



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica
Programa de Projeto de Estruturas

Carlos Eduardo Lobo de Souza

**COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OBTIDOS EM MODELOS
COMPLETOS E SIMPLIFICADOS NA ANÁLISE SÍSMICA DE
UMA ESTRUTURA DA INDÚSTRIA NUCLEAR**



UFRJ

Carlos Eduardo Lobo de Souza

COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OBTIDOS EM MODELOS COMPLETOS
E SIMPLIFICADOS NA ANÁLISE SÍSMICA DE UMA ESTRUTURA DA
INDÚSTRIA NUCLEAR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Orientadores:

Sergio Hampshire de Carvalho Santos

Silvio de Souza Lima

Rio de Janeiro

2015

Souza, Carlos Eduardo Lobo de

Comparação entre resultados obtidos em modelos completos e simplificados na análise sísmica de em estrutura da indústria nuclear /Carlos Eduardo Lobo de Souza – 2015.

102: 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Projeto de Estruturas) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Projeto de Estruturas, Rio de Janeiro, 2015.

Orientadores: Sergio Hampshire de Carvalho Santos e Silvio de Souza Lima

1. Análise sísmica, 2. Análise dinâmica, 3. Análises comparativas. I. Santos, Sergio Hampshire de Carvalho e Lima, Silvio de Souza II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. III. Título.



UFRJ

COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OBTIDOS EM MODELOS COMPLETOS
E SIMPLIFICADOS NA ANÁLISE SÍSMICA DE UMA ESTRUTURA DA
INDÚSTRIA NUCLEAR

Carlos Eduardo Lobo de Souza

Orientadores:

Sergio Hampshire de Carvalho Santos

Silvio de Souza Lima

Dissertação de Mestrado apresentada Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Aprovada pela Banca:

Prof. Sergio Hampshire de Carvalho Santos, D. Sc., UFRJ

Prof. Silvio de Souza Lima, D. Sc., UFRJ

Prof. Gilberto Bruno Elwanger, D. Sc., UFRJ

Prof. Emil de Souza Sánchez Filho, D. Sc., UFF

Rio de Janeiro
2015

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Sergio Hampshire de Carvalho Santos pelo apoio, paciência e atenção dada para a conclusão deste trabalho, além do seu empenho em desenvolver o Programa de Projeto de Estruturas para disseminar o conhecimento da Engenharia para os menos experientes.

Ao Professor Silvio de Souza Lima pela co-orientação deste trabalho.

Aos meus queridos pais, Luiz Fernando e Sonia Regina, e ao meu irmão, Guilherme, por todo amor, carinho e por darem as condições necessárias que me fizeram chegar até aqui.

Aos Professores do Programa de Projeto de Estruturas, pela grande contribuição à minha formação acadêmica e profissional.

À Engevix Engenharia e aos amigos de trabalho pelo apoio e pela grande experiência técnica e profissional que me acrescentaram.

Ao meu amigo Igor Otiniano pelo incentivo e sugestões que me ajudaram e muito no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os amigos que sempre torceram por mim.

Aos funcionários da UFRJ, em especial à Luzia e à Eunice pela atenção sempre dada aos alunos.

RESUMO

SOUZA, Carlos Eduardo Lobo de. **Comparação entre Resultados Obtidos em Modelos Completos e Simplificados na Análise Sísmica de uma Estrutura da Indústria Nuclear**. Rio de Janeiro. 2015. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2015.

As estruturas da indústria nuclear devem obedecer a requisitos severos de segurança e devem ser verificadas quanto a solicitações sísmicas. Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre solicitações, deslocamentos e frequências obtidos em um modelo simplificado em elementos de barra com relação aos mesmos resultados obtidos em um modelo computacional completo desenvolvido em elementos finitos, para a análise sísmica de uma estrutura da indústria nuclear. Serão aplicados nos dois modelos os métodos de análise espectral e integração no domínio do tempo. Para a realização deste estudo, é necessária a definição de alguns parâmetros, tais como: critérios de desenvolvimento dos modelos matemáticos e das cargas sísmicas de projeto, consideração dos efeitos de interação solo-estrutura e da amplificação sísmica no solo e definição dos coeficientes de rigidez e de amortecimento do solo. Os resultados obtidos são apresentados por meio de tabelas e figuras, levando a algumas importantes conclusões.

Palavras-chave: análise sísmica; análise dinâmica; método dos elementos finitos.

ABSTRACT

SOUZA, Carlos Eduardo Lobo de. **Comparative Study between Results Obtained with Complete and Simplified Models in the Seismic Analysis of a Structure of the Nuclear Industry**. Rio de Janeiro. 2015. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2015.

The structures of the nuclear industry shall obey to severe safety requirements and shall be verified against seismic actions. This dissertation presents a comparative study between forces, displacements and frequencies obtained with a simplified beam model with relation to the same results obtained with a complete computational model developed in finite elements, for the seismic analysis of a structure of the nuclear industry. The methods of spectral analysis and integration in the time domain are applied in both models. For performing this study, the definition of some parameters is necessary, such as: criteria for developing the mathematical models and design seismic actions, consideration of the soil-structure interaction and of the seismic soil amplification and definition of the soil stiffness and damping coefficients. Obtained results are presented through tables and figures, leading to some important conclusions.

Keywords: seismic analysis, dynamic analysis, finite elements method.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA	5
3. MODELO SIMPLIFICADO	7
3.1. Geometria do Modelo Simplificado	7
3.2. Cargas Sísmicas.....	9
3.3. Métodos de Análise	12
3.4. Amplificação Dinâmica no Solo	18
3.5. Coeficientes de Rigidez e Amortecimento do Solo.....	20
3.5.1. Determinação da Rigidez na Direção Horizontal X	21
3.5.2. Determinação da Rigidez na Direção Horizontal Y	22
3.5.3. Determinação da Rigidez na Direção Vertical Z.....	22
3.5.4. Determinação da Rigidez Rotacional em Torno do Eixo X	23
3.5.5. Determinação da Rigidez Rotacional em Torno do Eixo Y	23
3.5.6. Determinação da Rigidez Rotacional em Torno do Eixo Z.....	23
3.5.7. Determinação dos Coeficientes de Amortecimento	24
3.6. Determinação das Características Geométricas	25
3.7. Determinação das Massas	27
4. RESULTADOS OBTIDOS COM O MODELO SIMPLIFICADO	28
5. MODELO COMPLETO.....	43
5.1. Geometria	44
5.2. Cargas Sísmicas.....	51
5.2.1. Espectro de Projeto.....	51
5.2.2. Time History.....	51
5.3. Coeficientes de Rigidez do Solo	51
5.4. Amplificação Dinâmica no Solo	52
5.5. Processo para a Obtenção das Solicitações	52
6. RESULTADOS OBTIDOS NO MODELO COMPLETO.....	57
7. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NOS MODELOS SIMPLIFICADO E COMPLETO	72
7.1. Resumo dos resultados	72
7.2. Análise dos resultados	81
8. CONCLUSÕES	85
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 – Usina Nuclear de Angra dos Reis, Unidades 1 e 2.	1
Figura 1-2 – Centro Experimental Aramar (CEA).	2
Figura 2-1 – Esquema da estrutura e sistema de eixos coordenados.	6
Figura 3-1 – Esquema de transição dos nós do modelo estrutural.	7
Figura 3-2 – Vista lateral do modelo – (Unidade: m).	8
Figura 3-3 – Locação em planta dos nós do modelo – (Unidade: m).	9
Figura 3-4 – Mapa sísmico brasileiro (Fig. 1 da NBR 15421).	11
Figura 3-5 – Curva envoltória para terremotos de projeto.	13
Figura 3-6 – Espectro de projeto – SSE Horizontal – $\varepsilon = 7\%$	14
Figura 3-7 – Espectro de projeto – SSE Vertical – $\varepsilon = 7\%$	15
Figura 3-8 – Terremoto Horizontal 1 – acelerograma.	15
Figura 3-9 – Terremoto Horizontal 1 – espectro de resposta.	16
Figura 3-10 – Terremoto Horizontal 2 – acelerograma.	16
Figura 3-11 – Terremoto Horizontal 2 – espectro.	17
Figura 3-12 – Terremoto Vertical – acelerograma.	17
Figura 3-13 – Terremoto Vertical – espectro.	18
Figura 3-14 – Perfil para o estudo de amplificação no solo.	18
Figura 3-15 – Espectros nas camadas 1 e 2.	19
Figura 3-16 – Sistema local de eixos.	26
Figura 4-1 – Diagrama das forças axiais – unidade: kN.	28
Figura 4-2 – Diagrama das forças cortantes na direção X – unidade: kN.	29
Figura 4-3 – Diagrama das forças cortantes na direção Y – unidade: kN.	30
Figura 4-4 – Diagrama de momentos de torção na direção Z – unidade: kNm.	31
Figura 4-5 – Diagrama de momentos fletores na direção X – unidade: kNm.	32
Figura 4-6 – Diagrama de momentos fletores na direção Y – unidade: kNm.	33
Figura 4-7 – Diagrama de deslocamentos na direção X – unidade: mm.	35
Figura 4-8 – Diagrama de deslocamentos na direção Y – unidade: mm.	36
Figura 4-9 – Diagrama de deslocamentos na direção Z – unidade: mm.	37
Figura 4-10 – Modelo simplificado – estrutura indeformada.	40
Figura 4-11 – Modelo simplificado – primeiro modo de vibração.	41
Figura 4-12 – Modelo simplificado – segundo modo de vibração.	42

Figura 5-1 – Modelo tridimensional.....	44
Figura 5-2 – Laje de fundação.....	45
Figura 5-3 – 1° Piso – Elevação +6,00 m.....	46
Figura 5-4 – 2° piso – Elevação +8,00 m.....	47
Figura 5-5 – 3° piso – Elevação +10,00 m.....	48
Figura 5-6 – 4° piso – Elevação +23,50 m.....	49
Figura 5-7 – Cobertura – Elevação +29,50 m.....	50
Figura 5-8 – Aplicação dos “Section Cuts”.....	53
Figura 5-9 – Aplicação do “Section Cut” – Elevação +0,00 m.....	54
Figura 5-10 – Aplicação do “Section Cut” – Elevação +6,00 m.....	54
Figura 5-11 – Aplicação do “Section Cut” – Elevação +8,00 m.....	55
Figura 5-12 – Aplicação do “Section Cut” – Elevação +10,00 m.....	55
Figura 5-13 – Aplicação do “Section Cut” – Elevação +23,50 m.....	56
Figura 6-1 – Diagrama de esforços axiais – unidade: kN.....	57
Figura 6-2 – Diagrama de esforços cortantes na direção X – unidade: kN.....	58
Figura 6-3 – Diagrama de esforços cortantes na direção Y – unidade: kN.....	59
Figura 6-4 – Diagrama de momentos de torção na direção Z – unidade: kNm.....	60
Figura 6-5 – Diagrama de momentos fletores na direção X – unidade: kNm.....	61
Figura 6-6 – Diagrama de momentos fletores na direção Y – unidade: kNm.....	62
Figura 6-7 – Diagrama de deslocamentos na direção X – unidade: mm.....	64
Figura 6-8 – Diagrama de deslocamentos na direção Y – unidade: mm.....	65
Figura 6-9 – Diagrama de deslocamentos na direção Z – unidade: mm.....	66
Figura 6-10 – Modelo completo – estrutura indeformada.....	69
Figura 6-11 – Modelo completo – primeiro modo de vibração.....	70
Figura 6-12 – Modelo completo – segundo modo de vibração.....	71
Figura 7-1 – Relação MS/MC – Força Axial.....	73
Figura 7-2 – Relação MS/MC – Força Cortante X.....	74
Figura 7-3 – Relação MS/MC – Força Cortante Y.....	75
Figura 7-4 – Relação MS/MC – Momento fletor X.....	76
Figura 7-5 – Relação MS/MC – Momento fletor Y.....	77
Figura 7-6 – Relação MS/MC – Momento de Torção.....	78
Figura 7-7 – Relação MS/MC – Deslocamentos na direção X.....	79
Figura 7-8 – Relação MS/MC – Deslocamentos na direção Y.....	80
Figura 7-9 – Relação MS/MC – Deslocamentos na direção Z.....	81

Figura 7-10 – Modelo completo – sétimo modo de vibração.....	83
Figura 7-11 – Modelo completo – deslocamentos máximos – método espectral.....	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3-1 – Espectros de resposta de projeto	12
Tabela 3-2 – Propriedades condensadas para o modelo	27
Tabela 3-3 – Massas translacionais e rotacionais	27
Tabela 4-1 – Solicitações obtidas com o modelo de barras – análise espectral	34
Tabela 4-2 – Solicitações obtidas com o modelo de barras – análise no histórico do tempo	34
Tabela 4-3 – Deslocamentos máximos – modelo de barras – análise espectral	38
Tabela 4-4 – Deslocamentos máximos – modelo de barras – análise no histórico do tempo	38
Tabela 4-5 – Frequências para o modelo simplificado	39
Tabela 4-6 – Fatores de participação de massa	39
Tabela 6-1 – Solicitações obtidas por meio do modelo completo – análise espectral....	63
Tabela 6-2 – Solicitações obtidas por meio do modelo completo – análise no histórico do tempo	63
Tabela 6-3 – Deslocamentos máximos – modelo completo – análise espectral.....	67
Tabela 6-4 – Deslocamentos máximos – modelo completo – análise no histórico do tempo	67
Tabela 6-5 – Frequências para o modelo completo	68
Tabela 6-6 – Fatores de participação de massa para o modelo completo.....	68
Tabela 7-1 – Forças axiais para os modelos simplificado e completo – Unidade: kN... 72	
Tabela 7-2 – Forças cortantes X para os modelos simplificado e completo – Unidade: kN.	73
Tabela 7-3 – Forças cortantes Y para os modelos simplificado e completo – Unidade: kN.	74
Tabela 7-4 – Momentos fletores X para os modelos simplificado e completo – Unidade: kNm	75
Tabela 7-5 – Momentos fletores Y para os modelos simplificado e completo – Unidade: kNm	76
Tabela 7-6 – Momentos de torção para os modelos simplificado e completo – Unidade: kNm	77
Tabela 7-7 – Deslocamentos X nos modelos simplificado e completo – Unidade: mm 78	
Tabela 7-8 – Deslocamentos Y nos modelos simplificado e completo – Unidade: mm 79	

Tabela 7-9 – Deslocamentos Z nos modelos simplificado e completo – Unidade: mm 80

1. INTRODUÇÃO

As estruturas da indústria nuclear devem obedecer a severos requisitos de segurança, tendo em vista as graves consequências que poderiam advir de um acidente com liberação de material radioativo para o meio ambiente. Sendo assim, essas estruturas devem ser verificadas relativamente a diversos carregamentos excepcionais, não considerados no projeto de estruturas usuais, tais como:

- efeitos de um terremoto que possa ocorrer nas vizinhanças da instalação;
- efeitos da explosão acidental de um veículo transportando uma carga postulada de explosivo (TNT) no ponto mais desfavorável de uma estrada existente fora dos limites da instalação;
- efeitos de acidentes postulados internos, como ruptura de tubulações de alta pressão;
- efeitos causados pela ocorrência de um tornado que possa ocorrer nas vizinhanças da instalação.

O foco principal deste trabalho é o estudo de modelos para a análise sísmica de estruturas da indústria nuclear. Aspectos relativos à verificação da segurança dessas estruturas quanto aos efeitos do tornado foram já apresentados como dissertação no Programa de Projeto de Estruturas da UFRJ por VALENTE (2012).

Os estudos de Engenharia Sísmica no Brasil se iniciaram da década de 1970, com o projeto da primeira usina nuclear brasileira, a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, em Angra dos Reis. Essa Usina pertence ao Governo Federal, administrada pela Eletrobrás Eletronuclear, que opera as Unidades 1 e 2 da Usina, ver Figura 1-1.



Figura 1-1 – Usina Nuclear de Angra dos Reis, Unidades 1 e 2.

O outro projeto importante da indústria nuclear em desenvolvimento no Brasil é a implantação do Centro Experimental Aramar (CEA) pelo Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP), no município paulista de Iperó. Nesse Centro é desenvolvido, desde a década de 1980, o Programa Nuclear da Marinha do Brasil, que visa à capacitação no domínio da tecnologia de instalações nucleares aplicáveis à propulsão naval. O Laboratório de Geração de Energia Núcleo-Elétrica (LABGENE) será uma instalação experimental em terra de uma planta de propulsão nuclear, similar a uma instalação nuclear de potência em escala mais reduzida.



Figura 1-2 – Centro Experimental Aramar (CEA).

O projeto desses dois empreendimentos exigiu a verificação da segurança das estruturas considerando a possibilidade da ocorrência de um terremoto, dentro das condições sismológicas dos respectivos locais de implantação.

A característica básica dos edifícios da indústria nuclear é de estruturas pesadas, extremamente rígidas, constituídas de lajes e paredes muito espessas e com grande densidade de armadura, de forma a terem capacidade de resistir aos carregamentos excepcionais postulados.

À época do desenvolvimento dos dois empreendimentos acima descritos, o estágio de avanço do processamento de modelos estruturais para solicitações dinâmicas obrigava à utilização de modelos estruturais muito simplificados. Observa-se que já na época os requisitos de segurança estabelecidos exigiam a consideração das ações sísmicas por meio de análises dinâmicas completas.

Uma descrição e a discussão desses modelos simplificados podem ser encontradas em WOLF (1985). A descrição completa da metodologia empregada em análises

sísmicas aplicando-se os modelos simplificados pode ser encontrada em SANTOS (1992).

O modelo típico nesse tipo de análise é o chamado “stick model”, composto por elementos de pórtico espacial, em que todas as características de massa e de rigidez entre dois pavimentos de uma edificação são condensados em um único elemento de pórtico, pressupondo, portanto, um comportamento de corpo rígido entre os pisos da estrutura.

O avanço da capacidade de resolução de grandes modelos estruturais abriu a possibilidade da análise sísmica das estruturas da indústria nuclear por meio de modelos muito detalhados em elementos finitos, usando-se análises dinâmicas completas.

A utilização desses grandes modelos coloca duas novas questões básicas:

– qual a segurança assegurada pelas antigas análises em modelos simplificados?

Observar que praticamente a totalidade das instalações nucleares do mundo foi analisada com modelos simplificados.

– como interpretar e aplicar corretamente a enorme quantidade de resultados gerados em uma análise dinâmica completa com grandes modelos em elementos finitos?

Visando contribuir com o entendimento desses dois problemas, este trabalho apresenta um estudo comparativo entre resultados de análises realizadas com um modelo simplificado em elementos de barra e com um modelo computacional completo desenvolvido em elementos finitos. São comparadas solicitações, deslocamentos e frequências obtidas nas análises com os dois modelos.

Adicionalmente são também comparados resultados obtidos com os dois modelos, pelos métodos de análise espectral, usando-se um espectro de projeto pré-definido e por integração no domínio do tempo, usando-se acelerogramas sísmicos artificiais compatíveis com o mesmo espectro de projeto.

Para a realização deste estudo foi necessária a definição de diversos parâmetros, discutidos ao longo do trabalho como:

- critérios de desenvolvimento dos modelos matemáticos;
- critérios de definição das cargas sísmicas de projeto;
- consideração dos efeitos de interação solo-estrutura;
- análise da amplificação sísmica no solo;
- definição dos coeficientes de rigidez e de amortecimento do solo.

