

Análise de Estruturas Submetidas a Ações Sísmicas

Byl Farney Rodrigues da C. Júnior¹, Jader Santos Lopes², Marcos Paulo Sartin Silva³

¹ Pontifícia Universidade Católica de Goiás / farneyjr@gmail.com

² Pontifícia Universidade Católica de Goiás / jaderlopes7@hotmail.com

² Pontifícia Universidade Católica de Goiás / marcossartin@gmail.com

Resumo

Este trabalho tem como objetivo estudar um edifício fictício de 20 pavimentos submetido a carregamentos de sismo gerados pelos métodos propostos na ABNT NBR 15421:2006 – Projeto de estruturas resistentes a sismos. Um ponto específico no topo do edifício foi analisado pelo método das forças horizontais equivalentes e pelo método dinâmico modal espectral, a fim de obter os deslocamentos máximos por cada um dos métodos. Inicialmente, foram obtidos os carregamentos de sismo pelo método das forças horizontais equivalentes para dois tipos de solos: rígido e mole. Para comparar os valores dos deslocamentos da estrutura, o pórtico foi modelado utilizando o programa SAP 2000[®], versão educacional. Em seguida, foi conduzida uma análise estática utilizando os carregamentos obtidos no método das forças horizontais equivalentes para os solos rígido e mole, obtendo assim os deslocamentos no topo do edifício. Posteriormente, realizou-se uma análise dinâmica da estrutura, através do método dinâmico modal espectral, usando dois espectros de resposta diferentes, um para solo rígido e outro para solo mole conforme prescreve a norma, obtendo os deslocamentos no edifício para o método espectral. Comparando os deslocamentos de cada método, conclui-se que o método modal espectral é mais completo e tende a ser mais realístico que o Método das Forças Equivalentes, e que o solo rígido gera maior resistência à estrutura, apresentando menores deslocamentos do que em um terreno em solo mole.

Palavras-chave

Dinâmica; sismo; deslocamentos.

Introdução

Apesar de que no Brasil não há registros de atividades sísmicas de grande magnitude, é importante considerar seus efeitos nos projetos desenvolvidos, visto que têm sido projetadas e construídas edificações cada vez mais esbeltas e de grandes vãos, mais suscetíveis a ações como vibrações, ventos e com reduzida capacidade de dissipação de energia.

Para se adaptar a essas evoluções nos projetos e construções, o engenheiro tem buscado soluções mais específicas como a análise dinâmica, a fim de garantir a segurança estrutural e o bom desempenho das edificações. Esse conhecimento é fundamental para os profissionais, pois, futuramente, o mesmo pode vir atuar em países onde as ações sísmicas são mais relevantes.

Projetar levando em conta o sismo tem como objetivos minimizar danos nas estruturas e preservar a vida humana, mesmo nos casos mais severos. Segundo BRASIL (2013), as estruturas devem resistir a terremotos leves sem dano nenhum, nos casos moderados devem resistir com dano estrutural insignificante e não colapsar em casos de terremotos mais severos. Nos casos de estruturas classificadas como especiais, ou seja, aquelas essenciais para

a segurança e bem estar público em casos de emergência, sejam hospitais, escolas, quartéis de bombeiros, etc, estas devem continuar funcionando durante e depois de um terremoto severo. Em 2006, entrou em vigor no Brasil a norma específica de sismo, a ABNT NBR 15421 – Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimentos, cujo objetivo é estabelecer requisitos de projetos para estruturas civis, visando a preservação de vidas humanas, a redução de danos esperados em edificações e a manutenção da operacionalidade de edificações críticas durante e após um evento sísmico.

A ABNT NBR 15421:2006 fixa os requisitos exigíveis para verificação da segurança das estruturas usuais da construção civil relativamente a estas ações e seus critérios de verificação e resistências a serem considerados no projeto das estruturas de edificações, quaisquer que sejam sua classe e destino, salvo os casos previstos em normas brasileiras específicas.

