

Comparação de Resultados em Análise Sísmica – Métodos: Forças Horizontais Equivalentes, Espectro de Resposta e Histórico no Tempo

*Walter F. H. Orrala¹,
Sergio Hampshire C. Santos²,
Sílvio de Souza Lima³*

Resumo

Para a análise sísmica de estruturas alguns métodos estão disponíveis. Os regulamentos estabelecem critérios os quais a estrutura deve atender para a seleção de um ou mais dos métodos. As estruturas regulares podem ser analisadas segundo qualquer um dos métodos estabelecidos por norma. Em geral, os resultados podem apresentar diferenças, não raro consideráveis, de um para outro método, no todo ou em parte. No presente trabalho pretende-se realizar uma comparação entre alguns dos métodos mais utilizados, de forma a entender as possíveis causas das diferenças entre seus resultados. Cabe ressaltar que as análises serão estritamente lineares tanto geometricamente quanto fisicamente. Utiliza-se o modelo de um prédio com regularidade ao longo da altura, mas com condição de não simetria no plano, e composto por quatro níveis de laje, pilares e uma parede. O modelo é tridimensional constituído por elementos de barra (vigas e colunas) e elementos de casca (parede e lajes). Por suposição, o material é o concreto. Os resultados obtidos e comparados são as forças cortantes nas direções horizontais, o momento de torção com relação ao eixo vertical e o momento de tombamento em cada andar, produzido por sismos de uma mesma magnitude segundo as direções horizontais. O prédio estaria localizado em Guayaquil, Equador, sendo utilizada a Norma Equatoriana da Construção de 2011 (NEC-11).

Palavras-chave: Análise sísmica; espectro de resposta; acelerograma; frequências; modos de vibração.

1 Introdução

Na análise sísmica de prédios, três são os métodos clássicos, a saber: análise por históricos no tempo (RHA), análise por espectro de resposta (RSA) e análise estática equivalente (REA). Os regulamentos estabelecem critérios, os quais, a estrutura deve atender para a seleção de um ou mais dos métodos. Mesmo as estruturas regulares podem ser analisadas segundo mais de um deles.

Normalmente os resultados obtidos por cada um dos métodos apresentam diferenças, não raro significativas, no todo ou em parte. No presente trabalho pretende-se realizar uma comparação entre resultados, visando entender as possíveis causas das diferenças.

2 Modelagem

É utilizado um modelo computacional 3D do prédio, onde as lajes e parede são modeladas com elementos de casca, e as vigas e os pilares com elementos de pórtico espacial. Suas dimensões são dadas na Tabela 1. A interação com o solo é considerada com apoios rígidos. É adotado o amortecimento modal de 5%, conforme usualmente estabelecido nas normas. A análise por históricos no tempo (RHA) é realizada por superposição modal, com a utilização dos 30 primeiros modos de vibração. Igual número de modos é utilizado na análise por espectro de resposta (RSA), sendo as contribuições dos modos, nos resultados determinadas pela regra do CQC (“Complete Quadratic Combination”). Nas análises é utilizado o programa SOFiSTiK.

1 Escola Politécnica – UFRJ / PPE – Programa de Projeto de Estruturas / waltehur@hotmail.com
2 Escola Politécnica – UFRJ / Departamento de Estruturas / sergiohampshire@gmail.com
3 Escola Politécnica – UFRJ / Departamento de Estruturas / sdesouzalima@gmail.com

O material é o concreto armado. Considera-se uma resistência característica f_{ck} de 20 MPa, um módulo de elasticidade secante E_{cs} de 21287 MPa e o coeficiente de Poisson ν igual a 0,2.

Tabela 1 – Dimensões (em cm).

Pilares	50 x 50
Vigas	30 x 70
Lajes (espessura)	25
Pilar Parede (espessura)	30
Altura do andar	300

3 Localização e Características do Solo

Considera-se que o prédio esteja localizado na cidade de Guayaquil, na província de El Guayas, na região Costa, no Equador. Por suposição, considera-se o solo composto por duas camadas, uma mais superficial de 5 m de espessura de areia, sobreposta a uma camada de 8 m de rocha alterada assente na rocha sã. A camada de areia apresenta uma resistência de 30 golpes no ensaio SPT padrão, enquanto a camada de rocha alterada apresenta 50 golpes.

Com a localização e os dados do solo obtém-se da NEC-11 (2011) os parâmetros para a construção do espectro elástico de projeto, mostrado na Figura 2, em que $S_a(T)$ representa a aceleração espectral, fornecida em função dos períodos estruturais T .