São também discutidos os critérios de projeto civil relativos à segurança nuclear. Para as análises foi escolhida uma estrutura típica de uma instalação da indústria nuclear, um Prédio de Armazenamento de Combustível (idealizado).

No Capítulo 2 foi descrita a geometria da estrutura a ser analisada, com suas dimensões e elevações, sua finalidade e o seu funcionamento estrutural no que diz respeito à transmissão das solicitações sísmicas até a fundação.

No Capítulo 3 é apresentada a geometria do modelo simplificado, as cargas sísmicas, os métodos de análise, o estudo da amplificação sísmica no solo, a determinação dos coeficientes de rigidez e de amortecimento do solo, a determinação das características geométricas e a determinação das massas translacionais e rotacionais em cada elevação do modelo simplificado.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos no modelo simplificado, tanto para a análise espectral quanto para a análise da integração no domínio do tempo. São apresentados, como resultados, forças axiais, forças cortantes, momentos fletores, momentos de torção e os deslocamentos avaliados ao longo da altura da estrutura, assim como as frequências para os primeiros modos de vibração.

No Capítulo 5, é apresentado o modelo completo da estrutura, incluindo visualizações 3D e em planta do modelo estrutural. Será descrito o método empregado para obtenção de resultados, o dos “Section Cuts”, utilizados para totalizar forças e momentos ao longo de uma seção pré-definida.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos com o modelo completo, tanto para a análise espectral quanto para a análise da integração no domínio do tempo. São apresentados, como resultados, forças axiais, forças cortantes, momentos fletores, momentos de torção e os deslocamentos ao longo da altura da estrutura, assim como as frequências para os primeiros modos de vibração.

No capítulo 7 é realizada a comparação entre os resultados obtidos nos modelos simplificado e completo, tanto para a análise espectral quanto para a integração no domínio do tempo, bem como as justificativas para possíveis discrepâncias entre as respostas obtidas.

No capítulo 8 serão apresentadas as conclusões finais deste trabalho.

2. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

O edifício a ser analisado é um Prédio de Armazenamento de Combustíveis idealizado, que não corresponde a uma estrutura real, mas que tem características geométricas e mecânicas escolhidas de forma a que os resultados das análises possam ser representativos daqueles de estruturas reais.

Esse prédio, em uma instalação nuclear real, tem como finalidade principal o armazenamento dos elementos combustíveis novos e irradiados, assim como a realização, em seu interior, das operações de recebimento, inspeção, transferência, manipulação, armazenamento provisório e despacho desses elementos combustíveis. A estrutura analisada tem dimensões idealizadas em planta da ordem de 16 m x 30 m e de cerca de 30 m de altura.

O edifício apresenta como pisos principais o Térreo, 1º, 2º, 3º, 4º Pisos e Cobertura, correspondentes, respectivamente, às elevações +1,00, +5,00, +7,50, +10,00, +23,50 e +28,30, ver Figura 2.1.

As cargas sísmicas horizontais deverão ser resistidas por um sistema estrutural composto por paredes verticais e pelas lajes de piso. As paredes têm função estrutural de resistir as forças horizontais aplicadas pelas lajes e transmiti-las ao solo por meio da laje de fundação. São consideradas como pertencentes ao sistema de resistência às solicitações sísmicas apenas as paredes que nascem diretamente na laje de fundação. As lajes têm função estrutural de transmitir as cargas horizontais dos pisos para as paredes e, além disso, conectar as paredes em cada elevação, conferindo maior rigidez ao sistema estrutural. O conjunto de lajes e paredes confere ao prédio a grande rigidez e resistência típicas das estruturas da indústria nuclear (estruturas “box-type”).

Entre a laje de fundação e o solo é disposta uma membrana de impermeabilização. Essa tem como finalidade impedir que qualquer líquido contaminado com material radioativo possa atravessar a espessura da laje e atingir o meio ambiente. Essa membrana mecanicamente faz com que o conjunto estrutura de fundação-solo fique mais flexível, com conseqüente redução nas frequências próprias.

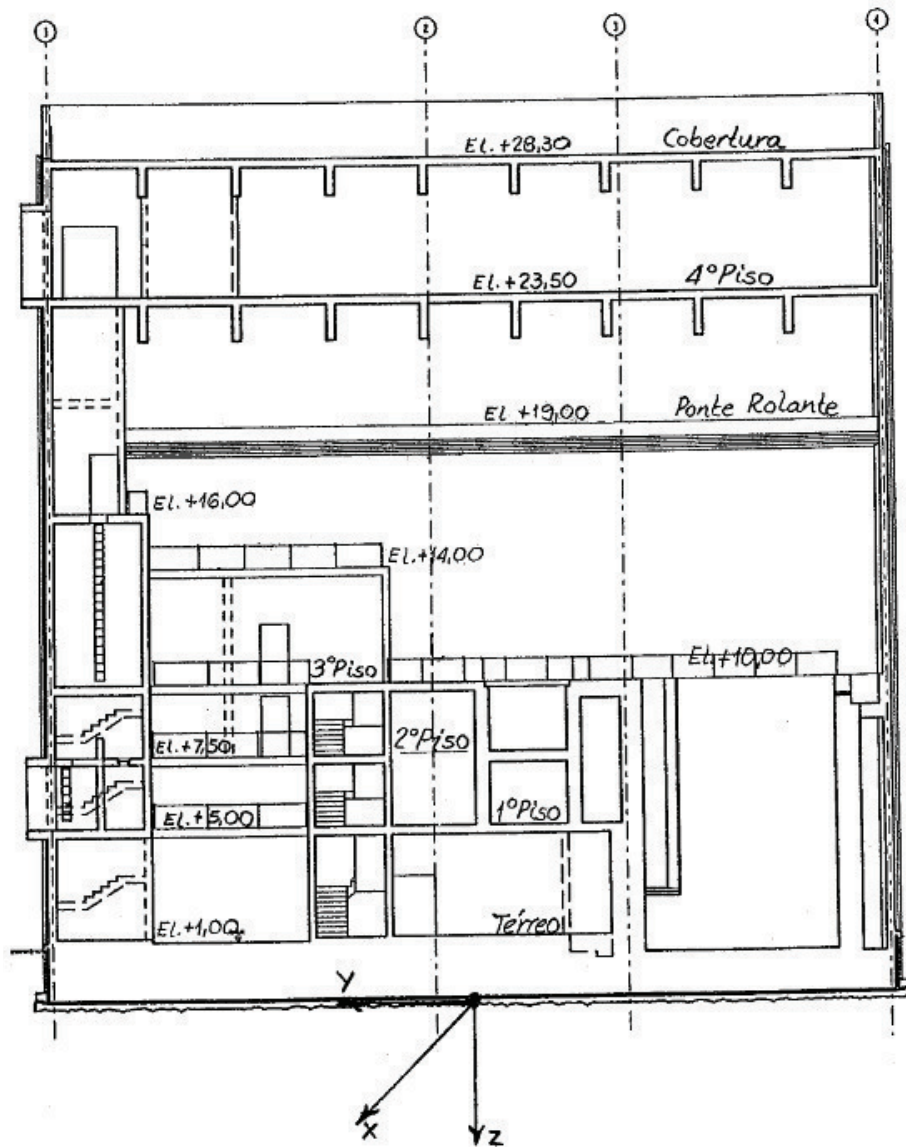


Figura 2-1 – Esquema da estrutura e sistema de eixos coordenados.

3. MODELO SIMPLIFICADO

3.1. Geometria do Modelo Simplificado

Para a análise sísmica do Prédio será desenvolvido inicialmente um modelo de barras (pórtico espacial) com massas discretizadas em nós (“lumped mass beam model”). Nesse modelo as características de rigidez correspondentes ao conjunto de paredes existentes entre dois níveis consecutivos são condensadas em uma única haste. São consideradas as excentricidades entre centros de rigidez de elevações distintas. As massas de cada piso são condensadas em um único nó.

A Figura 3-1 apresenta o esquema de transição dos nós do modelo estrutural simplificado entre elevações consecutivas. Note-se que em cada uma das elevações é formado, basicamente, um conjunto de três nós, com posições distintas no plano, ligados rigidamente entre si. Esses nós são: centro de massa do piso (CM) e centros de rigidez dos conjuntos de paredes acima e abaixo do piso em questão (CR_s e CR_i).

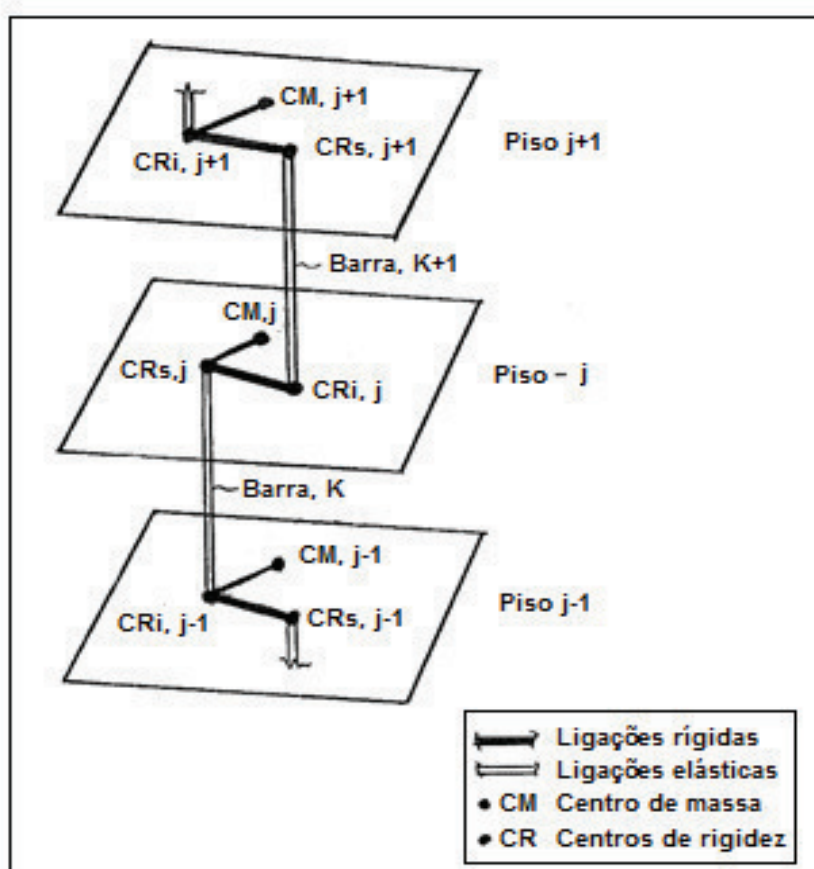


Figura 3-1 – Esquema de transição dos nós do modelo estrutural.

O sistema de eixos coordenados adotado é representado na Figura 3-2 e na Figura 3-3, sendo a origem do sistema de eixos coordenados posicionada em planta no centro geométrico da laje de fundação e em elevação na interface fundação-rocha.

Uma vista lateral do modelo é apresentada na Figura 3-2, onde são definidas as elevações dos nós.

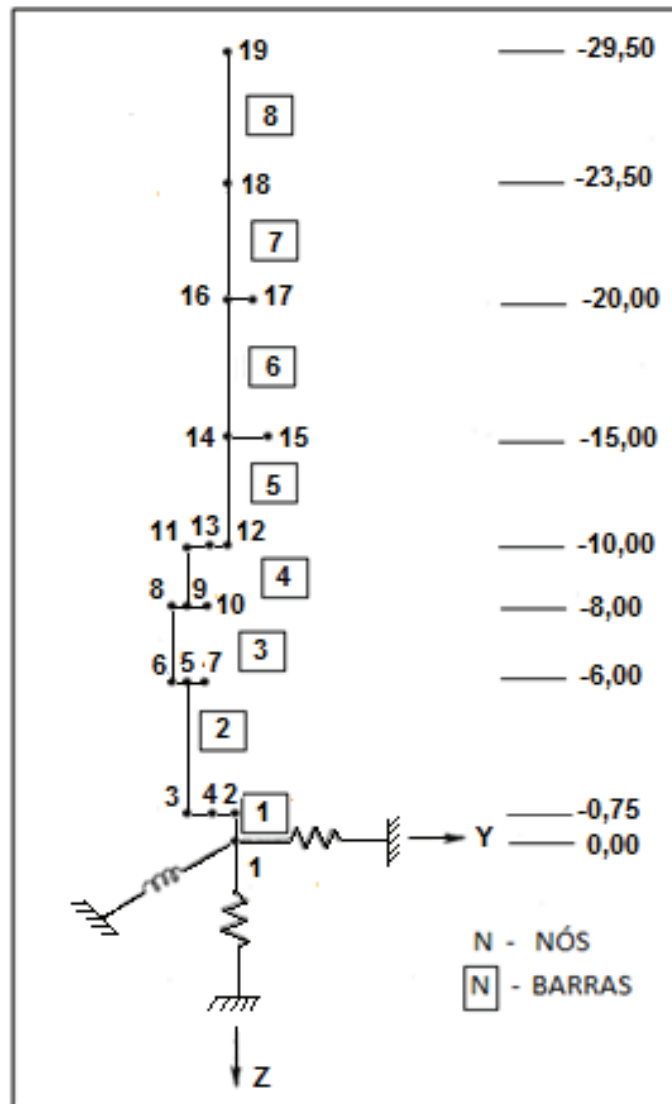


Figura 3-2 – Vista lateral do modelo – (Unidade: m).

A Figura 3-3 apresenta a locação em planta dos nós do modelo de barras, em cada elevação.

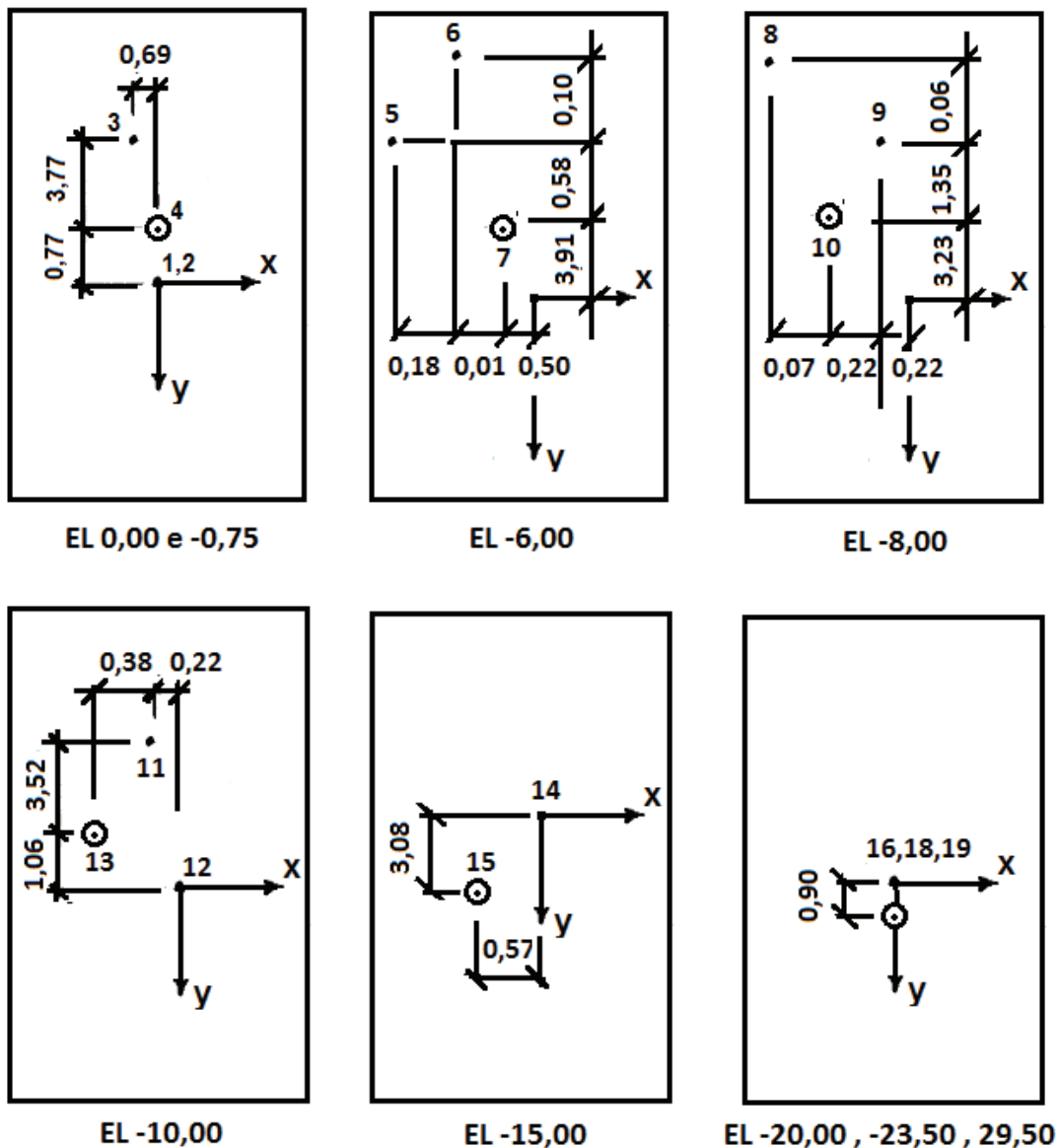


Figura 3-3 – Locação em planta dos nós do modelo – (Unidade: m).

3.2. Cargas Sísmicas

Apesar da baixa sismicidade do território brasileiro e em especial da Região Sudeste, os requisitos de segurança da indústria nuclear exigem a aplicação de valores mínimos para as solicitações sísmicas de projeto.

A primeira norma sísmica brasileira foi promulgada somente em 2006, a NBR 15421, Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos (ABNT, 2006). Esta norma é baseada na norma americana ASCE/SEI 7-10: “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures” (ASCE, 2010).

O conservadorismo da NBR 15421 foi comprovado por meio de detalhados estudos, como os de ARAI (2013) e SANTOS *et al.* (2012 e 2013). A NBR 15421 já começa a ser reconhecida e aceita pelo órgão regulador da indústria nuclear no Brasil, a CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear).

Considerando que a NBR 15421 é específica para o projeto de edificações convencionais, a CNEN tem exigido que as verificações de segurança sejam realizadas, ou por normas europeias (no caso das Unidades 2 e 3 da Usina Nuclear de Angra), ou por normas americanas (no caso do LABGENE da Marinha). Os comentários a seguir dizem respeito às normas americanas.

Nos Estados Unidos a indústria nuclear é regida por lei federal, o “Code of Federal Regulations, Title 10, Energy, Part 50” e “Idem, Part 100” (CFR, 2009 e 1997).

De acordo com essa legislação é definido um terremoto de projeto, denominado de Sismo de Desligamento Seguro da Instalação (“SSE – Safe Shutdown Earthquake”), com aceleração horizontal mínima para o período estrutural igual a zero (“ZPA – zero period acceleration”) de 0,1g (sendo g a aceleração da gravidade).

A agência reguladora da indústria nuclear americana é a USNRC – “United States Nuclear Regulatory Commission”. Solicitações sísmicas a serem consideradas no projeto são definidas em seu “Regulatory Guide 1.60” (USNRC, 1973). As solicitações sísmicas a serem consideradas são definidas nesse documento por meio de espectros de projeto e critérios para a geração e aceitação de acelerogramas artificialmente gerados.