O Brasil possui 5 (cinco) zonas sísmicas conforme o mapeamento da aceleração sísmica horizontal característica apresentado na Figura 1:

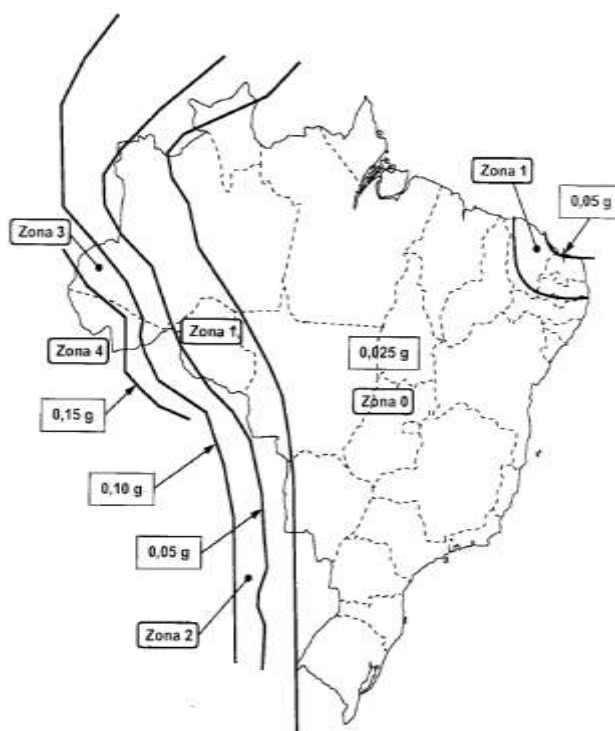


Figura 1 - Mapeamento da aceleração sísmica horizontal característica para terrenos da classe B ("Rocha"). Fonte: ABNT NBR 15421 (2006)

De acordo com a norma ABNT NBR 15421:2006, pode-se gerar carregamento nas estruturas submetidas a sismo por dois métodos distintos a seguir:

Método das forças horizontais equivalentes (FHE): Leva-se em consideração a aceleração sísmica e o efeito da amplificação desta no solo. Neste método, as ações sísmicas são representadas por um conjunto de forças estáticas equivalentes proporcionais às cargas gravitacionais atuantes na estrutura.

A força horizontal total na base da estrutura, numa determinada direção, é dada por:

$$H = C_s \cdot W \quad (1)$$



Onde W é o peso total da estrutura, considerando-se todas as cargas permanentes e C_s é o coeficiente de resposta sísmica, conforme a equação 2:

$$C_s = 2,5 \frac{\left(\frac{a_{gs0}}{g} \right)}{\left(\frac{R}{I} \right)} \quad (2)$$

Sendo a_{gs0} é a aceleração espectral de acordo com a equação (3) a seguir, g é aceleração da gravidade, I é o fator de importância de utilização encontrado na tabela 4 e R é o coeficiente de modificação de resposta de acordo com a tabela 6, ambas tabelas transcritas da ABNT NBR 15421:2006.

$$a_{gs0} = C_a \cdot a_g \quad (3)$$

Em que C_a é fator de amplificação sísmica no solo e a_g é aceleração espectral, ambos para o período de 0,0s.

A força horizontal total na base do edifício deve ser distribuída verticalmente entre os pavimentos, ou seja, será aplicada uma força F_x horizontalmente em cada elevação, que pode ser calculada pelas expressões (4) e (5).

$$F_x = C_{vx} H \quad (4)$$

$$C_{vx} = \frac{w_x \cdot h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot h_i^k} \quad (5)$$

Sendo w_i e w_x parcelas do peso efetivo total para as elevações i ou x , h_i e h_x altura entre a base e as elevações i ou x , e k um coeficiente relacionado com o período natural da estrutura.

Segundo a ABNT NBR 15421:2006, para efeito de classificação da edificação quanto à sua utilização, visando a proteção das edificações cuja funcionalidade seja definida como essencial para a preservação da vida humana ou que afetem maior número de pessoas, a norma definiu três categorias de utilização, apresentadas na tabela 4 da norma, visando garantir maior proteção para as edificações consideradas mais importantes.