4 Metodologia do Estudo

Para as análises por espectro de resposta e por forças estáticas equivalentes, é suficiente a definição do espectro de projeto dado na Figura 2. Entretanto, para a análise com histórico são necessários os registros temporais da aceleração do solo. Na falta de registros de aceleração reais faz-se a geração desses, compatíveis com o espectro de projeto do local. Para isto é utilizado, o programa PROGSIS desenvolvido no Departamento de Estruturas da Escola Politécnica da UFRJ por TELES (2010). Obtém-se um histórico de acelerações compatível com o espectro de resposta, também denominado de sismo artificial. Na Figura 3 é apresentado o acelerograma obtido e usado nas análises.

Conforme estabelecido nas diversas normas admite-se uma excentricidade accidental no plano das lajes para consideração de possíveis variações do centro de massa do piso e de efeitos torcionais. Por se tratar de uma construção com irregularidade de torção no plano, a excentricidade accidental é amplificada, em conformidade com a NEC-11.

Considera-se o sistema de eixos definido na Figura 1. Faz-se a comparação dos resultados das análises seguintes: RHA com excentricidades no sentido $-Y$, $+Y$ e zero; $-X$, $+X$ e zero; RSA com excentricidades no sentido $-Y$, $+Y$ e zero; $-X$, $+X$ e zero; REA com excentricidades no sentido $-Y$, $+Y$ e zero; $-X$, $+X$ e zero. A posição dos eixos globais a respeito da estrutura são mostrados na Figura 1.

Calculam-se as forças cortantes $V-X$ e $V-Y$, os momentos de torção $M-Z$ devidos aos sismos X e Y , e os momentos de tombamento $M-X$ e $M-Y$ em cada um

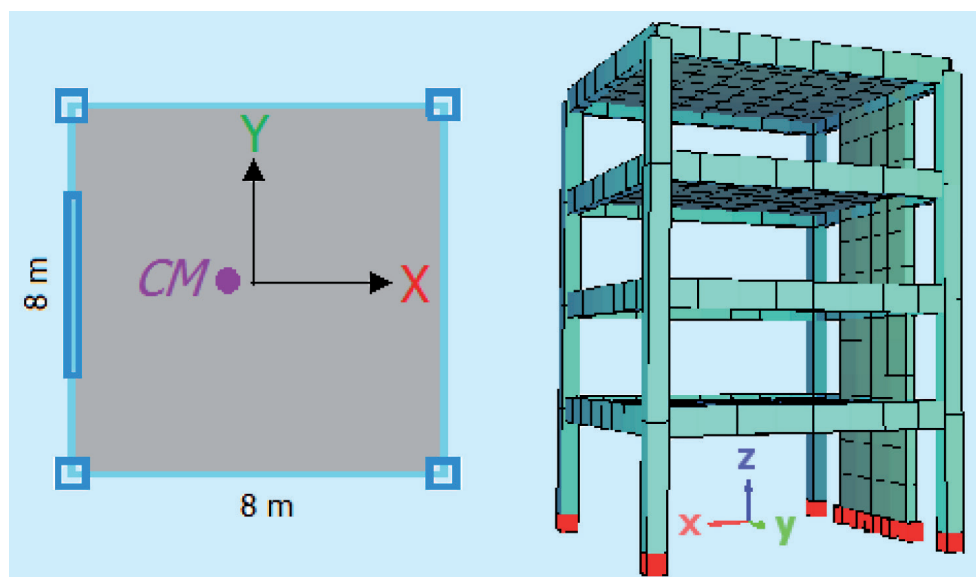


Figura 1 – Vista do prédio em planta e em perspectiva.

dos quatro pavimentos do prédio. No total são 18 casos de análise mostrados nas tabelas e figuras a seguir. Os resultados são comparados entre si para se estabelecer a diferença entre os métodos citados.

Ressalta-se que o momento de torção foi calculado ao redor do eixo Z, que atravessa as lajes no seu centroide, a 4 m de distância das bordas.

5 Resultados das modelagens

A posição do centro de massa CM é avaliada e a simbologia indica: o CM deslocado no sentido $-Y$ ($\downarrow$) ou no sentido $+Y$ ($\uparrow$); o CM deslocado no sentido $+X$ ($\rightarrow$) ou no sentido $-X$ ($\leftarrow$); e o CM na posição natural sem deslocamento ($\bullet$) (Tabelas 2 a 7; Figuras 4 a 21).