A Tabela 3-1 define os espectros de projeto considerados nesta dissertação, de acordo com as Tabelas 6.3 e 6.4 do RG 1.60. Estão calibrados para um ZPA = 0,1g que é compatível com a sismicidade da Região Sudeste do Brasil, para terremoto SSE (Unidade: g).

Observar que essa definição é bastante conservadora, como pode ser comprovado observando-se a Figura 3.4, que reproduz a Figura 1 da NBR 15421. Como pode ser visto nesse mapa, a aceleração básica de projeto na Região Sudeste do Brasil é inferior a 0,025g para o período de recorrência normativo de 475 anos.

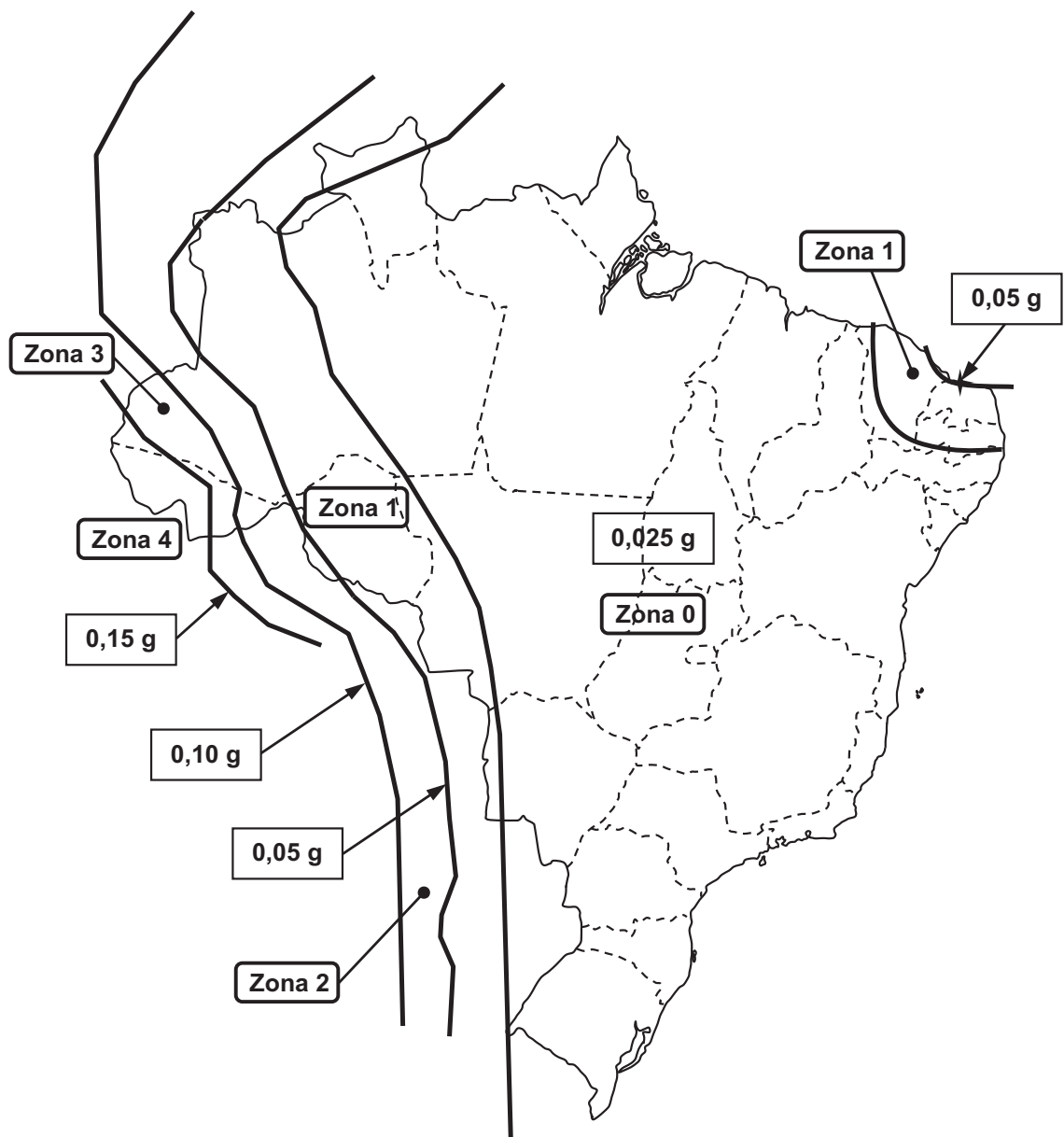


Figura 3-4 – Mapa sísmico brasileiro (Fig. 1 da NBR 15421).

O amortecimento estrutural básico considerado neste trabalho é de 7%, que corresponde ao valor a ser considerado em estruturas de concreto em condições de terremoto SSE.

Tabela 3-1 – Espectros de resposta de projeto

Direção		SSE HORIZONTAL				SSE VERTICAL			
Frequência		0,25 Hz	2,5 Hz	9 Hz	33 Hz	0,25 Hz	2,5 Hz	9 Hz	33 Hz
Amortecimento (%)	0,5	0,072	0,595	0,496	0,1	0,048	0,567	0,496	0,1
	2	0,056	0,425	0,354	0,1	0,038	0,405	0,354	0,1
	5	0,046	0,313	0,261	0,1	0,031	0,298	0,261	0,1
	7	0,042	0,272	0,227	0,1	0,028	0,259	0,227	0,1
	10	0,038	0,228	0,19	0,1	0,025	0,217	0,19	0,1

No prédio analisado, sendo o foco as comparações relativas à modelagem da superestrutura, será considerado que o subsolo é bastante rígido e resistente, para que problemas de interação solo-estrutura não intervenham nas análises. Será então suposta uma situação idealizada, em que a fundação é assente sobre uma camada de rocha medianamente alterada em região de transição para rocha pouco alterada a sã.

Considerando-se essa hipótese as seguintes simplificações serão permitidas na análise sísmica:

- o pequeno enterramento da estrutura e a grande rigidez da rocha, permitirão que os efeitos de modificação dos movimentos sísmicos devidos à interação solo-estrutura sejam desprezados. Dessa forma se considerará que a presença da estrutura não alterará de forma significativa os movimentos que o solo teria sem a presença da mesma (movimentos de “free-field”);
- pelas mesmas razões, poderão ser desprezados os efeitos de interação com estruturas vizinhas (interação estrutura-solo-estrutura) e os efeitos de enterramento no solo (“soil embedment”);
- como é mostrado no item 3.4 os efeitos de amplificação dinâmica das camadas de rocha são insignificantes, podendo ser desprezados, permitindo a consideração da excitação sísmica diretamente na base da estrutura.

3.3. Métodos de Análise

Para a análise sísmica do Prédio serão aplicados e comparados os resultados dos métodos por espectro de resposta e de histórico no tempo. Os detalhes sobre as

metodologias consideradas nesses dois métodos constam dos livros de Dinâmica das Estruturas, como os de CHOPRA (2011) e de SOUZA LIMA e SANTOS (2008).

Para a análise pelo método espectral são considerados diretamente os espectros definidos na Tabela 3-1.

A análise por integração no domínio do tempo é realizada pelo processo de superposição modal. Neste caso são utilizados terremotos artificiais, compatíveis com os espectros de resposta de projeto. Devem ser empregados na análise dois terremotos horizontais e um vertical, estatisticamente independentes, para aplicação simultânea no modelo.

Esses terremotos são gerados usando-se o programa ARTQUAKE, desenvolvido por RODRIGUES (2012). Os terremotos são ajustados de forma a reproduzirem os espectros de projeto definidos no item 3.2; definem-se as acelerações espectrais correspondentes ao amortecimento de 7% como objetivo no processo iterativo de ajuste. Os terremotos artificiais deverão ter 15 s de duração, considerando-se a curva de envoltória de amplitudes definida na Figura 3-5.

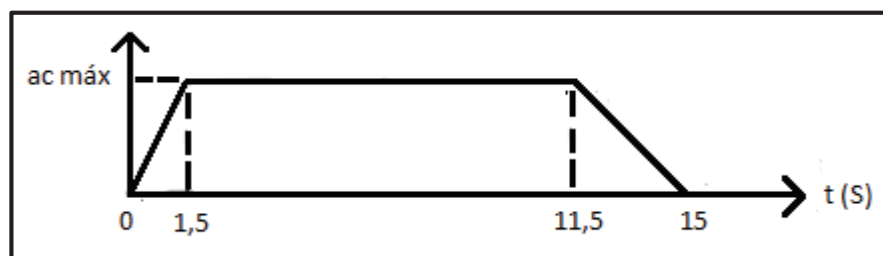


Figura 3-5 – Curva envoltória para terremotos de projeto.

O programa ARTQUAKE emprega na geração de terremotos artificiais a metodologia de LEVY e WILKINSON (1976). A curva aceleração tempo é discretizada em 1500 pontos, correspondendo a um intervalo de tempo de discretização de 0,01 s. A independência estatística entre os diferentes acelerogramas é garantida com a geração aleatória de ângulos de fase para cada uma das componentes de frequência. O programa realiza a correção de “base line” (imposição de deslocamentos e velocidades nulas ao final do acelerograma). O programa corrige os acelerogramas gerados de forma que o critério de aceitação da USNRC é automaticamente atendido: não mais que 5 pontos do

espectro obtido devem cair abaixo do espectro de projeto, e em nenhum desses pontos o valor espectral obtido deve ser menor que 90% do valor respectivo no espectro de projeto.

A Figura 3-6 apresenta o espectro de resposta de projeto para o SSE Horizontal, conforme definido na Tabela 3-1. Observar que entre os pontos desta tabela a interpolação deve ser efetuada em uma escala log-log, o que resulta que no espectro em escala algébrica se apresentam as curvas aparentes nessa figura.

Deve ser observado, o que será importante no subsequente desenvolvimento deste trabalho, que nenhum terremoto gerado artificialmente consegue reproduzir exatamente o espectro de resposta de projeto, o que pode ser verificado nas Figuras 3-9, 3-11 e 3-13. O processo é iterativo e devem ser atendidos de forma conservadora os critérios da USNRC acima explicitados.

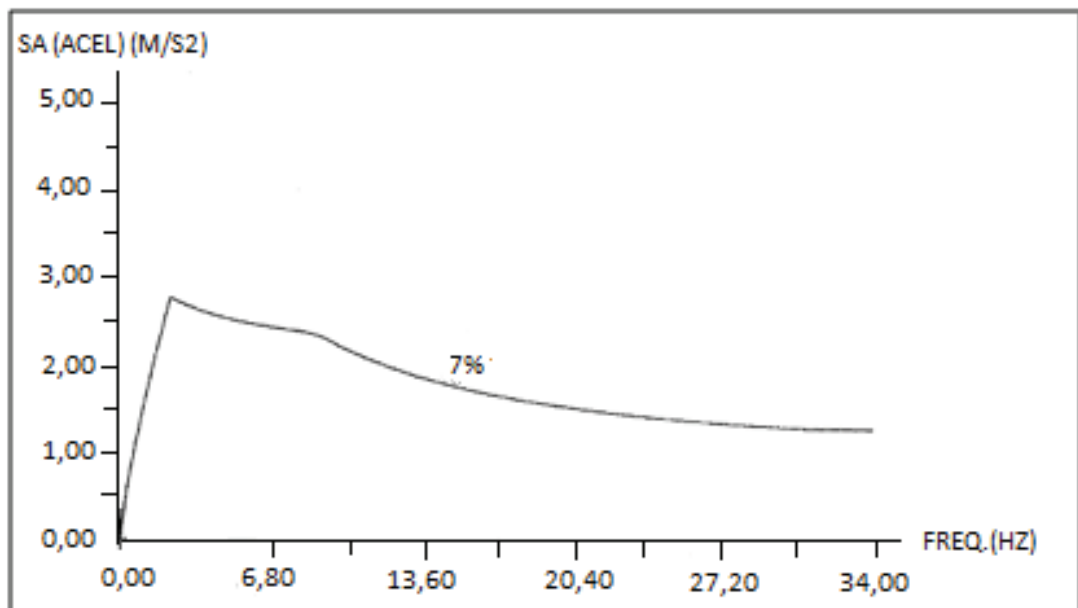


Figura 3-6 – Espectro de projeto – SSE Horizontal – $\varepsilon = 7\%$.

A Figura 3-7 apresenta o espectro de resposta de projeto para o caso de SSE vertical.

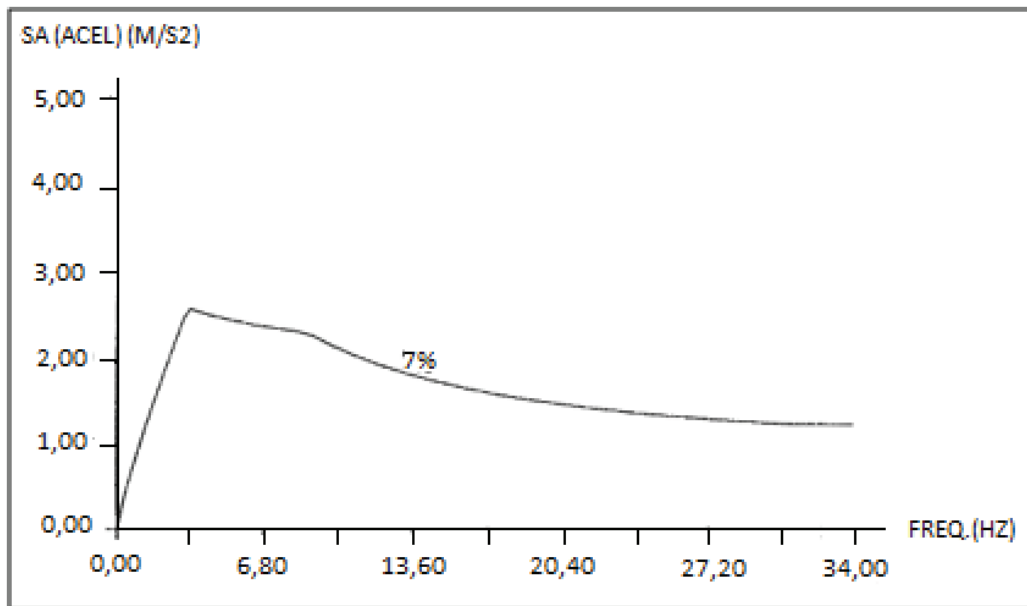


Figura 3-7 – Espectro de projeto – SSE Vertical – $\varepsilon = 7\%$.

A Figura 3-8 apresenta o acelerograma gerado para a direção 1.

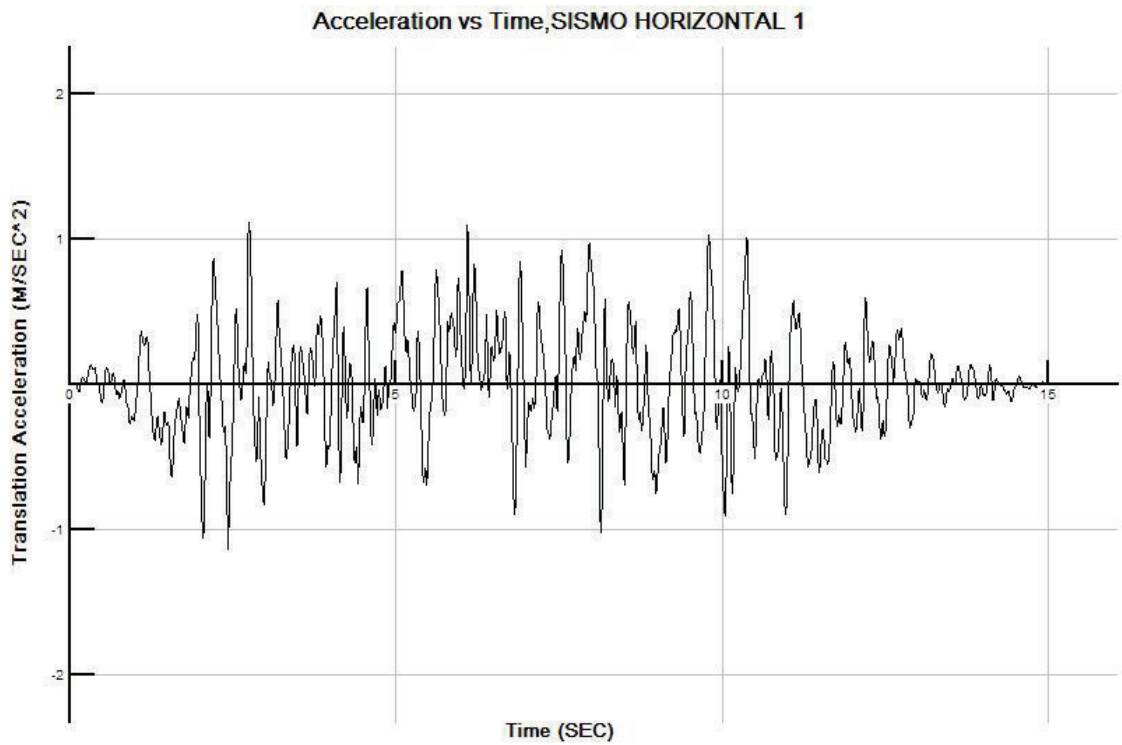


Figura 3-8 – Terremoto Horizontal 1 – acelerograma.

A Figura 3-9 apresenta a comparação entre o espectro de resposta gerado pelo Terremoto Horizontal 1 (ESP.CAL) e o espectro de projeto (ESP. OR).

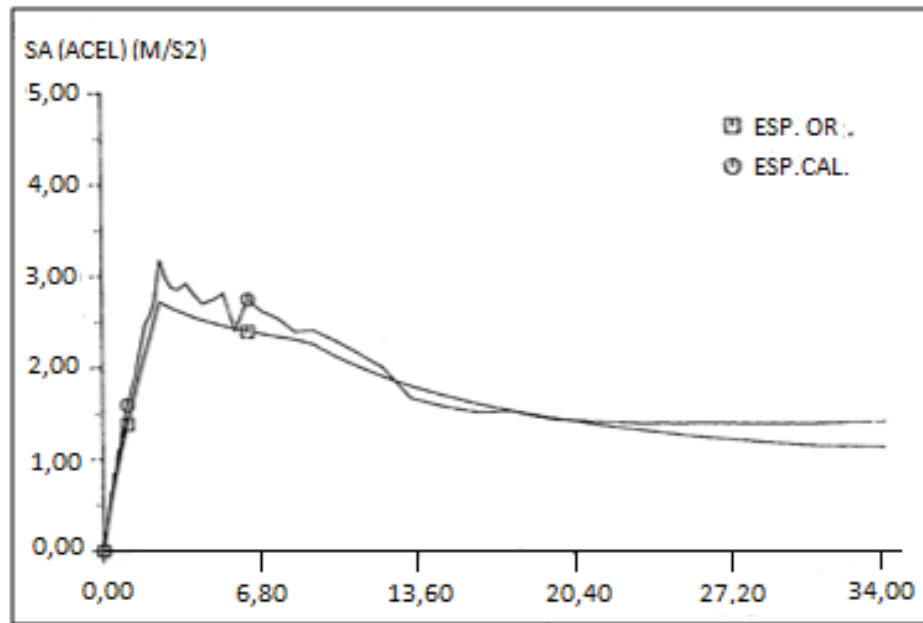


Figura 3-9 – Terremoto Horizontal 1 – espectro de resposta.

A Figura 3-10 apresenta o acelerograma gerado para a direção 2.