Conforme PARISENTI (2011) *apud* SOUZA LIMA E SANTOS (2008), o valor do coeficiente de modificação de resposta (R) é alterado para os diversos sistemas estruturais sismoresistentes devido às suas diferentes capacidades de dissipação de energia por deformação em regime elasto-plástico. O tipo de detalhamento, se usual, intermediário ou especial, influencia na capacidade de dissipação de energia no domínio não linear.

Método dinâmico modal espectral: Segundo PARISENTI (2011), uma das formas de caracterizar os efeitos do sismo em estruturas é utilizar o método de espectro de resposta. Com o gráfico do espectro de resposta é possível obter a resposta máxima da estrutura em função de seus períodos naturais ou frequências naturais. Neste método, determina-se o número de modos a ser considerado nas análises com espectros de resposta obtendo-se as respostas máximas em cada modo.



De acordo com SORIANO (2014), “espectros de resposta são representações (gráficas ou analíticas), sem consideração do sinal, de valores de pico de respostas de osciladores simples com diferentes períodos e amortecimentos. Em análise sísmica são utilizados os espectros de deslocamento, de velocidade e de aceleração, devidos à aceleração da base”.

Tabela 1 – Fatores de amplificação sísmica no solo

Classe do terreno	C _a		C _v	
	a _g ≤ 0,10g	a _g = 0,15g	a _g ≤ 0,10g	a _g = 0,15g
A	0,8	0,8	0,8	0,8
B	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,2	1,2	1,7	1,7
D	1,6	1,5	2,4	2,2
E	2,5	2,1	3,5	3,4

Obtidas as forças horizontais totais na base e os fatores de amplificação no solo C_a e C_v, ambos de acordo com a Tabela 1, é possível encontrar as acelerações espectrais para período de 0 segundos, utilizando a equação (3) e para 1,0s pela equação (6):

$$a_{gs1} = C_v \cdot a_g \quad (6)$$

Logo, podemos obter o espectro de resposta de projeto, S_a(T), para três faixas de período pelas expressões (7) a (9):

$$S_a(T) = a_{gs0}(18,75 \cdot T \cdot (C_a/C_v) + 1,0) \quad 0 \leq T \leq (C_v/C_a) \cdot 0,08 \quad (7)$$

$$S_a(T) = 2,5a_{gs0} \quad (C_v/C_a) \cdot 0,08 \leq T \leq (C_v/C_a) \cdot 0,40 \quad (8)$$

$$S_a(T) = a_{gs1}/T \quad T \geq (C_v/C_a) \cdot 0,40 \quad (9)$$

Finalmente, é possível plotar o gráfico do espectro de resposta para determinada estrutura e a partir dele, podem-se avaliar os valores máximos de resposta da estrutura.

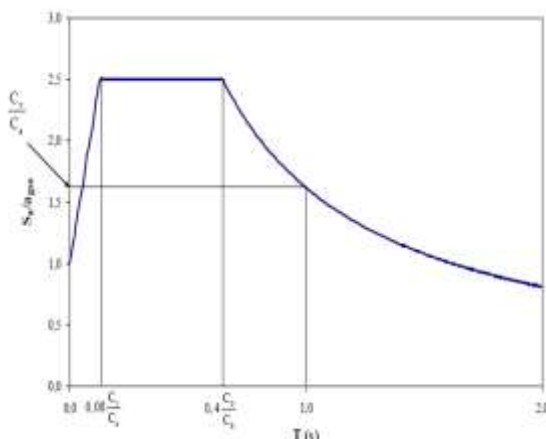


Figura 2 – Exemplo de espectro de resposta de projeto. Fonte: ABNT NBR 15421:2006

A metodologia deste trabalho consiste em gerar carregamentos a partir de procedimentos da norma brasileira de sismo, a ABNT NBR 15421:2006 – Projeto de estruturas resistentes a sismos, através de uma estrutura de concreto armado fictícia.