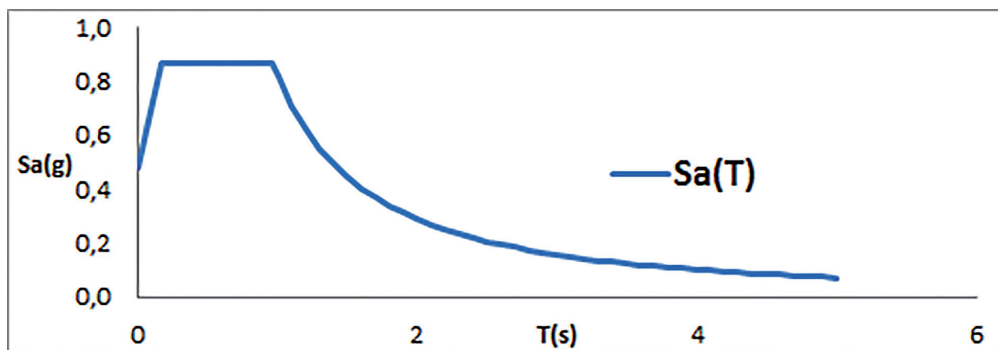


Figura 2 – Espectro elástico de projeto.

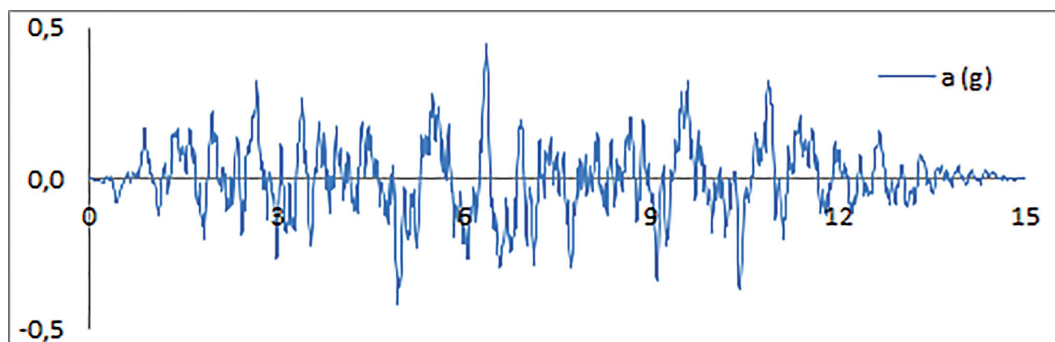


Figura 3 – Acelerograma artificial.

6 Conclusões

Este trabalho visa com o exemplo de uma estrutura bastante simples, analisar diferenças encontradas com a aplicação dos diversos métodos de análise sísmica. Analisando-se os resultados obtidos, excetuando-se o momento segundo o eixo vertical (momento de torção), verifica-se que o método estático (REA) fornece os maiores valores para as solicitações. Esses valores superam os obtidos com a análise por históricos (RHA). Isso pode ser explicado pelo fato do método estático considerar a massa total acelerada com a aceleração determinada para o primeiro modo, o que é irreal. A análise por espectro de resposta (RSA), embora considere as contribuições isoladas dos modos para a obtenção dos resultados finais, combina

os máximos obtidos, não necessariamente no mesmo instante, segundo uma regra tipo CQC ou SRSS (CHOPRA, 2012), em que o sinal das solicitações é perdido. Esses fatos justificam a diferença relativa ao método de históricos.

Com relação ao momento segundo o eixo vertical (momento de torção), o método estático equivalente, por trabalhar apenas com o primeiro modo, e sendo os modos de torção modos superiores, não consegue simular o comportamento da estrutura nessa situação. Isto faz com que a solicitação obtida seja pouco representativo, justificando a diferença para menos encontrada.

O método com históricos no tempo (RHA) por sua consistência com a realidade física, é aquele que fornece os resultados mais confiáveis.

Tabela 2 – Forças cortantes V-X (kN).