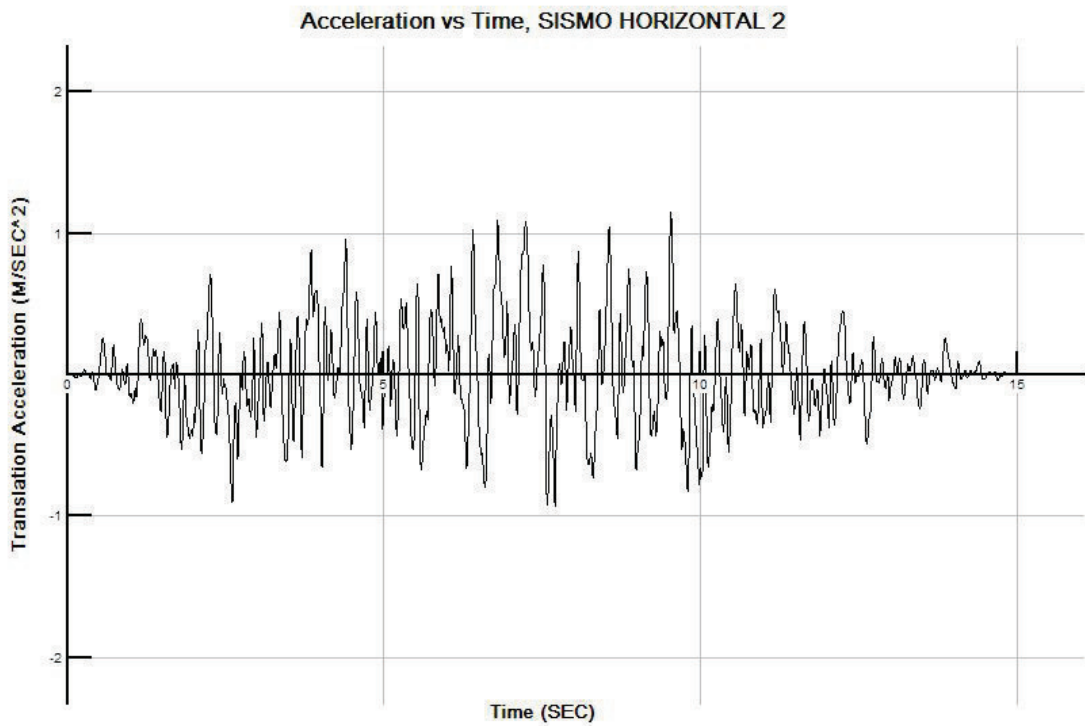


Figura 3-10 – Terremoto Horizontal 2 – acelerograma.

A Figura 3-11 apresenta a comparação entre o espectro de resposta gerado pelo Terremoto Horizontal 2 (ESP.CAL.) e o espectro de projeto (ESP. OR.).

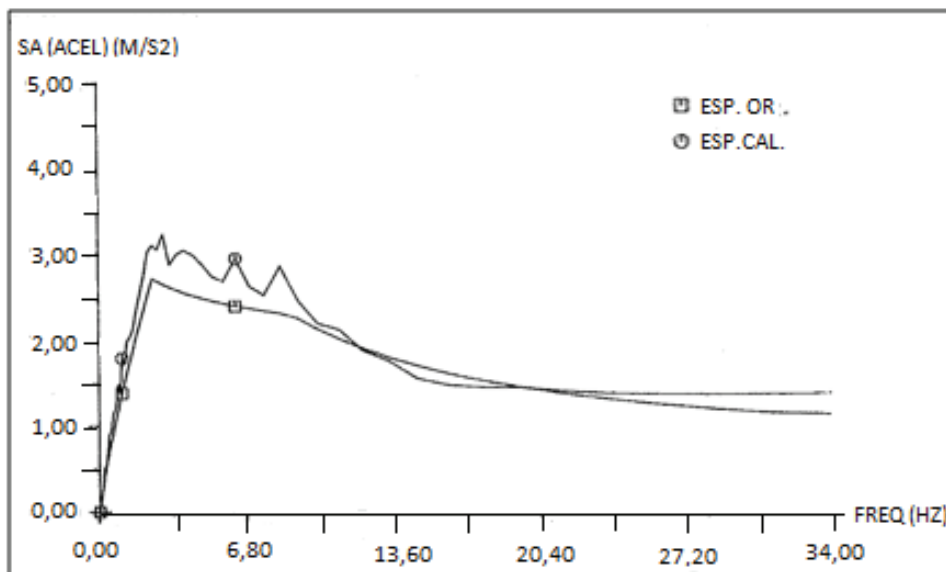


Figura 3-11 – Terremoto Horizontal 2 – espectro.

A Figura 3-12 apresenta o acelerograma gerado para a direção vertical.

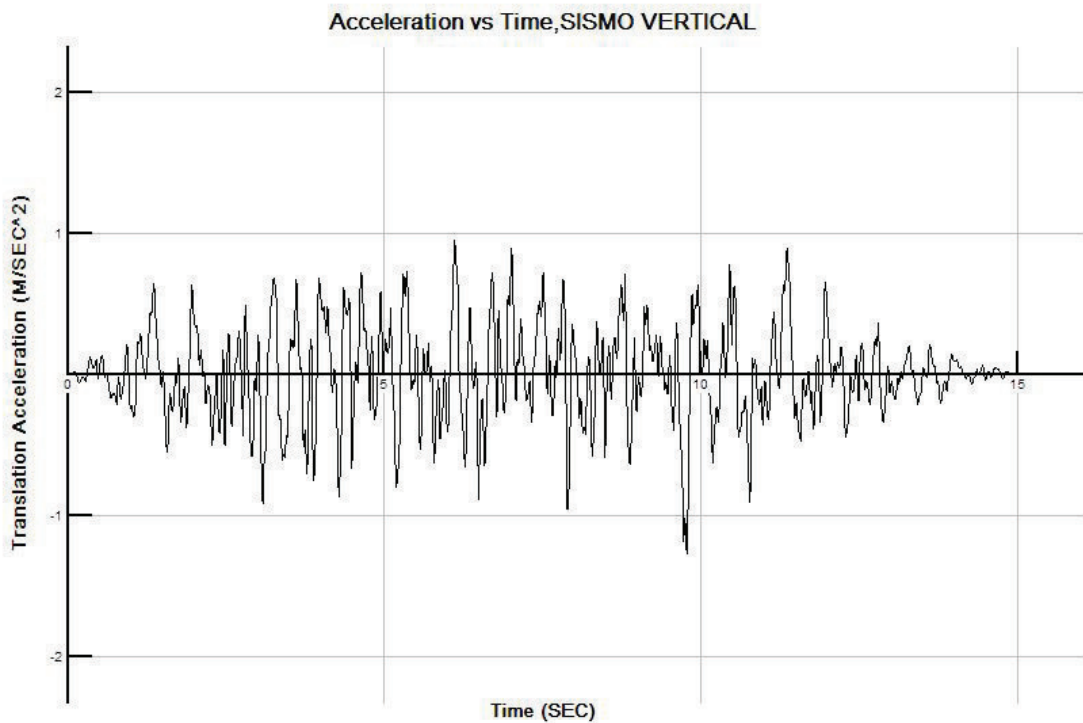


Figura 3-12 – Terremoto Vertical – acelerograma.

A Figura 3-13 apresenta a comparação entre o espectro de resposta gerado pelo Terremoto Vertical e o espectro de projeto (ESP. OR).

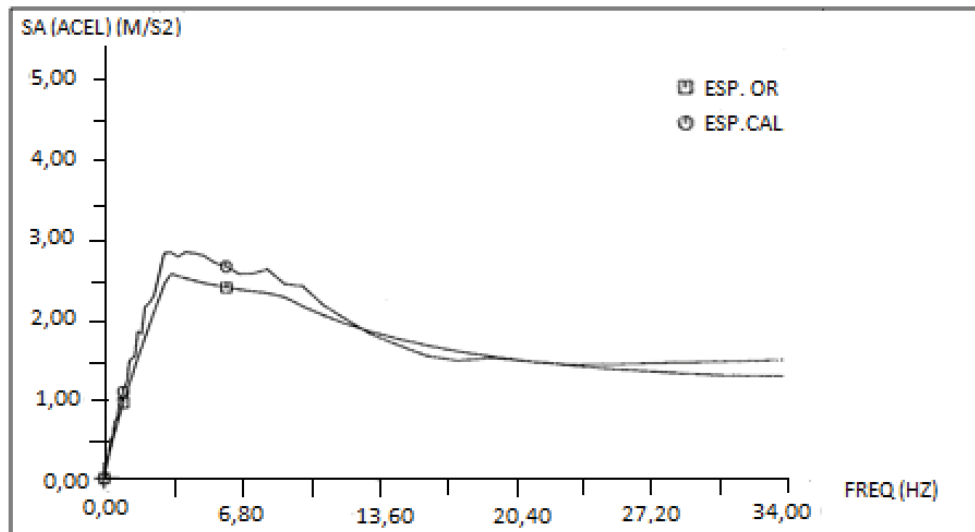


Figura 3-13 – Terremoto Vertical – espectro.

3.4. Amplificação Dinâmica no Solo

Apresenta-se a seguir o estudo da amplificação dinâmica dos movimentos sísmicos. É mostrado que, com os dados de solo considerados no caso deste edifício, essa amplificação é insignificante, podendo ser aplicadas as excitações sísmicas de projeto diretamente à base da estrutura.

Os estudos de amplificação dinâmica consideram a situação ilustrada na Figura 3-14, que corresponde a um perfil de rocha alterada sobrejacente a um perfil de rocha sã.

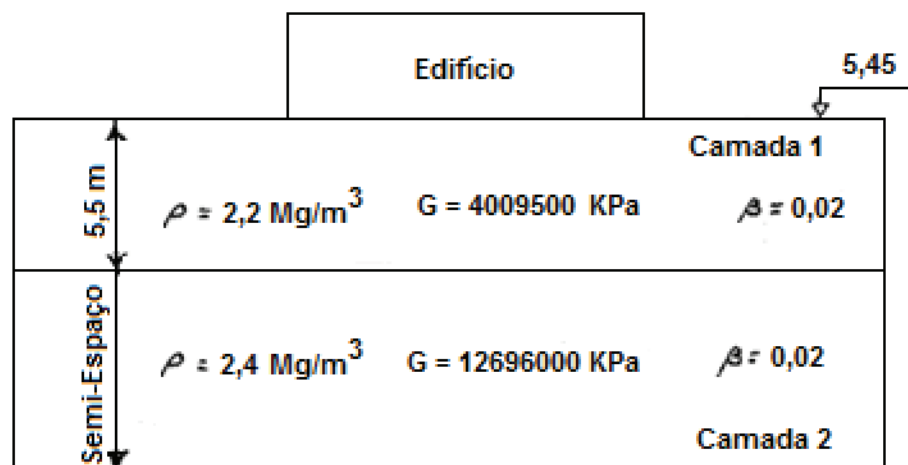


Figura 3-14 – Perfil para o estudo de amplificação no solo.

É estudada a amplificação dinâmica do terremoto SSE horizontal, por meio de uma rodada do programa SHAKE_BR, desenvolvido por CHALRÉO (2012).

Com o SHAKE_BR é determinada a excitação sísmica amplificada do semi-espaço (camada 2) para a camada superficial (camada 1). É utilizado o Terremoto Horizontal 1, compatível com o espectro de projeto, gerado no item 3.3, por meio do programa ARTQUAKE. O programa determina o acelerograma amplificado na superfície do solo, assim como o respectivo espectro de resposta para o amortecimento de 7%.

A Figura 3-15 apresenta a comparação entre os espectros nas camadas 1 e 2.

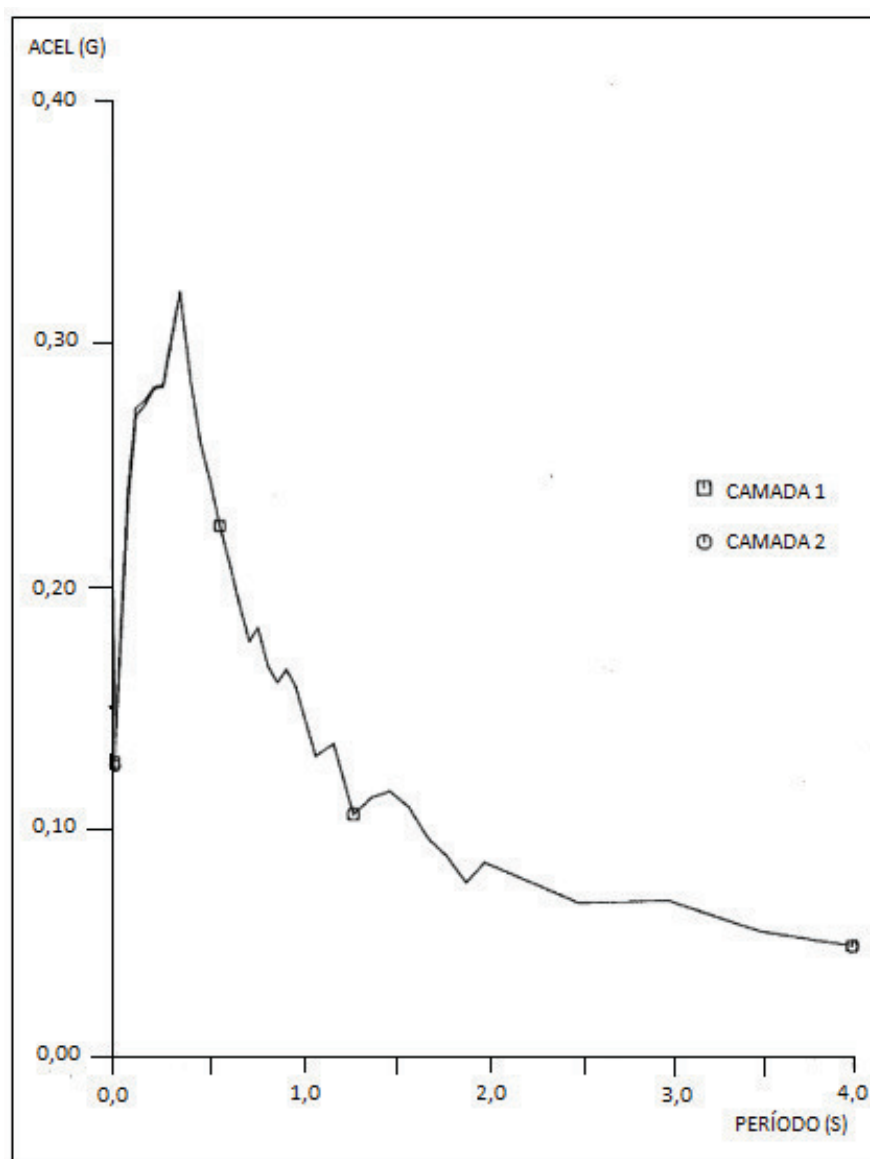


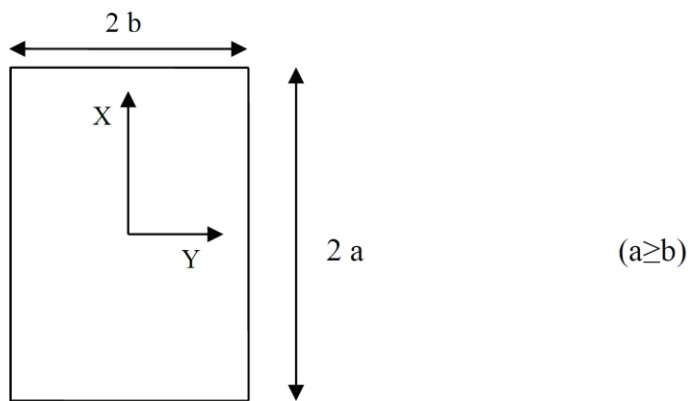
Figura 3-15 – Espectros nas camadas 1 e 2.

A comparação entre os espectros mostra que não há modificação no conteúdo das frequências e que os efeitos da amplificação dinâmica são mínimos, podendo ser desprezados. Dessa forma fica evidente que podem ser aplicados diretamente à base da estrutura os acelerogramas de projeto.

3.5. Coeficientes de Rigidez e Amortecimento do Solo

São determinados neste item os coeficientes de rigidez e amortecimento (coeficientes de impedância) que representarão os efeitos de interação solo-estrutura.

A rigidez da fundação em seus seis graus de liberdade é avaliada considerando-se as propriedades da camada mais superficial. Os coeficientes de rigidez são avaliados pelas expressões abaixo, encontradas em WOLF (1994), que resumiu resultados previamente apresentados por GAZETAS (1983).



$$K_X = \frac{Gb}{2 - \nu} \left[6,8 \left[\frac{a}{b} \right]^{0,65} + 2,4 \right] \quad (3.1)$$

$$K_Y = \frac{Gb}{2 - \nu} \left[6,8 \left[\frac{a}{b} \right]^{0,65} + 0,8 \frac{a}{b} + 1,6 \right] \quad (3.2)$$

$$K_Z = \frac{Gb}{1 - \nu} \left[3,1 \left[\frac{a}{b} \right]^{0,75} + 1,6 \right] \quad (3.3)$$

$$K_{XX} = \frac{Gb^3}{1 - \nu} \left[3,2 \frac{a}{b} + 0,8 \right] \quad (3.4)$$

$$K_{YY} = \frac{Gb^3}{1 - \nu} \left[3,73 \left[\frac{a}{b} \right]^{2,4} + 0,27 \right] \quad (3.5)$$

$$K_{ZZ} = Gb^3 \left[4,25 \left[\frac{a}{b} \right]^{2,45} + 4,06 \right] \quad (3.6)$$

Na determinação dos coeficientes de rigidez deverá ser considerada também a flexibilidade da membrana de impermeabilização. A membrana oferece uma rigidez muito maior no seu sentido de compressão do que no seu sentido de cisalhamento. São considerados os seguintes valores para a rigidez unitária desse material:

$$k_v = 500000 \text{ kN/ m}^3 \text{ (compressão);}$$

$$k_h = 80000 \text{ kN/ m}^3 \text{ (cisalhamento).}$$

O valor da rigidez da membrana, correspondente aos diversos graus de liberdade, é obtido considerando-se um comportamento de corpo rígido para o edifício.

Para a consideração conjunta da rigidez combinada do solo com a membrana, emprega-se a expressão abaixo de molas associadas em série:

$$k_{conjunto} = \frac{k_{solo} \times k_{membrana}}{k_{solo} + k_{membrana}} \quad (3.7)$$

São apresentados a seguir os resultados finais da avaliação da rigidez dos conjuntos solo-membrana de fundação.