A estrutura fictícia é composta por 20 pavimentos tipo, cuja planta de forma encontra-se na Figura 3. Utilizando o “software” SAP 2000® V17, foram calculadas as frequências naturais, modos de vibração e realizada uma análise de deslocamentos máximos gerando carregamentos devido aos sismos e finalmente, foram analisados os esforços resultantes dessa estrutura para um correto dimensionamento.

Foram elaborados gráficos, comparando os resultados obtidos através do método das forças horizontais equivalentes para diferentes tipos de solo.

A Figura 3 apresenta a planta de forma da estrutura fictícia utilizada no estudo com informações das dimensões de vigas, pilares e lajes.

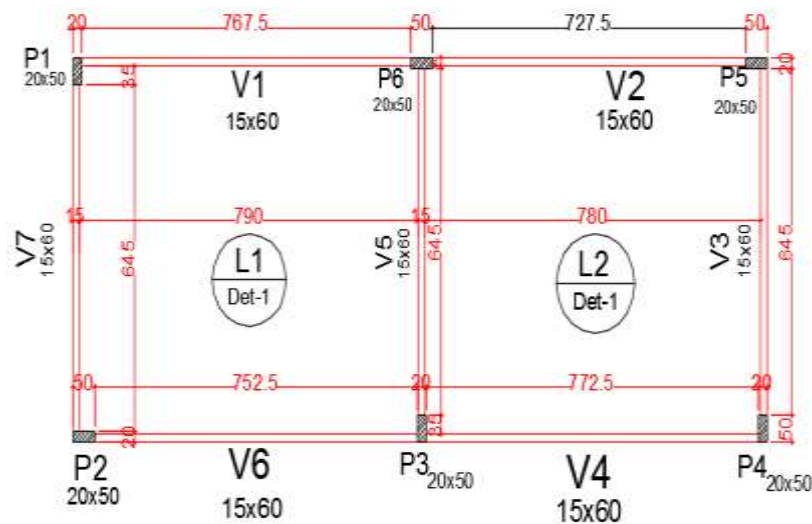


Figura 3 - Planta de forma da estrutura fictícia em concreto armado

A Tabela 2 traz algumas informações importantes do edifício utilizado para modelagem da estrutura no “software”, bem como o valor do período fundamental da estrutura e sua frequência fundamental.

Tabela 2 – Dados complementares

Módulo de Elasticidade	$2,55 \cdot 10^{10}$ N/m ²
Densidade concreto armado	2500 kg/m ³
f_{ck}	25 MPa
Piso-a-piso	2,70 m
Altura total	54 m
Taxa de amortecimento	2%
Período fundamental	3,84 s
Frequência fundamental	0,26 Hz



Conclusões

Através dos dados do edifício fictício apresentados na metodologia, foram calculados os carregamentos em cada pavimento e, utilizando o “software” SAP 2000[®] V17, foram feitas análises e obtidos os espectros de resposta para a estrutura e os deslocamentos devidos ao sismo ao longo dos pavimentos do edifício. Para isto foram utilizados os seguintes métodos: Método Modal Espectral e Método das Forças Horizontais Equivalentes considerando dois tipos de solo: mole e rígido.

Para o Método das Forças Horizontais Equivalentes (FHE) foram utilizados os seguintes parâmetros, retirados das Tabelas 3,4 e 6 da ABNT NBR 15421:2006:

Tabela 3 – Parâmetros utilizados para o Método FHE

a_g	0,025g
C_a (Solo Rígido)	1,6
C_a (Solo Mole)	2,5
I	1,0
R	3,0

A partir destes dados foi calculada a força horizontal total na base do edifício, H , e a força horizontal distribuída em cada pavimento, F_x , para os dois tipos de solo em estudo.

Os carregamentos gerados para o FHE para solo rígido estão no Quadro 1 e para o solo mole, no Quadro 2.