Z (m)	Estática Equivalente			Espectro de projeto			Histórico no tempo		
	e-Y↓	e-Y↑	e-Y•	e-Y↓	e-Y↑	e-Y•	e-Y↓	e-Y↑	e-Y•
0	2260	2260	2260	1903	1903	1943	1988	1988	2098
3	2024	2024	2024	1725	1725	1762	1806	1806	1877
6	1552	1552	1552	1317	1317	1344	1426	1426	1480
9	843	843	843	714	714	728	786	786	822
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0

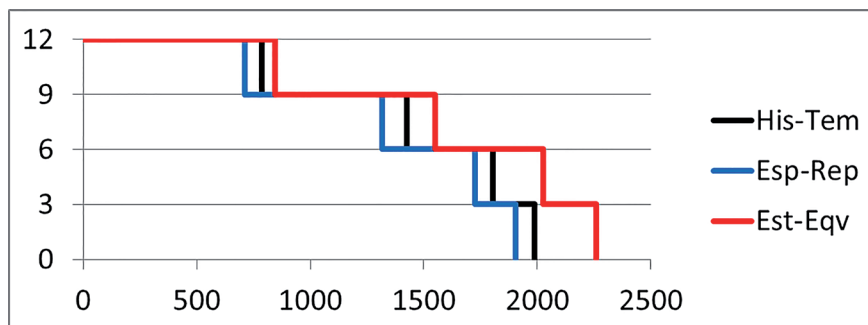


Figura 4 – V-X (kN), sismo X, e-Y negativo.

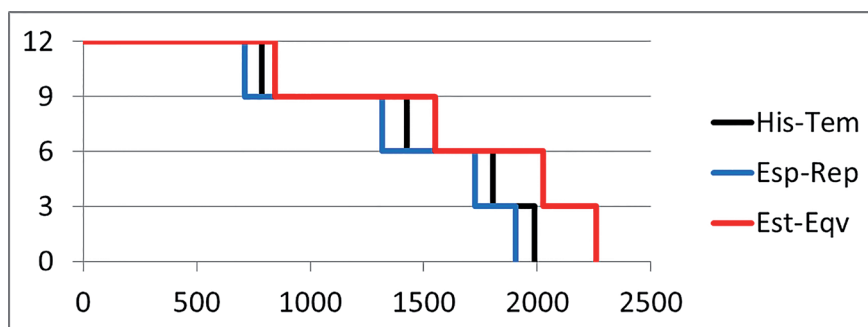


Figura 5 – V-X (kN), sismo X, e-Y positivo.

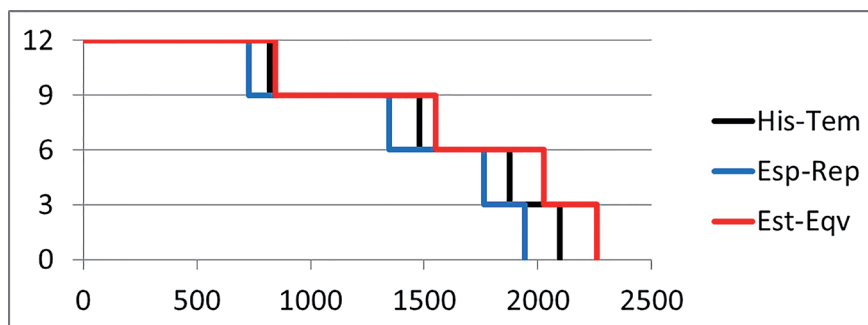


Figura 6 – V-X (kN), sismo X, e-Y zero.

Tabela 3 – Forças cortantes V-Y (kN).

Z (m)	Estática Equivalente			Espectro de projeto			Histórico no tempo		
	e-X←	e-X→	e-X•	e-X←	e-X→	e-X•	e-X←	e-X→	e-X•
0	2260	2260	2260	1210	1319	1287	1775	1532	1736
3	2024	2024	2024	1127	1093	1124	1436	1221	1428
6	1552	1552	1552	825	793	809	1010	860	995
9	843	843	843	475	400	430	543	464	510
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0