3.5.1. Determinação da Rigidez na Direção Horizontal X

Parcela do solo:

$$k_{x1} = 1,858 \times 10^8 \frac{kN}{m}$$

Parcela da membrana:

$$k_{x2} = 3,954 \times 10^7 \frac{kN}{m}$$

Rigidez Final:

$$k_x = \frac{1,858 \times 10^8 \times 3,954 \times 10^7}{1,858 \times 10^8 + 3,954 \times 10^7} = 3,260 \times 10^7 \frac{kN}{m}$$

$$k_x = 3,260 \times 10^7 \frac{kN}{m}$$

3.5.2. *Determinação da Rigidez na Direção Horizontal Y*

Parcela do solo:

$$k_{y1} = 1,798 \times 10^8 \frac{kN}{m}$$

Parcela da membrana:

$$k_{y2} = 3,954 \times 10^7 \frac{kN}{m}$$

Rigidez Final:

$$k_y = 3,241 \times 10^7 \frac{kN}{m}$$

3.5.3. *Determinação da Rigidez na Direção Vertical Z*

Parcela do solo:

$$k_{z1} = 2,932 \times 10^8 \frac{kN}{m}$$

Parcela da membrana:

$$k_{z2} = 2,382 \times 10^7 \frac{kN}{m}$$

Rigidez Final:

$$k_z = 1,314 \times 10^7 \frac{kN}{m}$$

3.5.4. *Determinação da Rigidez Rotacional em Torno do Eixo X*

Parcela do solo:

$$k_{xx1} = 3,851 \times 10^{10} \frac{kN}{m}$$

Parcela da membrana:

$$k_{xx2} = 1,804 \times 10^{10} \frac{kN}{m}$$

Rigidez Final:

$$k_{xx} = 1,229 \times 10^{10} \frac{kN}{m}$$

3.5.5. *Determinação da Rigidez Rotacional em Torno do Eixo Y*

Parcela do solo:

$$k_{yy1} = 1,318 \times 10^{10} \frac{kN}{m}$$

Parcela da membrana:

$$k_{yy2} = 4,955 \times 10^9 \frac{kN}{m}$$

Rigidez Final:

$$k_{yy} = 3,601 \times 10^9 \frac{kN}{m}$$

3.5.6. *Determinação da Rigidez Rotacional em Torno do Eixo Z*

Parcela do solo:

$$k_{zz1} = 1,747 \times 10^{10} \frac{kN}{m}$$

Parcela da membrana:

$$k_{zz2} = 3,817 \times 10^9 \frac{kN}{m}$$

Rigidez Final:

$$k_{zz} = 3,132 \times 10^{10} \frac{kN}{m}$$

3.5.7. Determinação dos Coeficientes de Amortecimento

No processamento dos modelos a seguir descrito é necessária a definição de um valor de amortecimento a ser aplicado na estrutura como um todo. É conservadoramente adotado o próprio valor do amortecimento estrutural de 7 % nas análises.

Mostra-se a seguir que essa consideração é bastante conservadora, já que o amortecimento do solo e o amortecimento combinado estrutura-solo é bastante superior a esse valor.

Para mostrar numericamente a validade dessa afirmação estuda-se o sentido vertical do edifício.

A fração de amortecimento crítico correspondente à fundação pode ser avaliada pela expressão apresentada em RICHART *et al.*, (1970):

$$D_z = \frac{0,425}{\sqrt{B_z}} \quad (3.8)$$

B_z é a fração de massa, obtida através da expressão:

$$B_z = \frac{(1-\nu) m}{4 \times \rho r^3} \quad (3.9)$$

ν – coeficiente de Poisson do solo, com valor adotado de 0,25;

m – massa da laje de fundação, com valor avaliado de 3089,6 t;

ρ – massa específica da primeira camada do solo, com valor adotado de 2,2 t/m³.

r – raio equivalente, de uma fundação circular de mesma área da fundação analisada. Considera-se a fundação como retangular, de dimensões iguais a $A = 15,80$ m e $B = 30,15$ m.

$$\pi r^2 = AB$$

$$\pi r^2 = 30,15 \times 15,80$$

$$r = 12,31m$$

O valor da fração de massa B_z é:

$$B_z = \frac{(1 - 0,25) \times 3089,6}{4 \times 2,2 \times 12,31^3}$$

$$B_z = 0,141$$

O valor do amortecimento é:

$$D_z = \frac{0,425}{\sqrt{0,141}}$$

$$D_z = 1,131, \text{ o que equivale a } 113,1\%$$

Fica evidente que o amortecimento considerado de 7% é bastante conservador.

3.6. Determinação das Características Geométricas

Tem-se as seguintes propriedades mecânicas para o concreto armado:

Módulo de elasticidade $| E | = 2,5 \times 10^7$ kN/m².

Coefficiente de Poisson $| \nu | = 0,2$.

Massa específica $| \rho | = 2,5$ t/m³.

Amortecimento interno $| \xi | = 7\%$.

As características geométricas das seções transversais dos elementos do modelo são determinadas a partir de plantas de formas, com auxílio do aplicativo AutoCAD.

A numeração dos elementos que compõem o modelo está definida no item 3.1. O sistema local dos eixos adotado é definido na Figura 3-16.

Serão efetuadas determinações de propriedades geométricas para forças no sentido X, para forças no sentido Y e para momento de Torção.

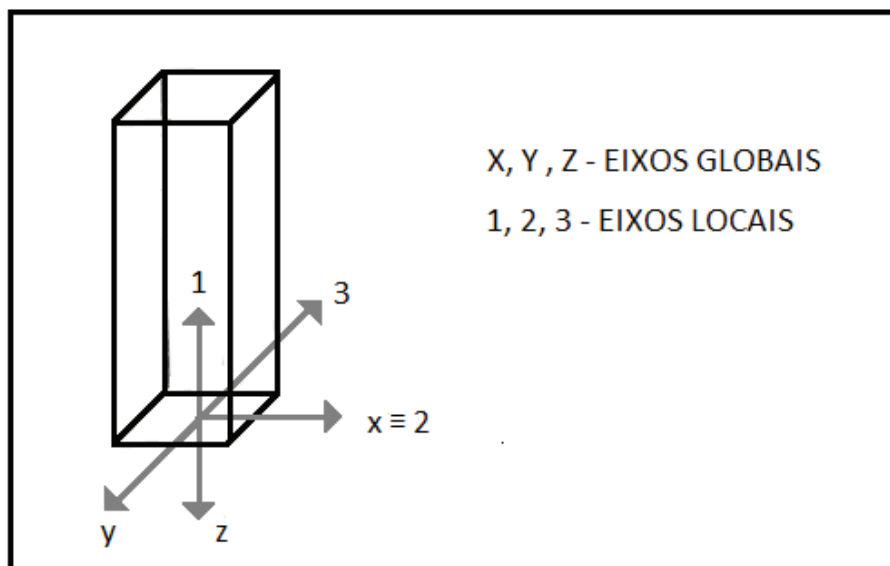


Figura 3-16 – Sistema local de eixos.

Para cálculo da inércia à flexão são consideradas as respectivas mesas de compressão/tração. Para cálculo das áreas de cisalhamento é considerado o valor de 0,85 vezes a área da alma das paredes. Para a obtenção das propriedades correspondentes ao conjunto das paredes entre dois pisos consecutivos são condensadas as propriedades obtidas para cada parede individualmente. Essa condensação é processada supondo-se que as lajes dos pisos sejam infinitamente rígidas.

Para a determinação da rigidez à torção, é considerada como válida a aplicação da fórmula de Bredt às paredes externas. Serão desconsideradas as aberturas nessas paredes.

Na Tabela 3-2 é apresentado o resumo das propriedades condensadas do modelo.

Tabela 3-2 – Propriedades condensadas para o modelo

Propriedades						
Elemento	A ₁ (m ²)	A ₂ (m ²)	A ₃ (m ²)	I ₁ (m ⁴)	I ₂ (m ⁴)	I ₃ (m ⁴)
1	476,4	404,9	404,9	6393	36086	9910
2	112,5	49,5	52	805	5812	2142
3	102,5	41,5	49,6	805	5750	1897
4	106,9	45,8	50,4	805	5895	2088
5,6,7	33,1	8,1	20,5	805	2228	387
8	26,5	7,4	15,4	681	1771	278

3.7. Determinação das Massas

A determinação das massas translacionais e rotacionais associadas a cada uma das elevações do edifício também foi efetuada com auxílio do aplicativo AutoCAD. A Tabela 3-3 apresenta, por elevação, as massas translacionais e rotacionais e as correspondentes coordenadas em planta dos respectivos centros de massa e os nós do modelo estrutural aos quais as massas são associadas.

Tabela 3-3 – Massas translacionais e rotacionais

Elevação	Nós do Modelo	Coordenadas do C.M.		Massas Translacionais	Massas Rotacionais		
		X	Y	MX=MY=MZ	MXX	MY Y	MZZ
28,3	19	0	0	680,5	63542,3	22399,3	85941,6
23,5	18	0	0,28	816,5	76195,9	25239,2	101435,1
19	17	0	0,90	579,6	57477,3	23923,3	81400,5
14	15	-0,57	3,08	544,2	56435,7	21466,3	77901,9
10	13	-0,60	-1,06	1011,6	80295,7	26396,1	106691,8
7,5	10	-0,44	-3,23	1141,3	77449,6	26608,7	104058,3
5	7	-0,50	-3,96	1564,7	99290,0	35800,7	135090,6
Térreo	4	0,00	-0,77	3089,6	233104,4	64487,1	297591,5

4. RESULTADOS OBTIDOS COM O MODELO SIMPLIFICADO

Com os parâmetros definidos nos itens anteriores são mostrados a seguir os resultados das análises obtidos com o modelo de barra. As análises foram realizadas tanto pelo método espectral como pelo método do histórico do tempo.

Na análise espectral utiliza-se como critério para a combinação das contribuições modais o método CQC. Já para a combinação dos efeitos direcionais é utilizado o método SRSS.

A Figura 4-1 apresenta os resultados das forças axiais para as análises espectral e no histórico do tempo.

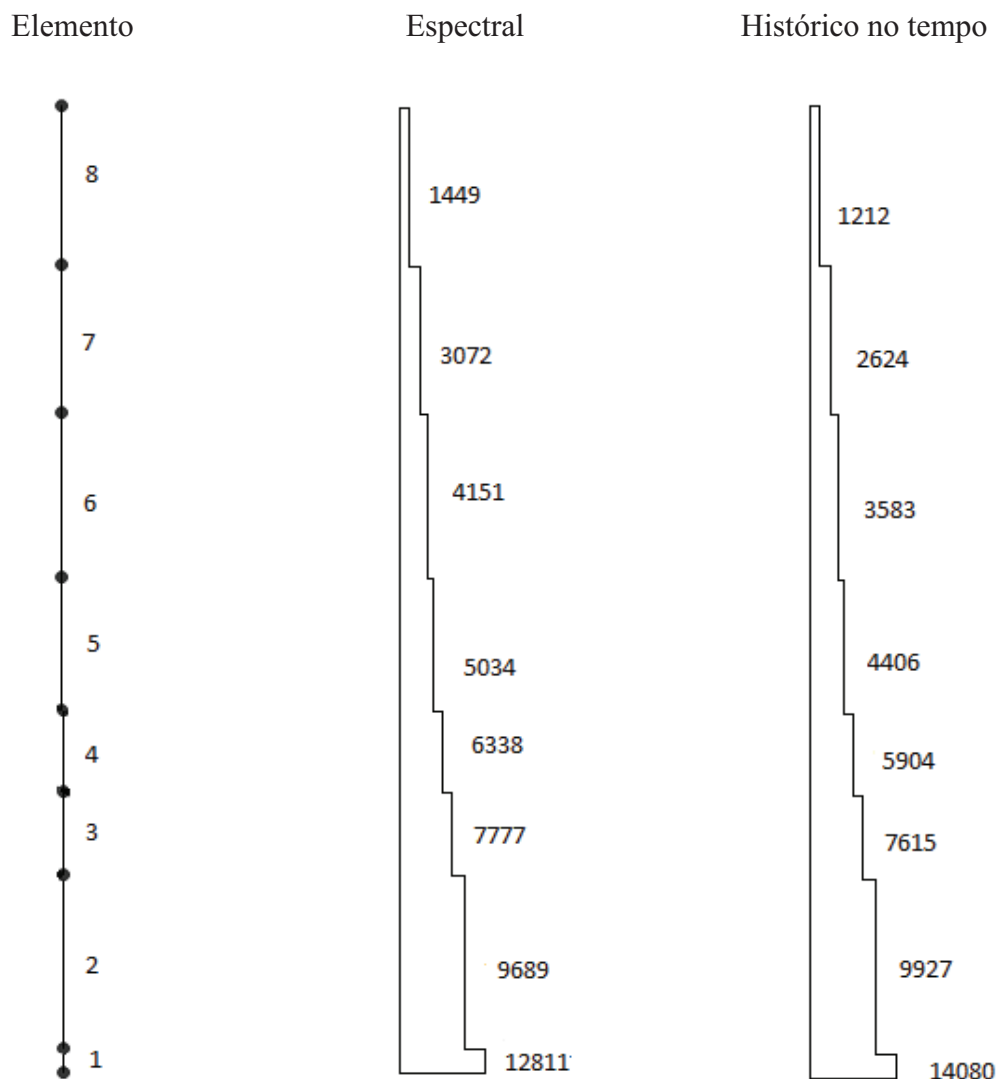


Figura 4-1 – Diagrama das forças axiais – unidade: kN.

A Figura 4-2 apresenta os resultados das forças cortantes na direção X, para as análises espectral e no histórico do tempo.

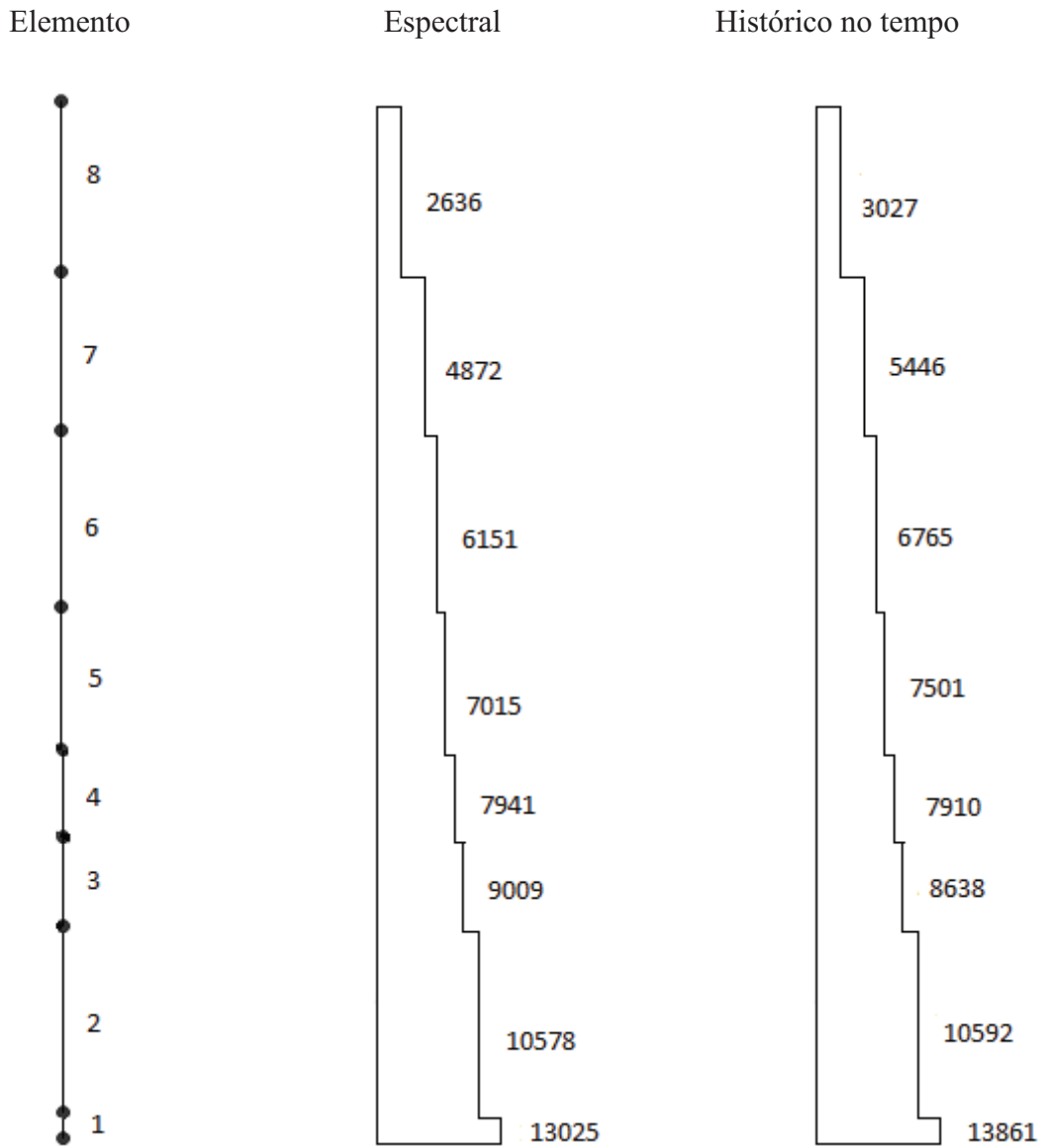


Figura 4-2 – Diagrama das forças cortantes na direção X – unidade: kN.

A Figura 4-3 apresenta os resultados das forças cortantes na direção Y, para as análises espectral e no histórico do tempo.

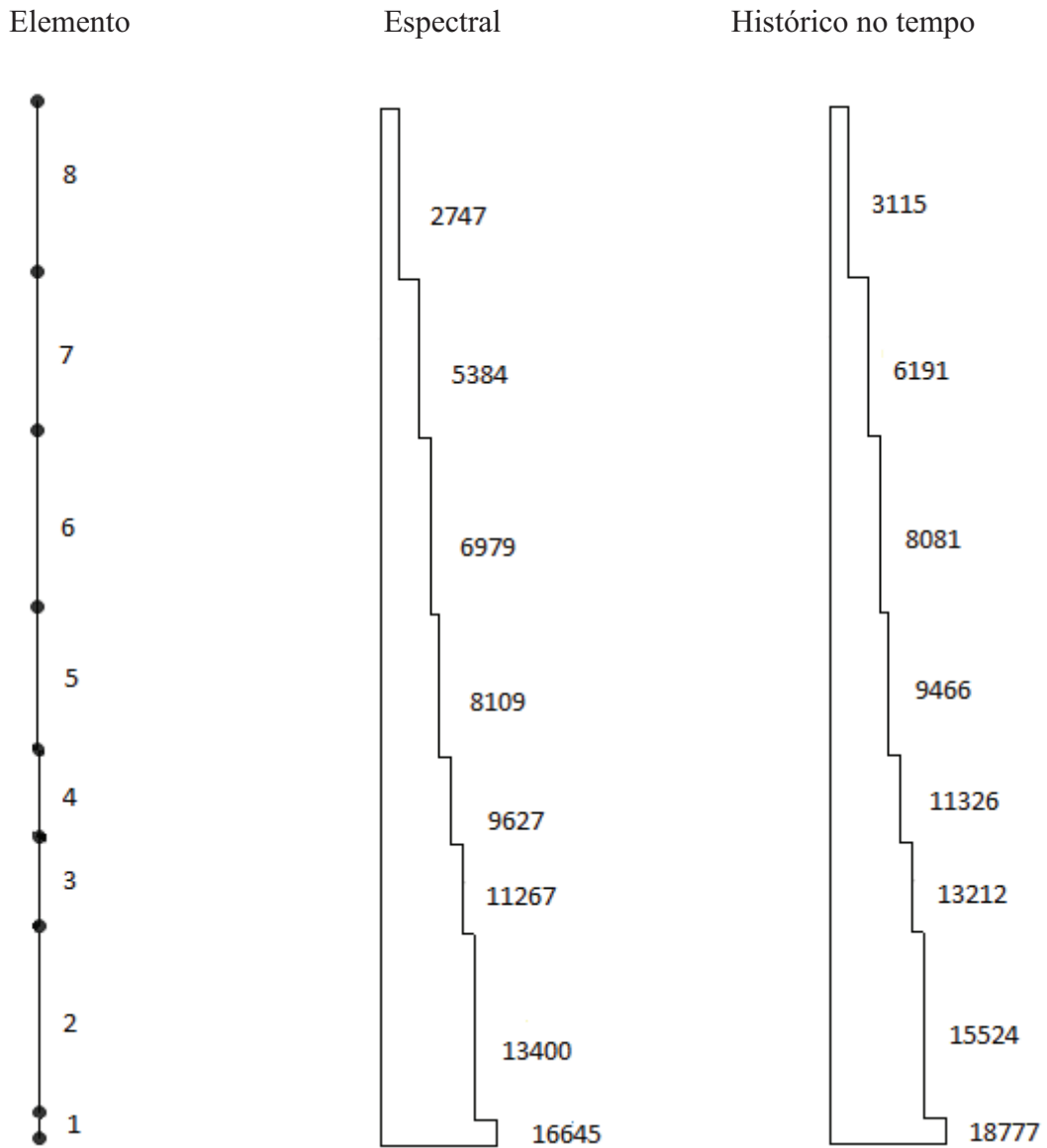


Figura 4-3 – Diagrama das forças cortantes na direção Y – unidade: kN.

