.

A Figura 15 mostra os perfis de deslocamentos obtidos pelos métodos FHE, AEM, PP ATC-40 e PP EC-8.

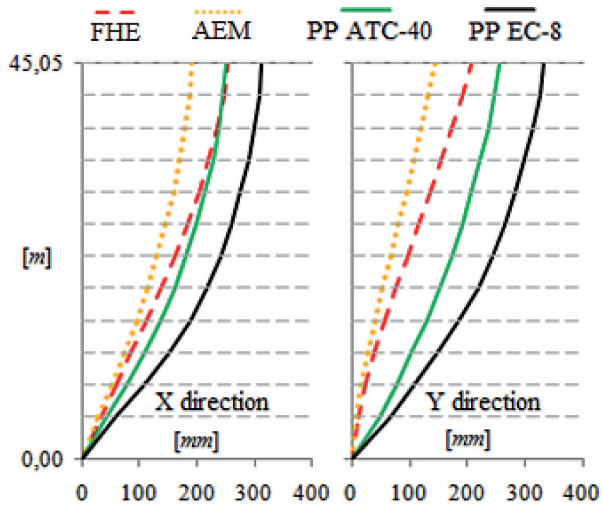


Figura 15 – Deslocamentos nas direções X e Y.

A Figura 16 mostra os perfis de distorção de cada andar obtidos pelos métodos FHE, AEM, PP ATC-40 e PP EC-8, sendo comparados com valor limite normativo de 0,02.

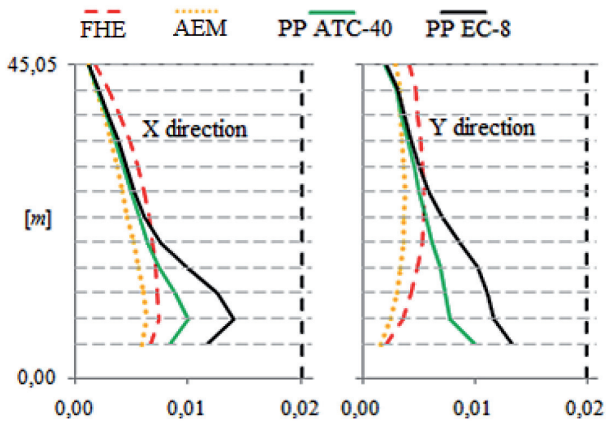


Figura 16 – Distorções e limites nas direções X e Y.

5 Conclusões

5.1 Sobre os resultados numéricos

No Capítulo 4, constatou-se que o método FHE produziu as maiores forças, deslocamentos e distorções entre os métodos lineares.

Também ficou evidente que entre os métodos não lineares, o do EC-8 foi o que produziu os maiores resultados.

Na direção Y as Forças Cortantes obtidas pelos Procedimentos Não Lineares são maiores do que aquelas obtidas pelos métodos FHE e AEM, o que indica que o dimensionamento do concreto armado deve ser revisado. Em outras palavras, o edifício

poderia não apresentar a resistência necessária a força cortante e a momentos fletores.

5.2 Sobre o estudo

A Análise *Pushover* mostrou-se ser muito importante para se avaliar o dimensionamento da taxa de armadura em uma estrutura de concreto armado. Também permite calcular, com maior precisão, os deslocamentos e distorções em uma condição mais extrema à qual a estrutura pode ser submetida durante um terremoto.

O dimensionamento da armadura dos elementos usando a Análise *Pushover* é um procedimento iterativo que poderia adotar os métodos FHE ou AEM como pontos de partida para a estimativa das resistências, e em seguida para a definição das ligações elastoplásticas.

O procedimento termina quando os materiais, a geometria, as dimensões, e as taxas de armadura são arranjadas de tal forma que sejam economicamente viáveis e satisfaçam aos requisitos estabelecidos pelas normas, como o controle dos deslocamentos horizontais com a limitação das distorções locais (em cada pavimento) e globais (no prédio).

6 Referências Bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR 15421: Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos – Procedimento. 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. 2014.
- APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL. ATC-40: Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings – Volume 1. 1996.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. CEN – Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. 1998.
- LIMA & SANTOS. Análise Dinâmica das Estruturas. Ciência Moderna, Primeira edição. 2008.
- MINISTERIO DE DESARROLLO URBANO E VIVIENDA. MIDUVI – NEC-SE-DS: Peligro Sísmico – Diseño Sismo Resistente. 2014.
- ORRALA, W. F. H. Dissertação de Mestrado: Avaliação de Procedimentos Não Lineares Estáticos com Carregamento Lateral Progressivo. Programa de Mestrado Profissional de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, UFRJ, 2017.
- ORRALA, W. F. H.; SANTOS S. H. C.; LIMA S. S.

Comparação de Resultados em Análise Sísmica – Métodos: Forças Horizontais Equivalentes, Espectro de Resposta e Histórico no Tempo. Engenharia Estudo e Pesquisa / ABPE, vol. 16, nº 2, p. 30-39, 2016.

PINHO, R. *et al.* Evaluation of Nonlinear Static Procedures in the Assessment of Building Frames. Earthquake Spectra, vol. 42, nº 4, p. 1459-1476. 2013.

SANTOS, S. H. C. *et al.*, Comparative study of some seismic codes for design of buildings, 16th World

Conference on Earthquake Engineering, Santiago, 2017.

SOFiSTiK, AG. Finite Element Software, 2014.

WILSON E. L.; DER-KIUREGHIAN A.; BAYO E. P. A Replacement for the SRSS Method in Seismic Analysis. The Journal of the International Association for Earthquake Engineering – Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol. 9, nº 2, p. 187-194, 1981.