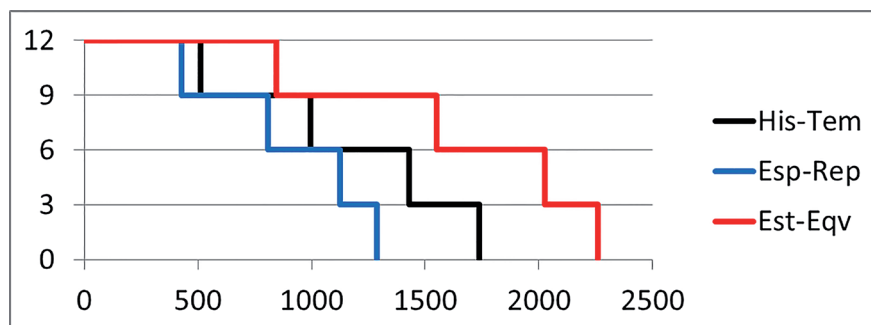
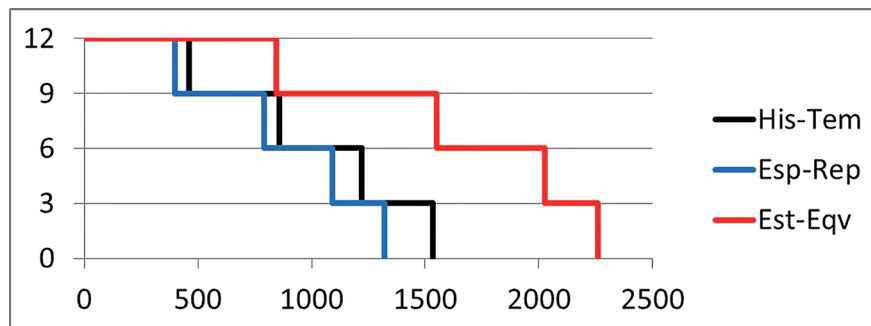
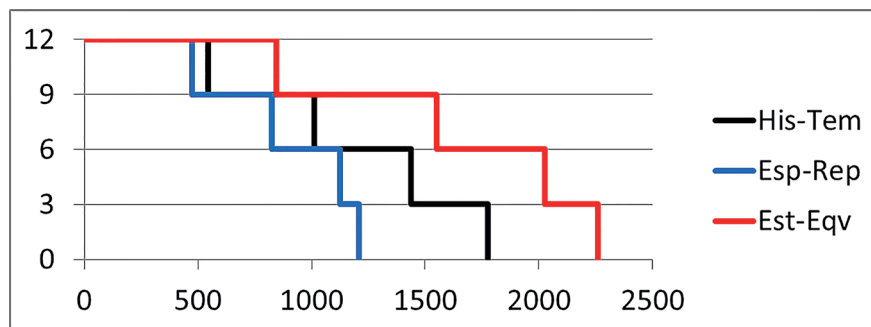


Tabela 4 – Momento de torção M-Z (kNm) sismo X.

Z (m)	Estática Equivalente			Espectro de projeto			Histórico no tempo		
	e-Y↓	e-Y↑	e-Y•	e-Y↓	e-Y↑	e-Y•	e-Y↓	e-Y↑	e-Y•
0	904	904	0	1741	1741	0	947	947	0
3	810	810	0	1571	1571	0	811	811	0
6	621	621	0	1194	1194	0	632	632	0
9	337	337	0	651	651	0	361	361	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0

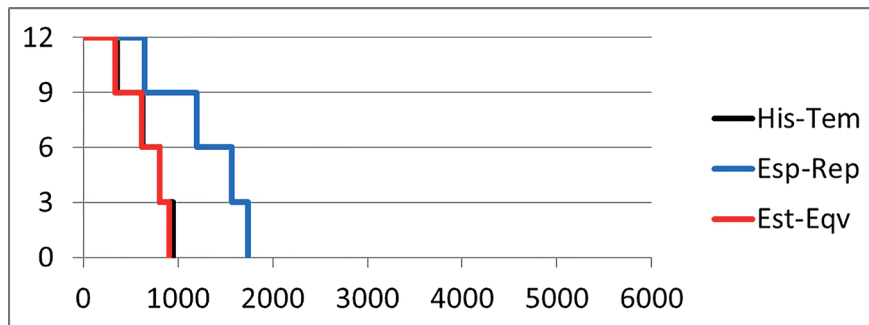


Figura 10 – M-Z (kNm), sismo X, e-Y negativo.

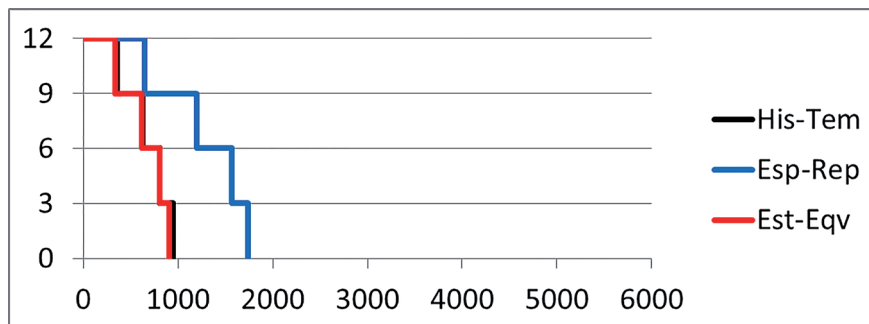


Figura 11 – M-Z (kNm), sismo X, e-Y positivo.