A Figura 4-4 apresenta os resultados relativos a momentos de Torção em torno do eixo Z, para as análises espectral e no histórico do tempo.

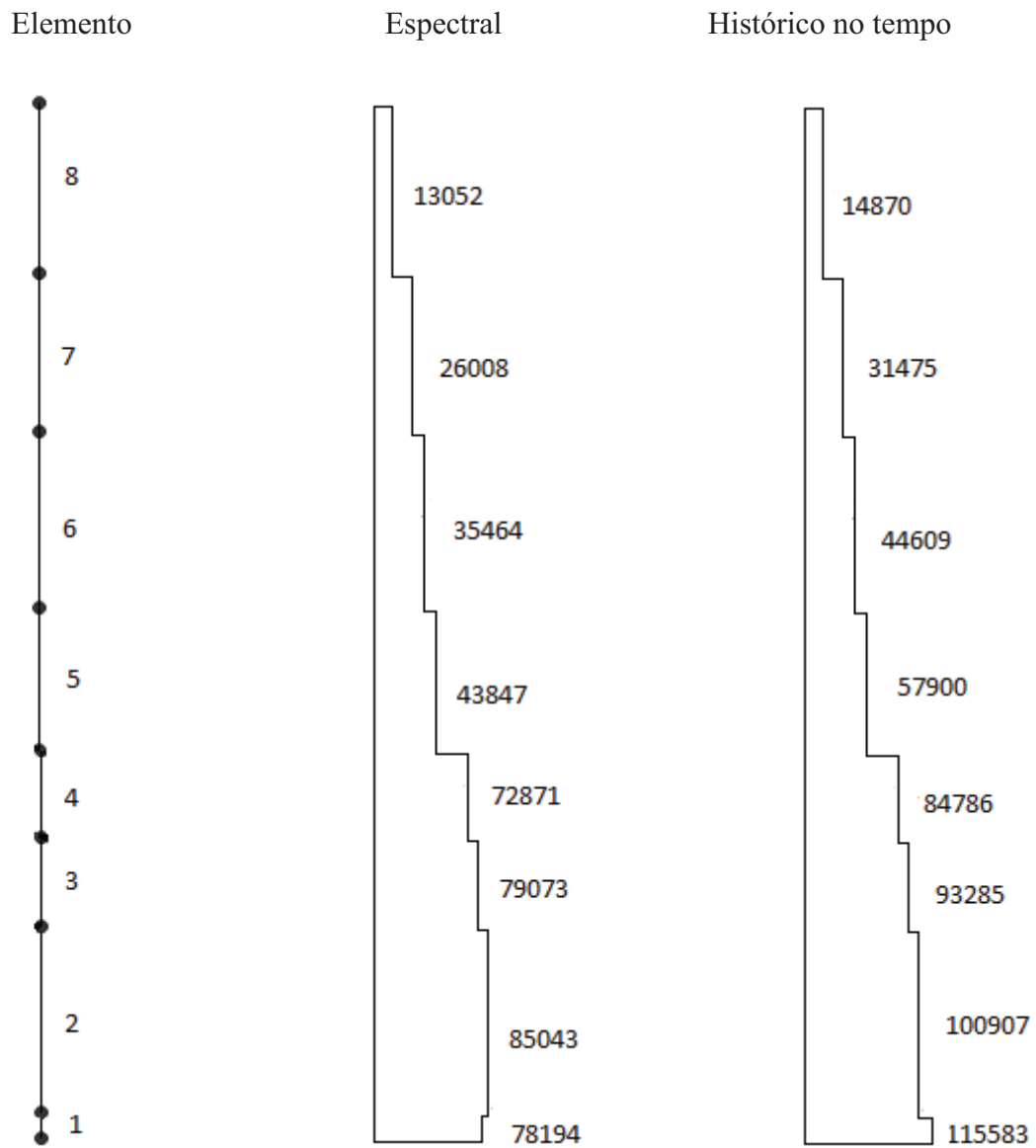


Figura 4-4 – Diagrama de momentos de torção na direção Z – unidade: kNm.

A Figura 4-5 apresenta os resultados de momentos fletores em torno do eixo X, para as análises espectral e no histórico do tempo.

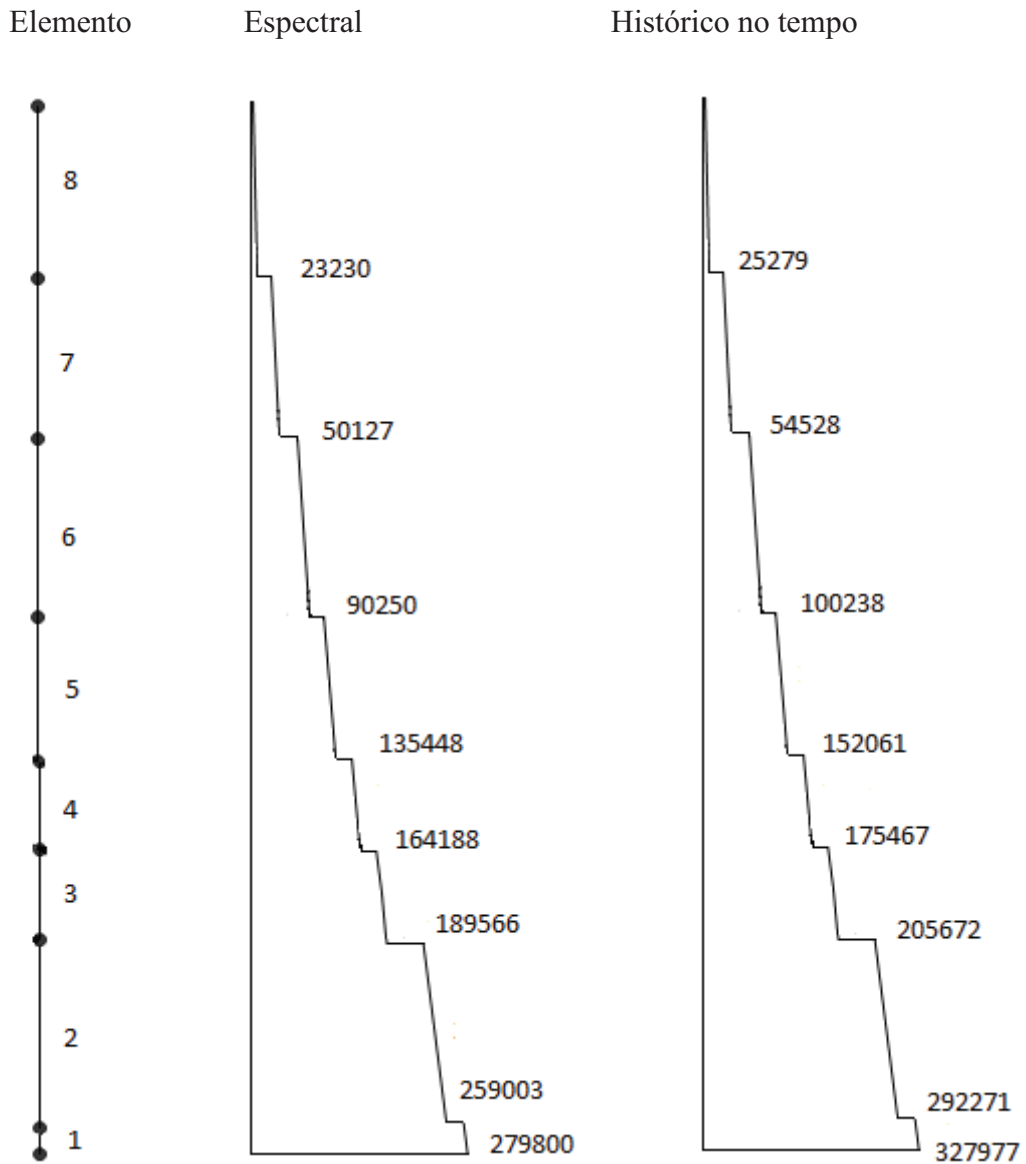


Figura 4-5 – Diagrama de momentos fletores na direção X – unidade: kNm.

A Figura 4-6 apresenta os resultados de momentos fletores em torno do eixo Y, para as análises espectral e no histórico do tempo.

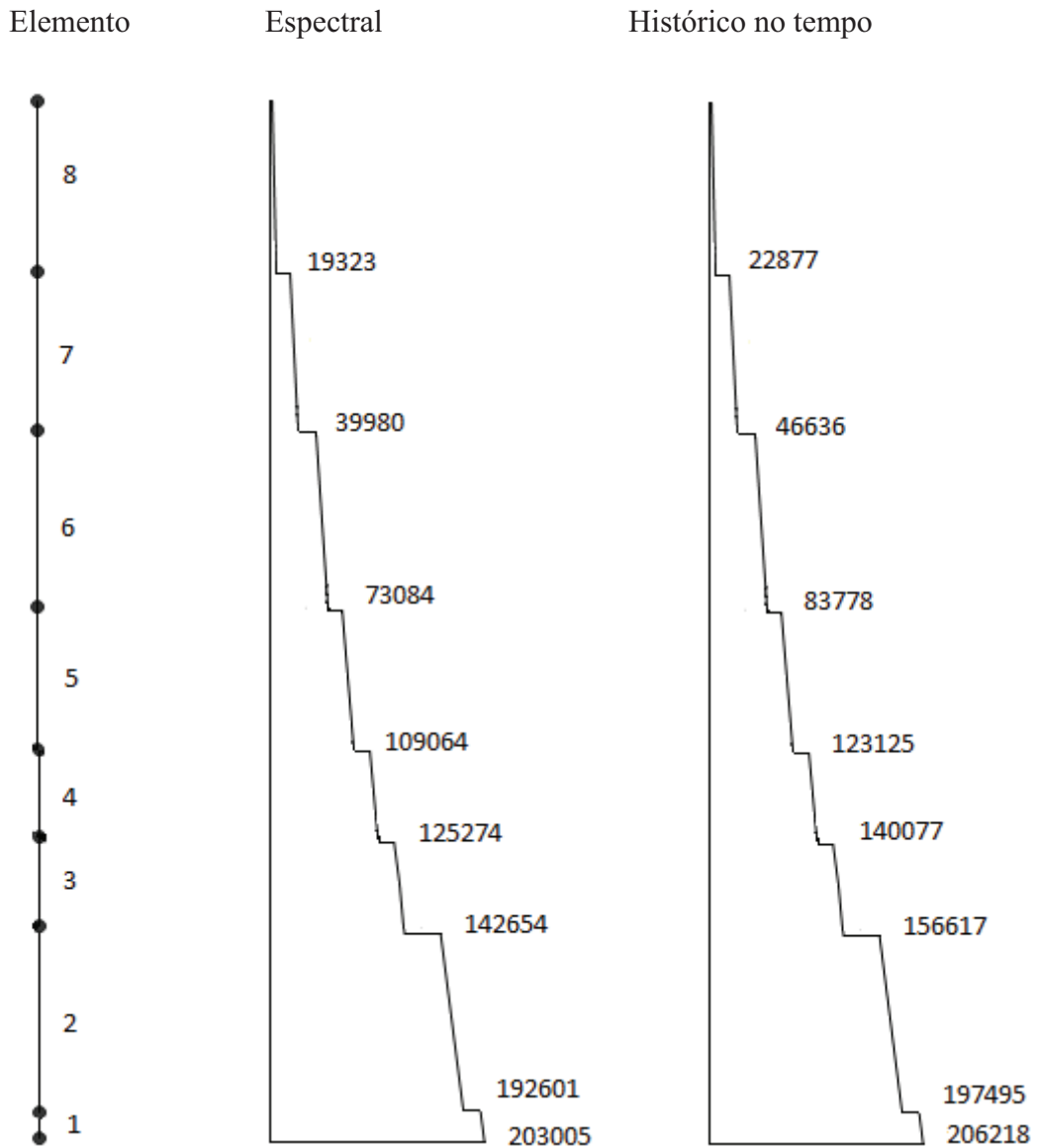


Figura 4-6 – Diagrama de momentos fletores na direção Y – unidade: kNm.

A Tabela 4-1 e a Tabela 4-2 apresentam os quadros resumos com as solicitações obtidas para o modelo de barras, para as análises espectral e por integração no histórico do tempo, respectivamente.

Tabela 4-1 – Solicitações obtidas com o modelo de barras – análise espectral

Elemento	Análise	Axial(kN)	Cortante X (kN)	Cortante Y (kN)	Torção (kNm)	Momento XX (kNm)	Momento YY (kNm)
1	Espectral	12811	13025	16645	78194	279800	203005
2	Espectral	9689	10578	13400	85043	259003	192601
3	Espectral	7777	9009	11267	79073	189566	142654
4	Espectral	6338	7941	9627	72871	164188	125274
5	Espectral	5034	7015	8109	43847	135448	109064
6	Espectral	4151	6151	6979	35464	90250	73084
7	Espectral	3072	4872	5384	26008	50127	39980
8	Espectral	1449	2636	2747	13052	23230	19323

Tabela 4-2 – Solicitações obtidas com o modelo de barras – análise no histórico do tempo

Elemento	Análise	Axial(kN)	Cortante X (kN)	Cortante Y (kN)	Torção (kNm)	Momento XX (kNm)	Momento YY (kNm)
1	D T	14080	13861	18777	115583	327977	206218
2	D T	9927	10592	15524	100907	292271	197495
3	D T	7615	8638	13212	93285	205672	156617
4	D T	5904	7910	11326	84786	175467	140077
5	D T	4406	7501	9466	57900	152061	123125
6	D T	3583	6765	8081	44609	100238	83778
7	D T	2624	5446	6191	31475	54528	46636
8	D T	1212	3027	3115	14870	25279	22877

A Figura 4-7 apresenta os deslocamentos para a direção X, tanto para a análise espectral quanto para a análise no histórico do tempo.

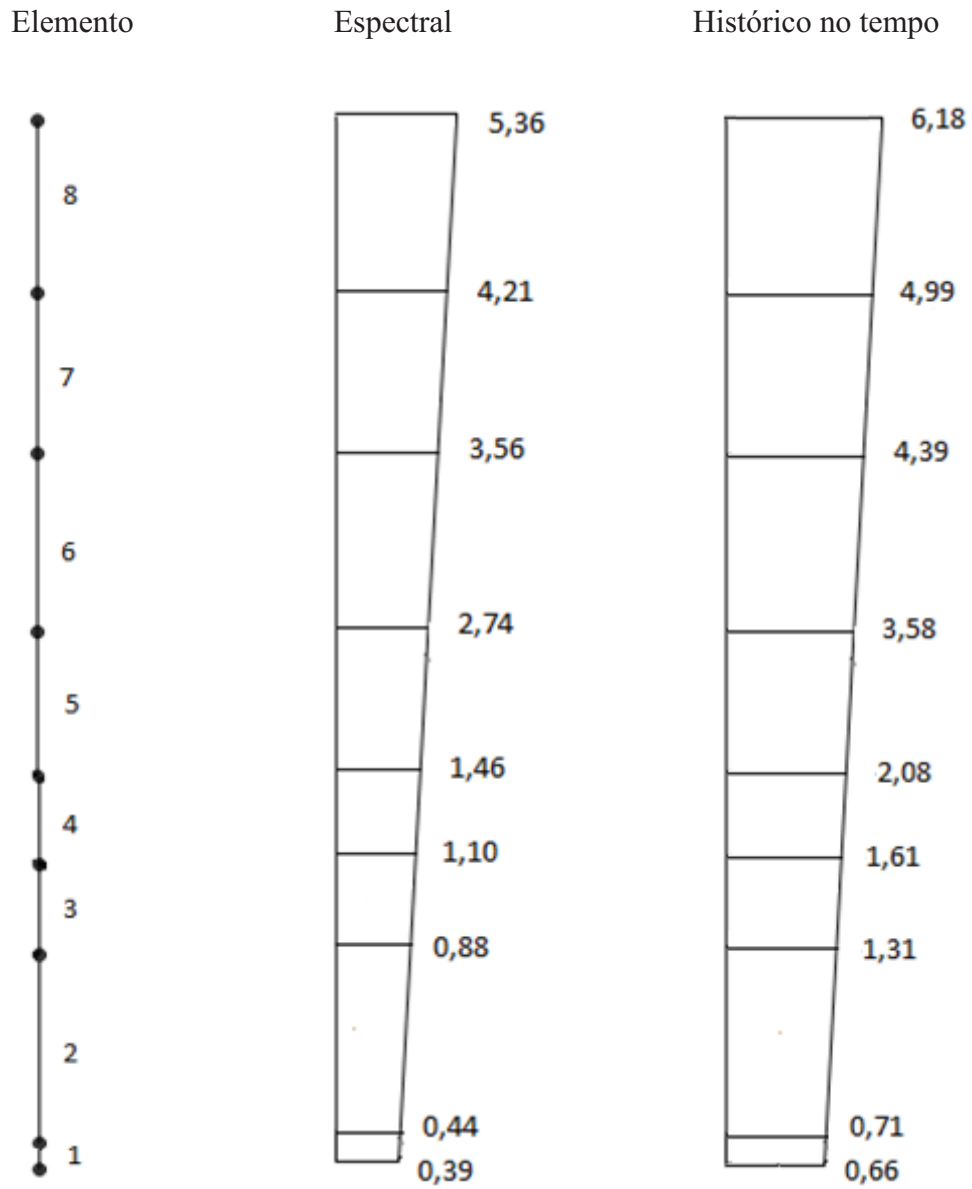


Figura 4-7 – Diagrama de deslocamentos na direção X – unidade: mm.

A Figura 4-8 apresenta os deslocamentos para a direção Y, tanto para a análise espectral quanto para a análise no histórico do tempo.