Quadro 1 – Carregamento de sismo gerado pelo Método das Forças Horizontais Equivalentes (Solo Rígido)

MÉTODO DAS FORÇAS HORIZONTAIS EQUIVALENTES - SOLO RÍGIDO						
Andares	Peso efetivo por pavimento W_i (kN)	Altura em relação à base - h_i (m)	Coefficiente k (para período de vibração maior que)	$W_i \times h_i^k$	C_{vx}	Força Horizontal F_x (kN)
20° PAVIMENTO	489,49	56	2	1.535.040,64	0,13937	409,33
19° PAVIMENTO	489,49	53,2	2	1.385.374,18	0,12578	369,42
18° PAVIMENTO	489,49	50,4	2	1.243.382,92	0,11289	331,56
17° PAVIMENTO	489,49	47,6	2	1.109.066,86	0,10070	295,74
16° PAVIMENTO	489,49	44,8	2	982.426,01	0,08920	261,97
15° PAVIMENTO	489,49	42	2	863.460,36	0,07840	230,25
14° PAVIMENTO	489,49	39,2	2	752.169,91	0,06829	200,57
13° PAVIMENTO	489,49	36,4	2	648.554,67	0,05889	172,94
12° PAVIMENTO	489,49	33,6	2	552.614,63	0,05017	147,36
11° PAVIMENTO	489,49	30,8	2	464.349,79	0,04216	123,82
10° PAVIMENTO	489,49	28	2	383.760,16	0,03484	102,33
9° PAVIMENTO	489,49	25,2	2	310.845,73	0,02822	82,89
8° PAVIMENTO	489,49	22,4	2	245.606,50	0,02230	65,49
7° PAVIMENTO	489,49	19,6	2	188.042,48	0,01707	50,14
6° PAVIMENTO	489,49	16,8	2	138.153,66	0,01254	36,84
5° PAVIMENTO	489,49	14	2	95.940,04	0,00871	25,58
4° PAVIMENTO	489,49	11,2	2	61.401,63	0,00557	16,37
3° PAVIMENTO	489,49	8,4	2	34.538,41	0,00314	9,21
2° PAVIMENTO	489,49	5,6	2	15.350,41	0,00139	4,09
1° PAVIMENTO	489,49	2,8	2	3.837,60	0,00035	1,02
TOTAL				11.013.916,59		2936,94



Quadro 2 – Carregamento de Sismo (Solo Mole)

MÉTODO DAS FORÇAS HORIZONTAIS EQUIVALENTES - SOLO MOLE						
Andares	Peso efetivo por pavimento W_i (kN)	Altura em relação à base - h_i (m)	Coefficiente k (para período de vibração maior que 2,5 seg)	$W_i \times h_i^k$	C_{vx}	Força Horizontal F_x (kN)
20° PAVIMENTO	489,49	56	2	1.535.040,64	0,13937	641,28
19° PAVIMENTO	489,49	53,2	2	1.385.374,18	0,12578	578,76
18° PAVIMENTO	489,49	50,4	2	1.243.382,92	0,11289	519,44
17° PAVIMENTO	489,49	47,6	2	1.109.066,86	0,10070	463,33
16° PAVIMENTO	489,49	44,8	2	982.426,01	0,08920	410,42
15° PAVIMENTO	489,49	42	2	863.460,36	0,07840	360,72
14° PAVIMENTO	489,49	39,2	2	752.169,91	0,06829	314,23
13° PAVIMENTO	489,49	36,4	2	648.554,67	0,05889	270,94
12° PAVIMENTO	489,49	33,6	2	552.614,63	0,05017	230,86
11° PAVIMENTO	489,49	30,8	2	464.349,79	0,04216	193,99
10° PAVIMENTO	489,49	28	2	383.760,16	0,03484	160,32
9° PAVIMENTO	489,49	25,2	2	310.845,73	0,02822	129,86
8° PAVIMENTO	489,49	22,4	2	245.606,50	0,02230	102,61
7° PAVIMENTO	489,49	19,6	2	188.042,48	0,01707	78,56
6° PAVIMENTO	489,49	16,8	2	138.153,66	0,01254	57,72
5° PAVIMENTO	489,49	14	2	95.940,04	0,00871	40,08
4° PAVIMENTO	489,49	11,2	2	61.401,63	0,00557	25,65
3° PAVIMENTO	489,49	8,4	2	34.538,41	0,00314	14,43
2° PAVIMENTO	489,49	5,6	2	15.350,41	0,00139	6,41
1° PAVIMENTO	489,49	2,8	2	3.837,60	0,00035	1,60
TOTAL				11.013.916,59		4.601,21