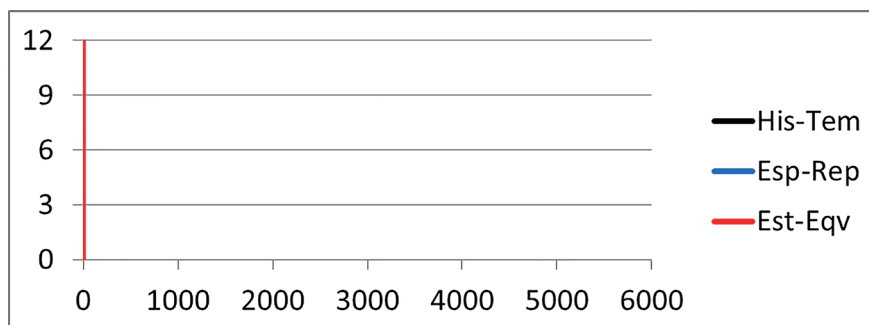


Figura 12 – M-Z (kNm), sismo X, e-Y zero.

Tabela 5 – Momento de torção M-Z (kNm) sismo Y.

Z (m)	Estática Equivalente			Espectro de projeto			Histórico no tempo		
	e-X←	e-X→	e-X•	e-X←	e-X→	e-X•	e-X←	e-X→	e-X•
0	3797	305	1803	4453	4625	4384	4381	4706	4405
3	3294	305	1547	4157	4158	4183	3943	4509	4232
6	2376	310	1076	3309	3418	3530	3090	3675	3488
9	1104	318	418	1928	1993	2113	1713	2047	1970
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0

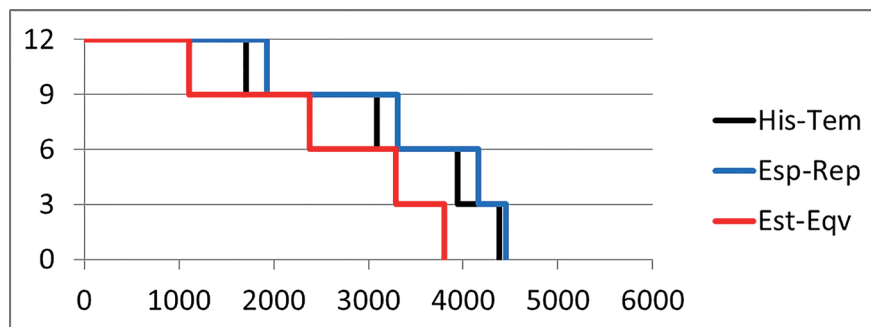


Figura 13 – M-Z (kNm), sismo Y, e-X negativo.

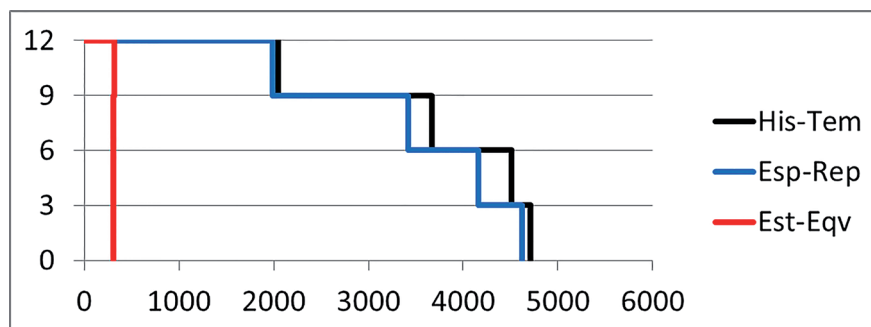


Figura 14 – M-Z (kNm), sismo Y, e-X positivo.

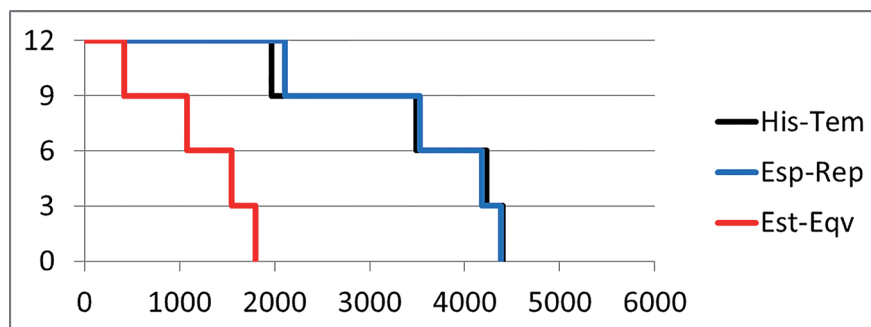


Figura 15 – M-Z (kNm), sismo Y, e-X zero.