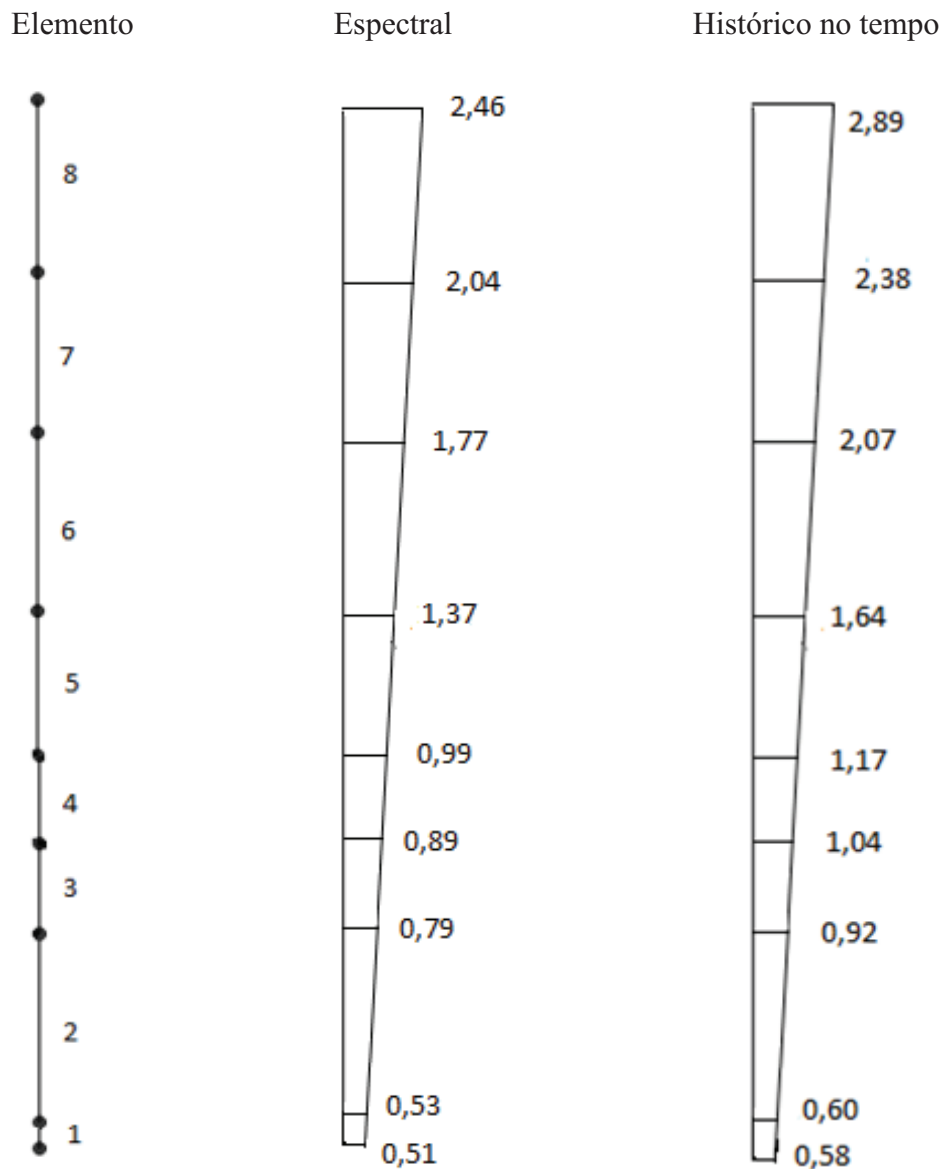


Figura 4-8 – Diagrama de deslocamentos na direção Y – unidade: mm.

A Figura 4-9 apresenta os deslocamentos para a direção Z, tanto para a análise espectral quanto para a análise no histórico do tempo.

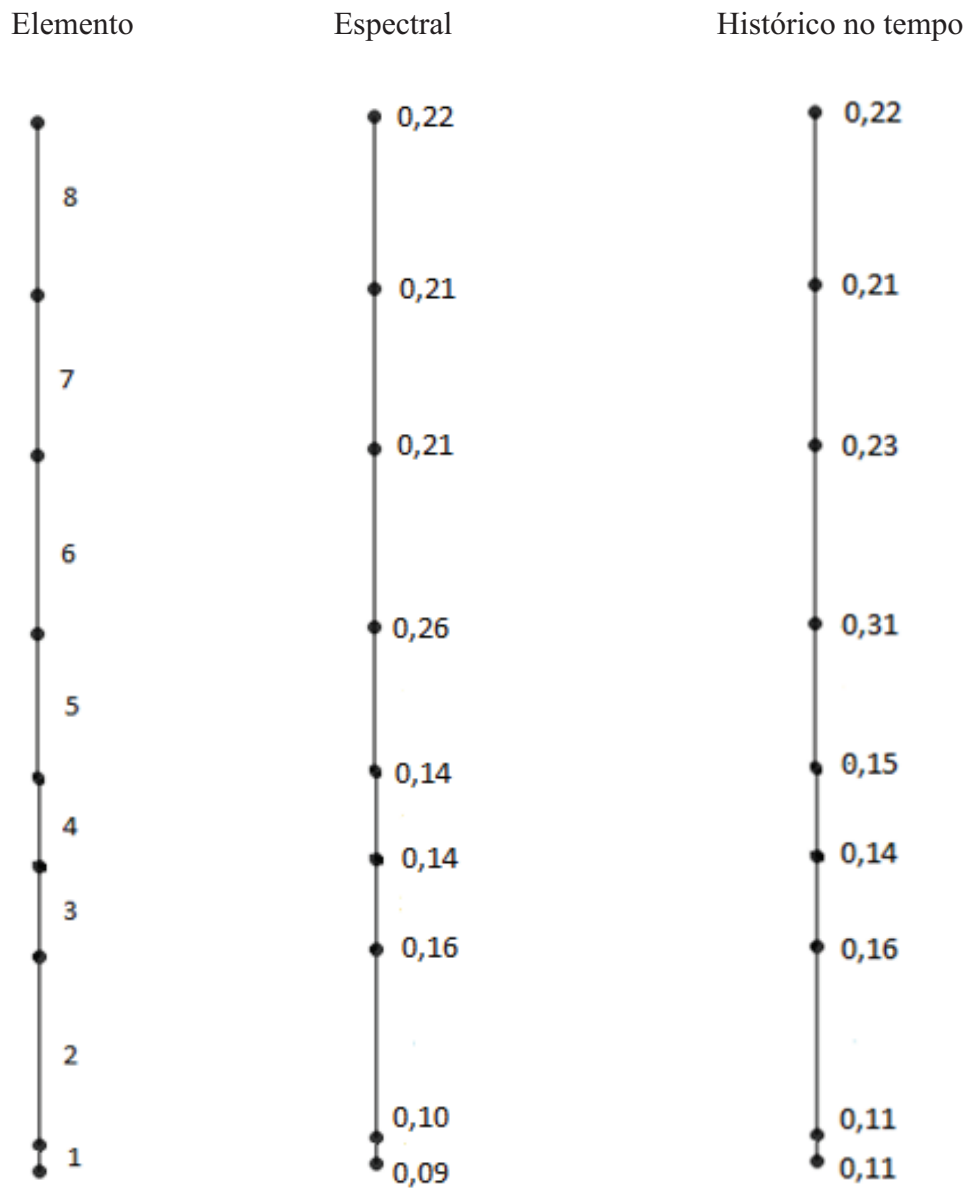


Figura 4-9 – Diagrama de deslocamentos na direção Z – unidade: mm.

As Tabelas 4-3 e 4-4 sintetizam os resultados dos deslocamentos mostrados nas Figuras 4-7, 4-8 e 4-9.

Tabela 4-3 – Deslocamentos máximos – modelo de barras – análise espectral

Deslocamentos (mm)	Direção X	Direção Y	Direção Z
Cobertura	5,36	2,46	0,22
Nível +23,50	4,21	2,04	0,21
Nível +20,00	3,56	1,77	0,21
Nível +15,00	2,74	1,37	0,26
Nível +10,00	1,46	0,99	0,14
Nível +8,00	1,10	0,89	0,14
Nível +6,00	0,88	0,79	0,16
Nível +0,75	0,44	0,53	0,10
Nível +0,00	0,39	0,51	0,09

Tabela 4-4 – Deslocamentos máximos – modelo de barras – análise no histórico do tempo

Deslocamentos (mm)	Direção X	Direção Y	Direção Z
Cobertura	6,18	2,89	0,22
Nível +23,50	4,99	2,34	0,21
Nível +20,00	4,39	2,07	0,23
Nível +15,00	3,58	1,64	0,31
Nível +10,00	2,08	1,17	0,15
Nível +8,00	1,61	1,04	0,14
Nível +6,00	1,31	0,92	0,16
Nível +0,75	0,71	0,60	0,11
Nível +0,00	0,66	0,58	0,11

A Tabela 4-5 apresenta as frequências obtidas para os primeiros 10 modos de vibração da estrutura e a Tabela 4-6 mostra os respectivos fatores de participação de massa obtidos com o SAP 2000 (CSI COMPUTERS & STRUCTURES, 2010).

As Figuras 4-10 a 4-12 apresentam, respectivamente, o modelo simplificado não deformado e as deformações correspondentes ao primeiro e ao segundo modos de vibração.

Tabela 4-5 – Frequências para o modelo simplificado

Modelo Simplificado	
Modo de Vibração	Frequência (Hz)
1	4,02
2	4,82
3	6,32
4	9,87
5	11,65
6	12,39
7	15,65
8	18,16
9	19,72
10	22,30

Tabela 4-6 – Fatores de participação de massa

TABLE: Modal Participating Mass Ratios						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	0,24866	0,38271	0,00008	0,00002
MODAL	Mode	2	0,20726	0,10429	0,00021	0,00001
MODAL	Mode	3	0,15818	0,00001	0,68338	0,00000
MODAL	Mode	4	0,10128	0,32511	0,00004	0,00000
MODAL	Mode	5	0,08584	0,08501	0,00141	0,00000
MODAL	Mode	6	0,08071	0,00000	0,29954	0,00142
MODAL	Mode	7	0,06391	0,00005	0,00096	0,88651
MODAL	Mode	8	0,05507	0,05471	0,00001	0,00000
MODAL	Mode	9	0,05071	0,01359	0,00047	0,00007
MODAL	Mode	10	0,04482	0,00992	0,00011	0,00022



Figura 4-10 – Modelo simplificado – estrutura indeformada.



Figura 4-11 – Modelo simplificado – primeiro modo de vibração.



Figura 4-12 – Modelo simplificado – segundo modo de vibração.

5. MODELO COMPLETO

É realizada a modelagem tridimensional em elementos finitos no programa SAP2000 (CSI COMPUTERS & STRUCTURES, 2010) para o prédio analisado, com o objetivo de comparar seus resultados com aqueles obtidos com o modelo simplificado descrito nos itens anteriores.

Os parâmetros utilizados no modelo são os mesmos do modelo simplificado:

Módulo de elasticidade (E) = $2,5 \times 10^7$ kN/m²

Coeficiente de Poisson (ν) = 0,21

Massa específica (ρ) = 2,5 t/m³

Amortecimento interno (ε) = 7%

Para representar a interação entre a laje de fundação e o solo foram adotados os mesmos coeficientes de rigidez condensados do modelo simplificado.

Da Figura 5-1 à Figura 5-7 é apresentada a modelagem em elementos finitos para todas as elevações da estrutura.

5.1. Geometria

A Figura 5-1 apresenta uma imagem do modelo completo do prédio.

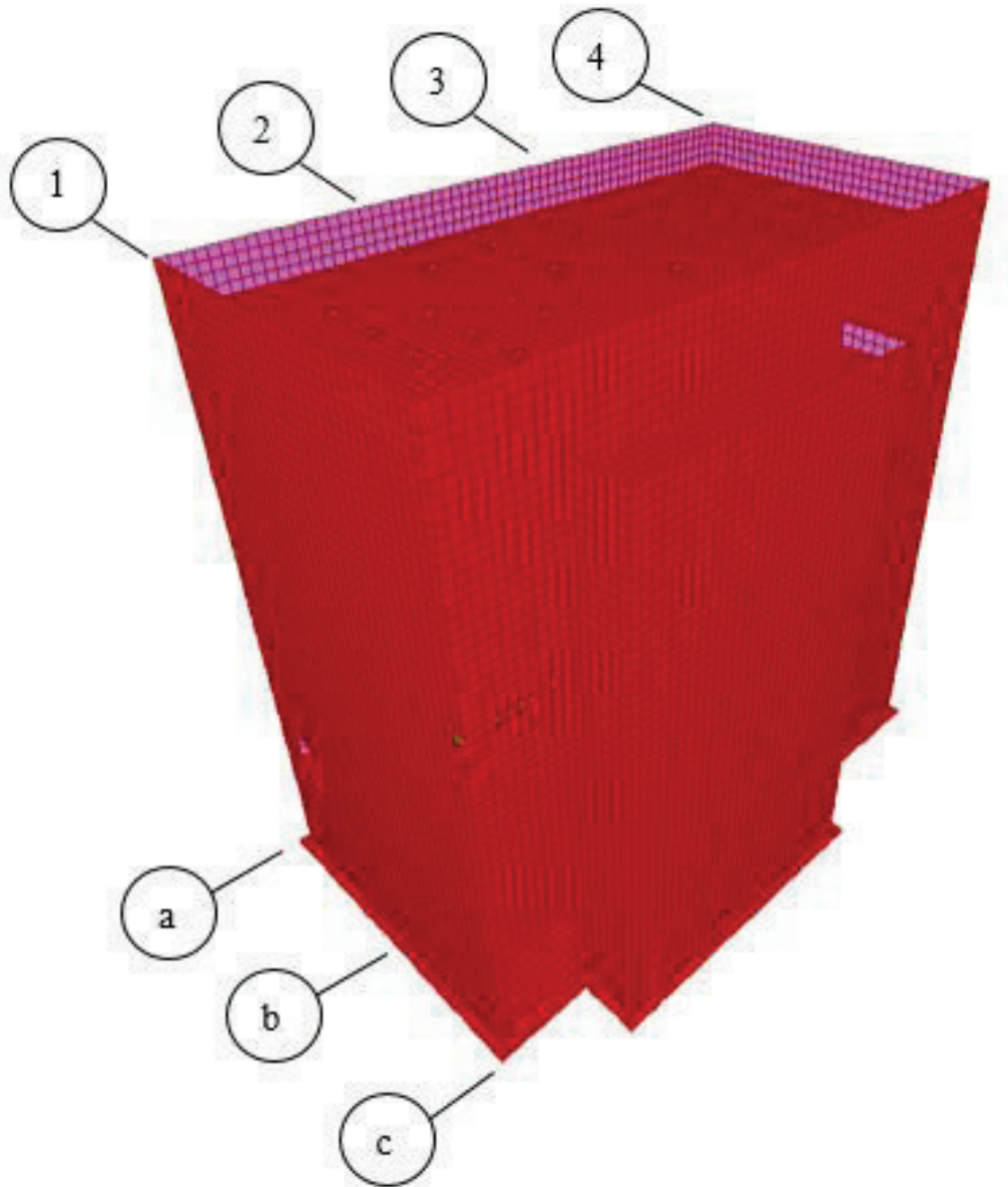


Figura 5-1 – Modelo tridimensional.

A Figura 5-2 apresenta a planta da laje de fundação, no nível +0,00 m.

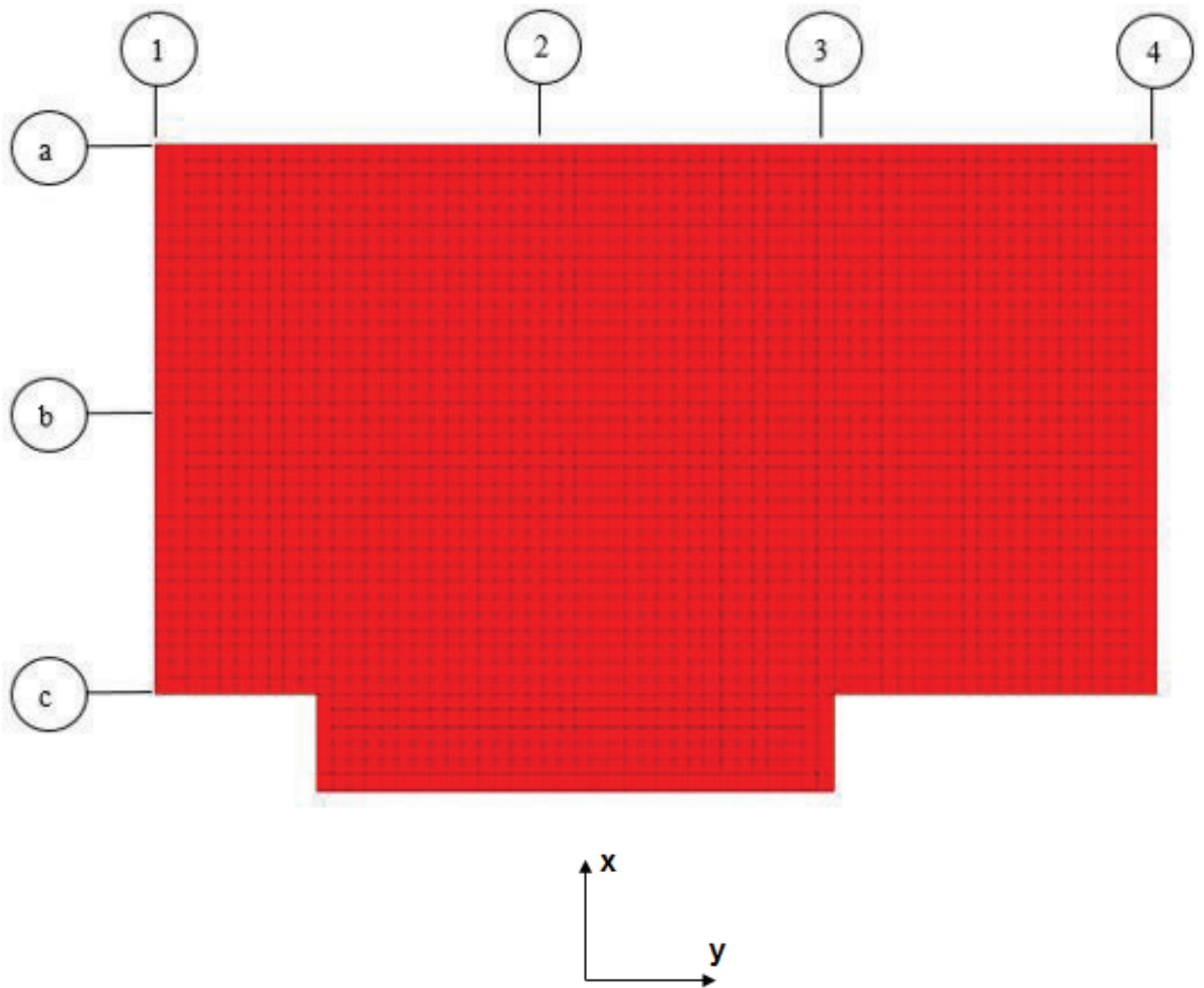


Figura 5-2 – Laje de fundação.

A Figura 5-3 apresenta a planta da laje do 1º piso, no nível +6,00 m.