Para uma melhor análise e comparação dos dois métodos em questão, estão apresentados na Figura 4 o gráfico dos carregamentos de sismo obtidos pelo método das forças horizontais equivalentes variando o tipo de solo.

Variando o tipo de solo, verifica-se um maior carregamento horizontal transmitido aos primeiros pavimentos para o solo mole, em comparação com o solo rígido. Isto pode ser explicado pelo fato da resistência do solo influenciar diretamente, através dos fatores de amplificação do solo nos valores das forças estáticas equivalentes às forças sísmicas nas edificações, ou seja, quanto menos rígido ou mais “mole” for o terreno, maiores serão esses fatores de amplificação.

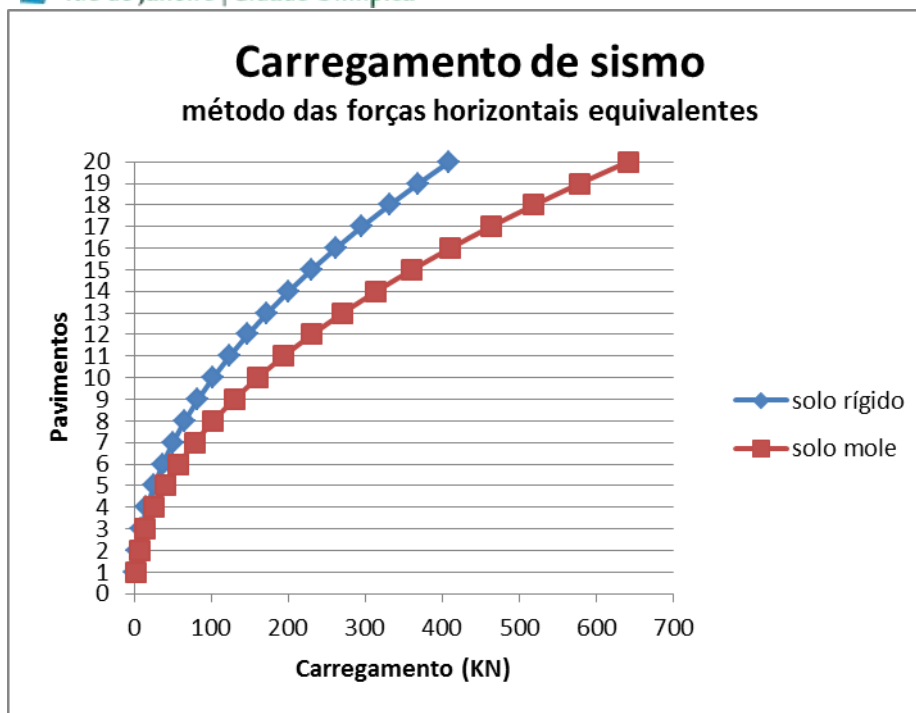


Figura 4 – Comparação do carregamento de sismo pelo Método das Forças Horizontais Equivalentes para dois tipos de solo

Posteriormente, utilizando-se o “software” SAP 2000[®] V17 foi realizada uma análise modal da estrutura fictícia para se obter as frequências naturais e, conseqüentemente, períodos naturais e seus respectivos modos de vibração. Ainda com o uso do “software” foram construídos os espectros de resposta para dois tipos de solo: mole e rígido. Para isso, utilizou-se o método modal espectral de acordo com a ABNT NBR 15421:2006.