Tabela 6 – Momento de tombamento M-Y (kNm) sismo X.

Z (m)	Estática Equivalente			Espectro de projeto			Histórico no tempo		
	e-Y↓	e-Y↑	e-Y•	e-Y↓	e-Y↑	e-Y•	e-Y↓	e-Y↑	e-Y•
0	20040	20040	20040	16609	16609	16956	17434	17434	17997
3	13259	13259	13259	10988	10988	11215	11773	11773	12202
6	7186	7186	7186	5918	5918	6037	6476	6476	6749
9	2530	2530	2530	2057	2057	2096	2266	2266	2370
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0

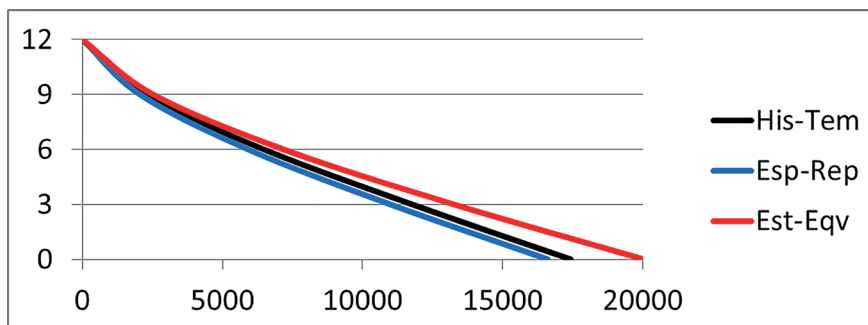


Figura 16 – M-Y (kNm), sismo X, e-Y negativo.

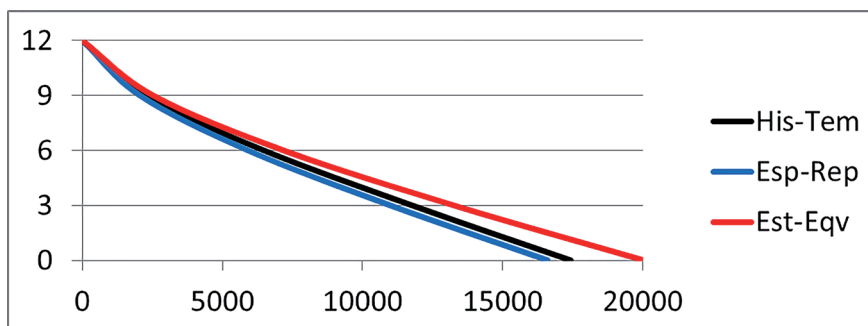


Figura 17 – M-Y (kNm), sismo X, e-Y positivo.

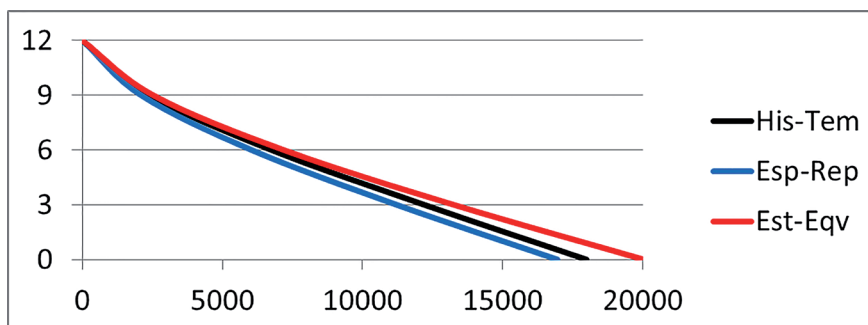


Figura 18 – M-Y (kNm), sismo X, e-Y zero.

Tabela 7 – Momento de tombamento M-X (kNm) sismo Y.

Z (m)	Estática Equivalente			Espectro de projeto			Histórico no tempo		
	e-X←	e-X→	e-X•	e-X←	e-X→	e-X•	e-X←	e-X→	e-X•
0	20040	20040	20040	10418	11124	10687	13950	11816	13779
3	13259	13259	13259	6869	6317	6875	8668	7351	8595
6	7186	7186	7186	3705	3104	3557	4549	3926	4414
9	2530	2530	2530	1278	954	1180	1569	1363	1484
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0

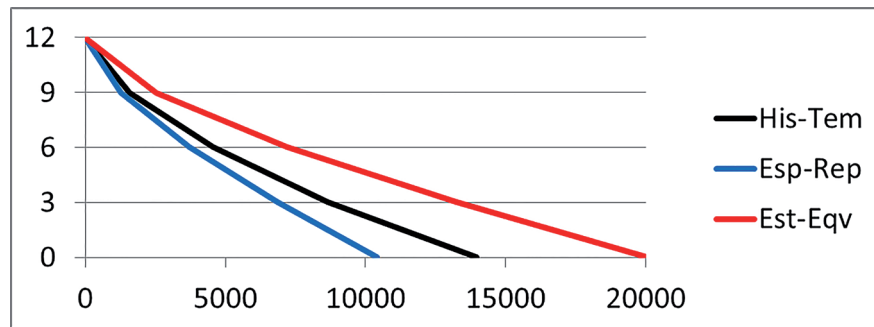


Figura 19 – M-X (kNm), sismo Y, e-X negativo.

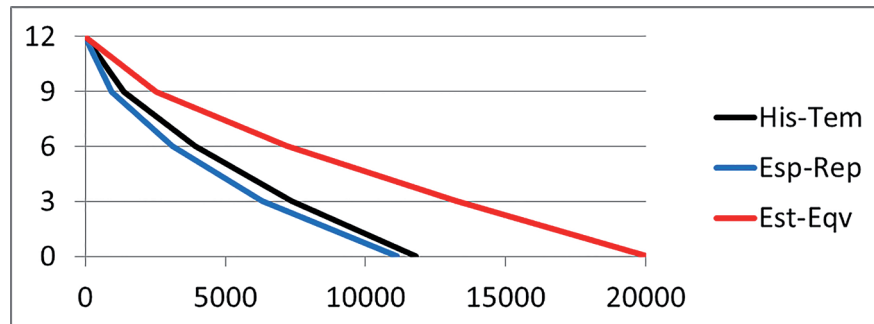


Figura 20 – M-X (kNm), sismo Y, e-X positivo.

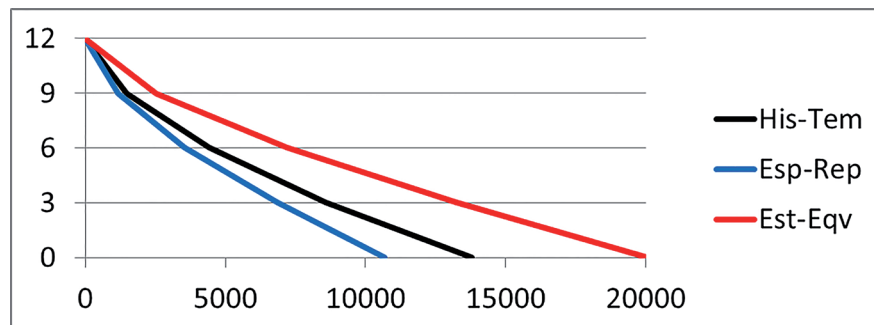


Figura 21 – M-X (kNm), sismo Y, e-X zero.

7 Referências

- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERING. ASCE 7-10. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, 2010.
- CHOPRA, A. K. Dynamics of Structures, Theory of Earthquake Engineering. Prentice Hall, 2012.
- CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. Dynamics of Structures. Computers & Structures Inc., 2003.
- MINISTERIO DE DESARROLLO URBANO Y VIVIENDA. MIDUVI. Normas ecuatorianas de la construcción, 2011.
- DATTA, T. K. Seismic Analysis of Structures. John Wiley & Sons Pte Ltd, 2010.
- ELNASHAI, A. S.; DI SARNO, L. Fundamentals of Earthquake Engineering. John Wiley & Sons Ltd., 2008.
- SEN, T. K. Fundamentals of Seismic Loading on Structures. John Wiley & Sons Ltd., 2009.
- SOFiSTiK A.G. SOFiSTiK – Finite Element Software, <www.sofistik.com>, 2016.
- SOUZA LIMA, S.; SANTOS, S. H. C. Análise dinâmica das estruturas. Editora Ciência Moderna, 2008.
- SUCUOĞLU, H.; AKKAR, S. Basic Earthquake engineering from seismology to analysis and design. Springer, 2014.
- TELES, L. D. V. Considerações sobre a Redução das Forças Sísmicas devido aos Efeitos de Não-Linearidade Física nas Estruturas de Concreto Armado. Projeto de Graduação, Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.