Para a construção do espectro de resposta utilizou-se uma planilha *Excel*, onde foram inseridos as três faixas de períodos baseados nos fatores de amplificação sísmica (C_a e C_v) para solo mole e solo rígido, de acordo com a Tabela 3 da Norma Brasileira e as expressões (7), (8) e (9). Na região do edifício, o valor da aceleração sísmica $a_g \leq 0,10g$ (Zona 0 de acordo com o zoneamento sísmico do Brasil) e o fator de amortecimento crítico utilizado foi de 2% (dois por cento). Os espectros obtidos estão representados nas Figuras 7 e 8.

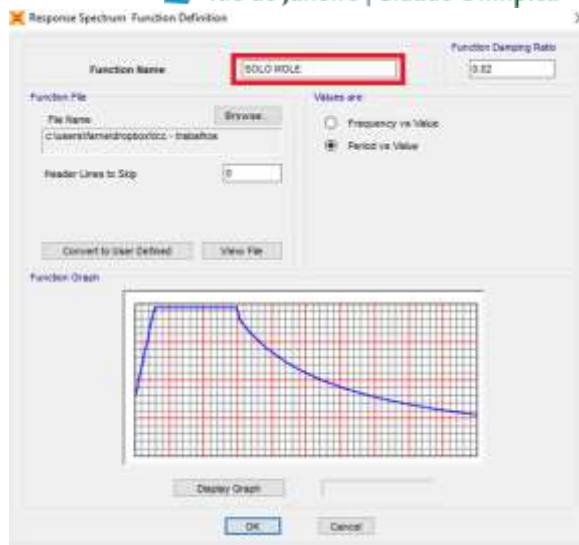


Figura 7 – Espectro de resposta para solo mole obtido pelo SAP 2000® V17 para o edifício em estudo

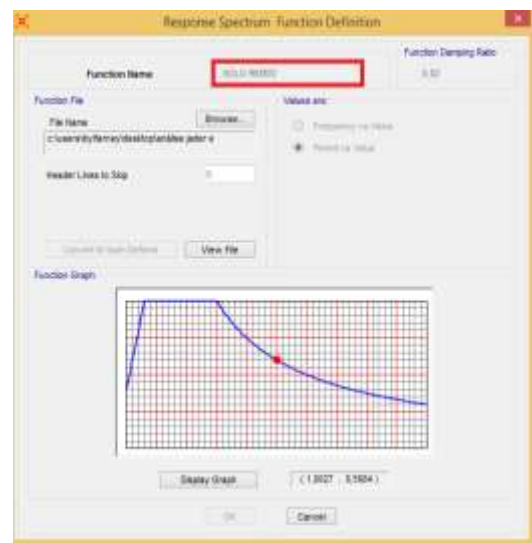


Figura 8 – Espectro de resposta para solo rígido obtido pelo SAP 2000® V17 para o edifício em estudo

Observa-se que os espectros de resposta obtidos para os solos são idênticos aos apresentados pela ABNT NBR 15421:2006, pois foram seguidas todas as recomendações normativas para a geração dos espectros.

Ainda utilizando o “software” SAP 2000® V17, foram obtidos os deslocamentos no topo da estrutura do edifício para cada método estudado neste trabalho. A estrutura do edifício fictício apresentando deslocamentos devidos ao sismo está apresentada na Figura 9:

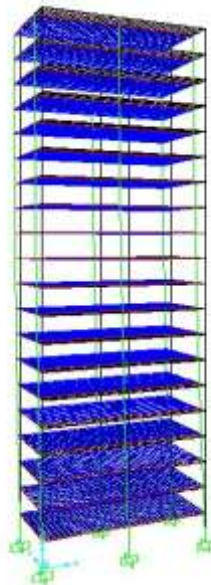


Figura 9 – Modelo tridimensional de elementos finitos

Utilizou-se o método de superposição modal na análise. Em geral, nas estruturas submetidas a sismo, pode-se analisar com o primeiro modo de vibração apresentado pelo “software”, pois este é o mais importante para pórticos e normalmente já é suficiente para caracterizar a resposta total da estrutura de forma eficiente.

Para efeito de estudo e posterior comparação entre os métodos, foi escolhido um ponto no topo da estrutura, o nó 126, cuja localização está representada na figura 10, para se analisar os deslocamentos da estrutura.

Ao se excitar a estrutura utilizando o “software”b verificou-se que a mesma desloca-se na direção y, conforme verifica-se na Figura 10 a seguir:

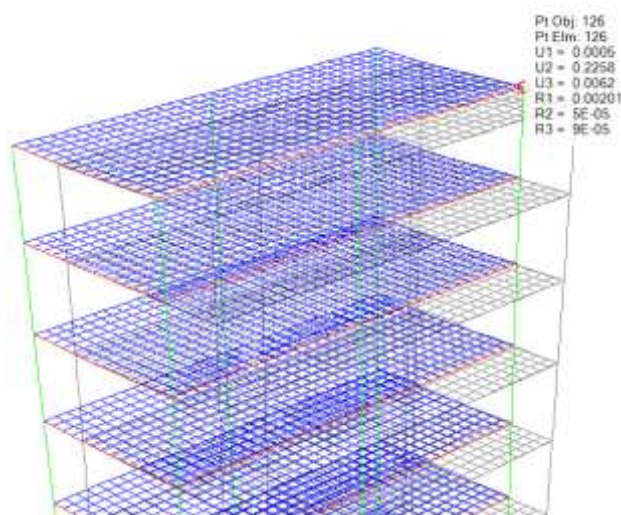


Figura 10 – Deslocamento em metros (nó 126) na direção 2 (y) para Solo Mole

O Quadro 3 traz os deslocamentos apresentados pela estrutura no nó escolhido, de acordo com cada método apresentado pela Norma Brasileira de sismo e suas variações quanto ao tipo do solo.

Quadro 3 – Deslocamentos na direção y (menor rigidez)

Método	Deslocamento (m)
FHE solo mole	0,414
FHE solo rígido	0,262
Espectral solo mole	0,226
Espectral solo rígido	0,155

Um dos diversos fatores que influenciam no impacto de um terremoto sobre uma determinada região são os tipos de terreno sob as construções. Para um mesmo método, quando comparado o deslocamento da estrutura por tipo de solo, verifica-se que com o solo mole a estrutura apresenta um deslocamento maior. Isto ocorre devido à amplificação das vibrações ocorrida neste tipo de solo. Já os solos rígidos apresentam uma melhor resistência às ondas sísmicas.



Quanto aos métodos estudados, observa-se que o método dinâmico modal espectral, por ser baseado em históricos de acelerações de terremotos reais, é mais confiável visto que analisa e retrata melhor o comportamento da estrutura e apresenta resultados que tendem a refletir melhor a realidade da estrutura durante uma atividade sísmica. O método das forças horizontais equivalentes mostrou-se mais conservador e apresentou resultados maiores para a força horizontal total na base.

Para projetos de estruturas sismorresistentes e eficiência estrutural para sua resistência a terremotos, as edificações devem apresentar algumas características importantes como: simplicidade estrutural com estruturas uniformes e simétricas, devem apresentar resistência a torção e os pavimentos devem ser dimensionados para ter um comportamento de diafragma rígido.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 15421: Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.
- BRASIL, R. M. L. R. F. e SILVA, M. A., Introdução à Dinâmica das Estruturas para a Engenharia Civil, 1ª edição, São Paulo, Blucher, 2013.
- PARINSENTI, R., Estudo de análise dinâmica e métodos da NBR 15421 para projeto de edifícios submetidos a sismos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.
- SORIANO, H. L., Introdução à dinâmica das estruturas, 1ª.ed., Rio de Janeiro, Elsevier, 2014.
- SOUZA LIMA, S. e SANTOS, S. H. C., Análise Dinâmica das Estruturas. 1ª ed., Editora Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 2008.