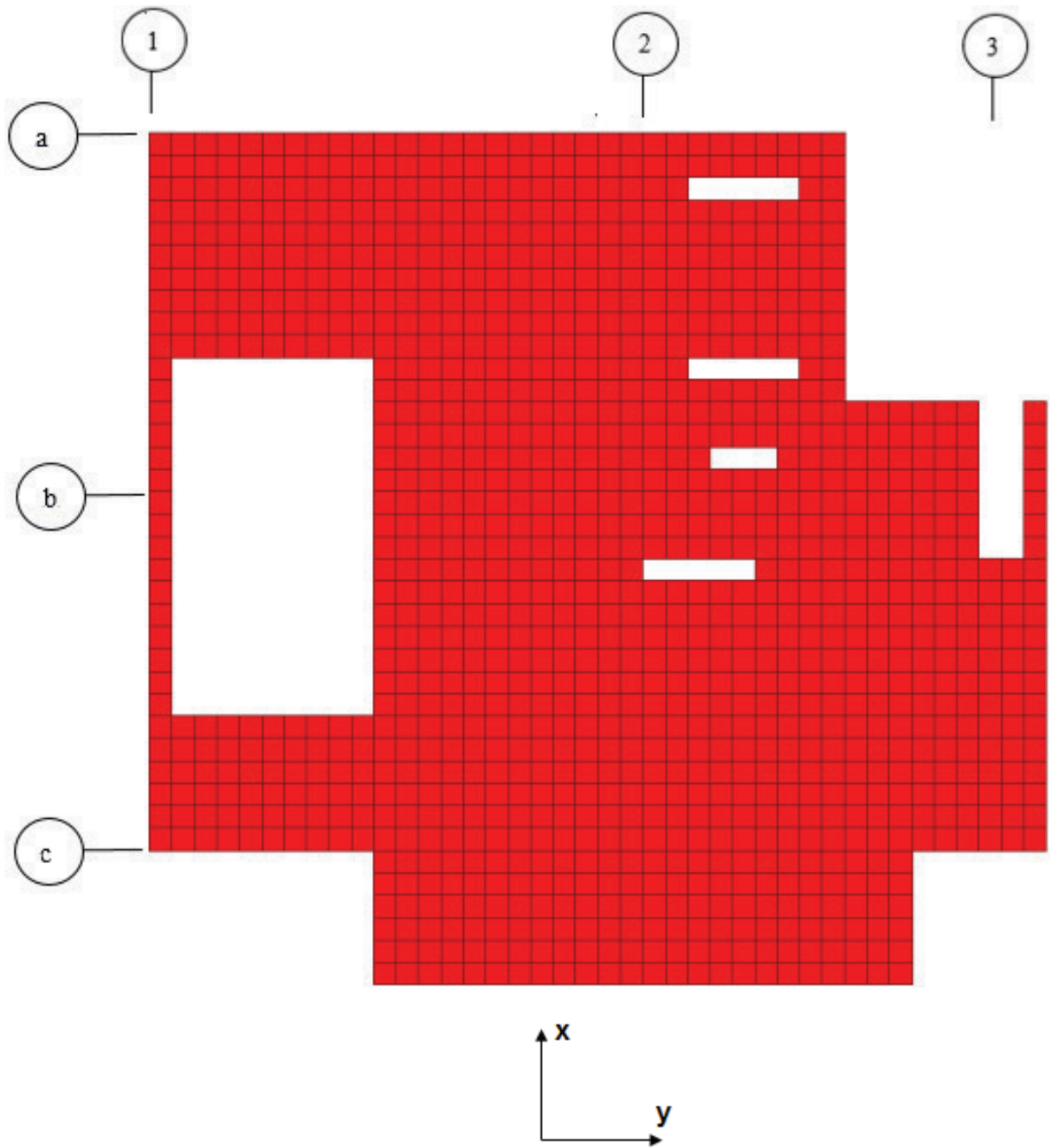


Figura 5-3 – 1º Piso – Elevação +6,00 m.

A Figura 5-4 apresenta a planta da laje do 2º piso, no nível +8,00 m.

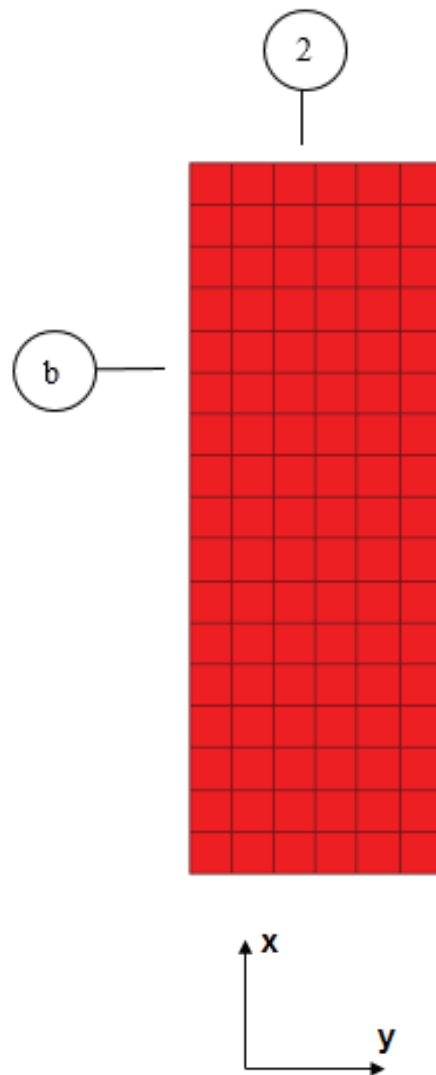


Figura 5-4 – 2º piso – Elevação +8,00 m.

A Figura 5-5 apresenta a planta da laje do 3º piso, no nível +10,00 m.

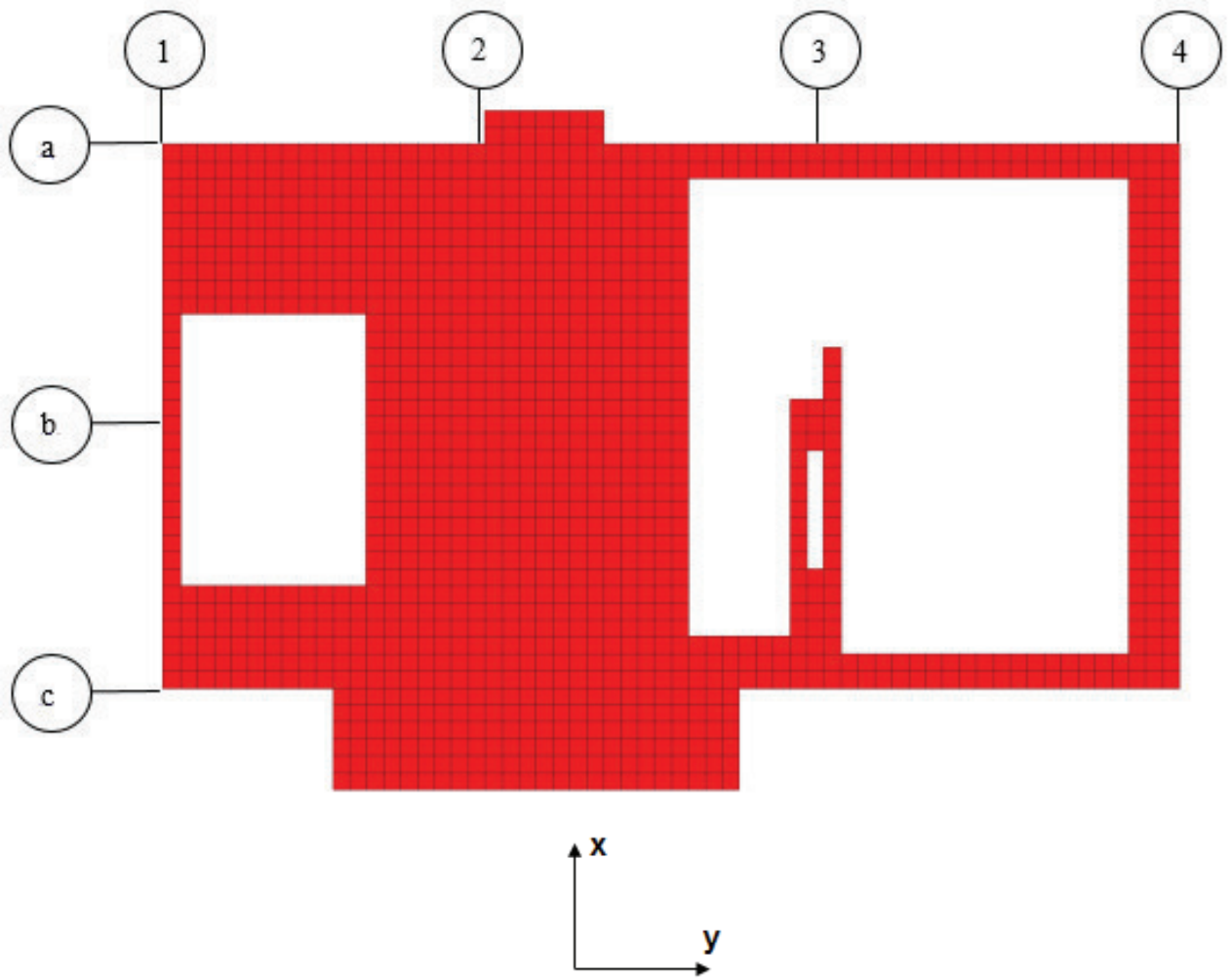


Figura 5-5 – 3º piso – Elevação +10,00 m.

A Figura 5-6 apresenta a planta da laje do 4º piso, no nível +23,50 m.

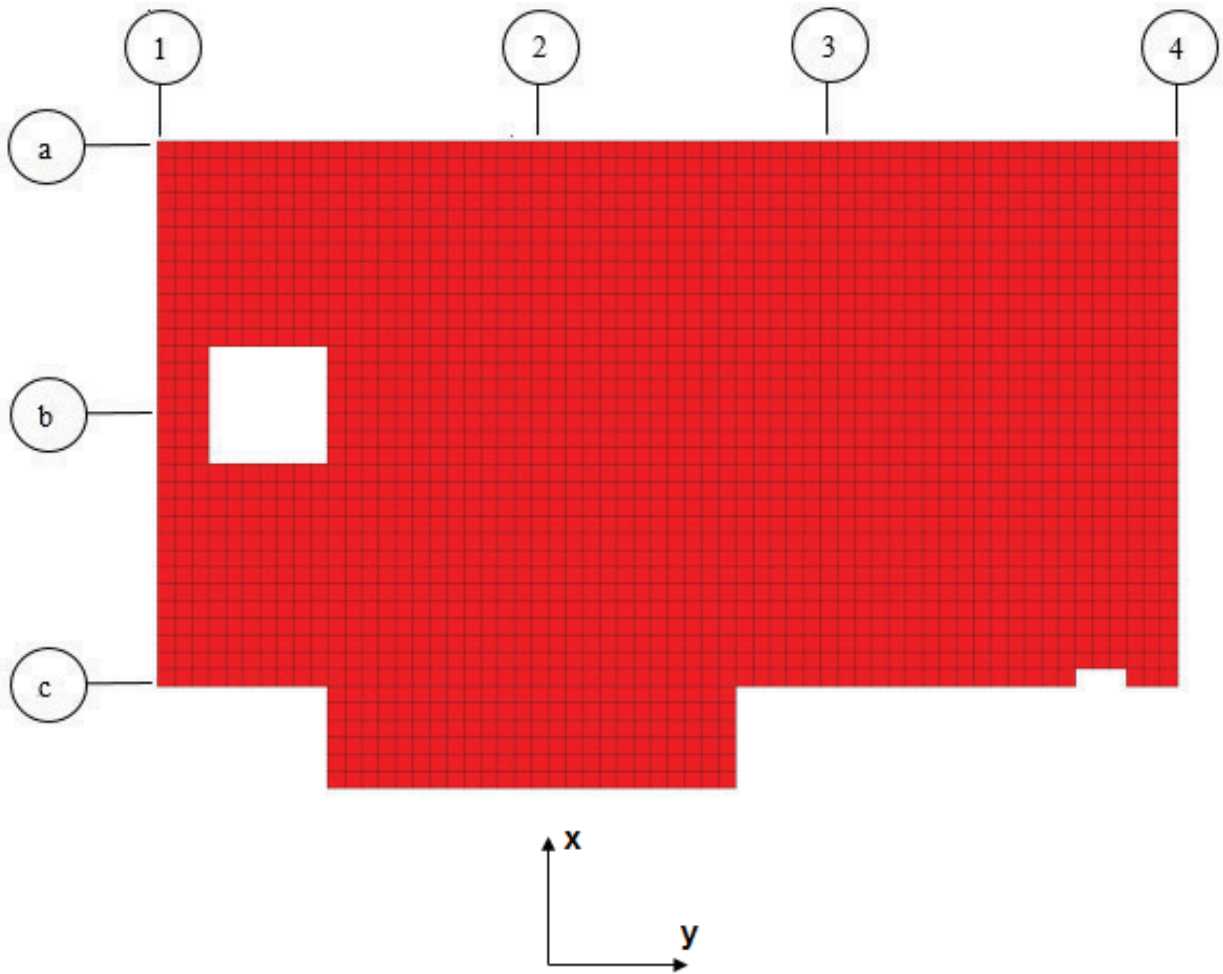


Figura 5-6 – 4º piso – Elevação +23,50 m.

A Figura 5-7 apresenta a planta da laje da cobertura, no nível +29,50 m.

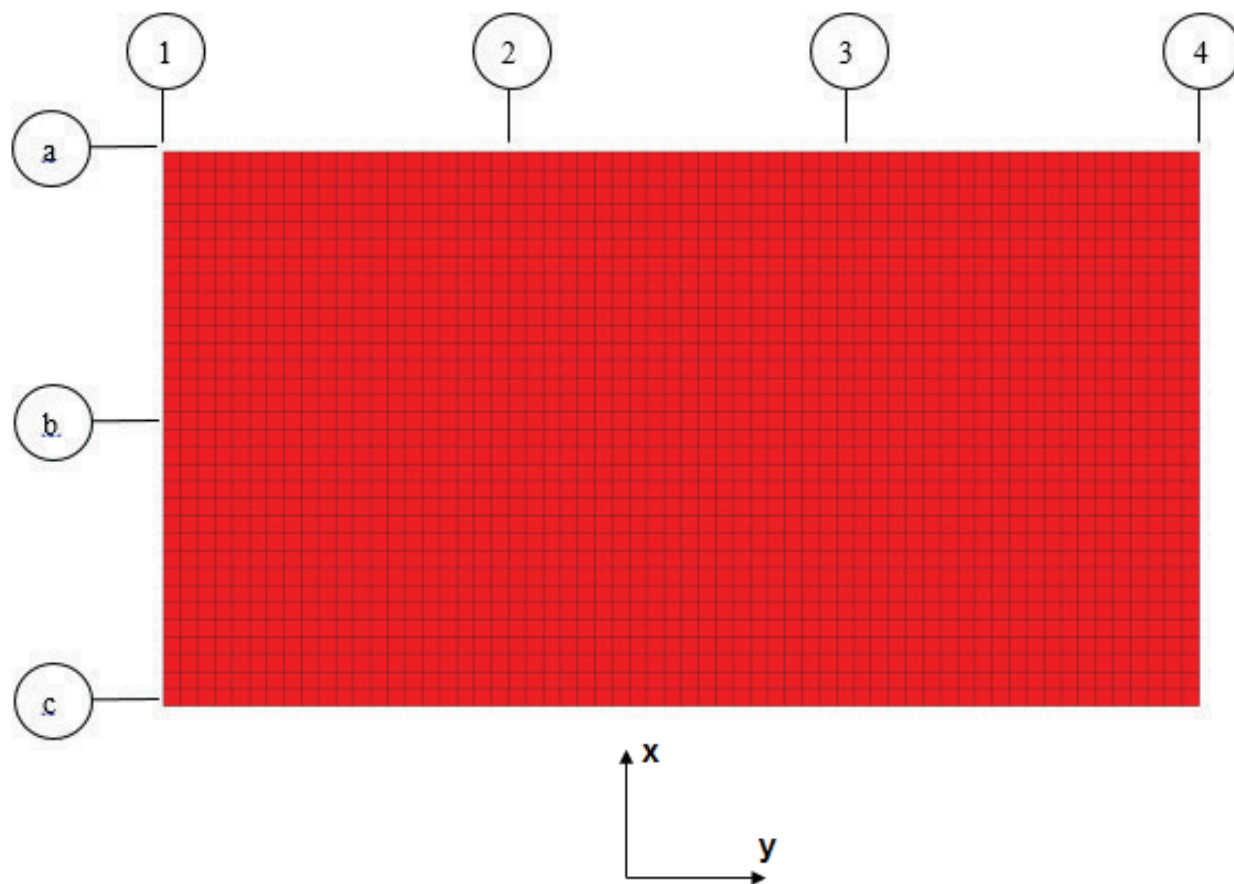


Figura 5-7 – Cobertura – Elevação +29,50 m.

5.2. Cargas Sísmicas

5.2.1. Espectro de Projeto

Para a definição das cargas sísmicas é considerado o mesmo espectro de projeto utilizado no modelo simplificado, apresentado na Tabela 3-1 do item 3.2.

5.2.2. Time History

A análise por integração no domínio do tempo utilizou os mesmos acelerogramas usados no modelo simplificado, ou seja, com a curva aceleração-tempo discretizada em 1500 pontos, correspondendo a um intervalo de discretização de 0,01s, com duração total de 15 s, para um amortecimento de 7%, conforme definido no item 3.3.

5.3. Coeficientes de Rigidez do Solo

As molas verticais e horizontais concentradas determinadas no item 3.5 para o modelo discreto são agora consideradas como uniformemente distribuídas na interface fundação-solo no modelo completo.

Deve-se ressaltar que a distribuição da mola vertical concentrada aplicada no modelo com barras, como uniformemente na interface fundação-solo do modelo completo, não consegue reproduzir os coeficientes de mola rotacional concentrados, conforme mostrado por RIBEIRO (2010). Isso leva necessariamente a que a estrutura modelada no sistema completo seja mais flexível na fundação que no modelo simplificado.

Para a obtenção do valor numérico dos coeficientes de mola a serem aplicados a cada ponto da interface fundação-solo, considerou-se a área da fundação como sendo de 16 m x 30 m, e a área de influência genérica de um nó constituinte da malha de elementos finitos da laje de fundação como sendo de 0,5 m x 0,5 m.

$$k_x = \frac{\text{coef do modelo simplificado}}{\text{Área da laje de fundação}} \times \text{Área de inf de um nó} \quad (5.1)$$

$$k_x = \frac{3,26 \times 10^7}{30 \times 16} \times (0,5 \times 0,5) = 16979 \frac{kN}{m}$$

$$k_y = 16880 \frac{kN}{m}$$

$$k_z = 68438 \frac{kN}{m}$$

5.4. Amplificação Dinâmica no Solo

A amplificação dinâmica pode ser desprezada, conforme já mostrado anteriormente no item 3.4 para o modelo simplificado.

5.5. Processo para a Obtenção das Solicitações

A análise comparativa entre os modelos simplificado e completo é baseada nas avaliações dos deslocamentos e forças globais obtidas com os dois modelos.

Para viabilizar a comparação em termos de forças é então necessária a obtenção de forças globais no modelo completo, a partir da integração de resultados obtidos em termos de tensões nos elementos finitos ao longo de uma dada seção.

Para isso é extensivamente utilizado um recurso do SAP2000 denominado “Section Cut”. Nesse processo são definidos planos de corte horizontais que interceptam todas as paredes da estrutura para a elevação desejada. Pode ser observado na Figura 5-8 que esses planos são definidos 0,5 m acima do plano de cada laje.

Para a realização dos “Section Cuts” é necessário definir, em planta, a locação dos pontos onde serão calculadas as forças axiais, momentos fletores e de torção. Desse modo são escolhidos para cada laje os centros de gravidade do conjunto (paredes existentes entre dois pavimentos consecutivos da estrutura) para as direções X e Y.

São utilizados 1500 modos de vibração no modelo completo.

A Figura 5-8 apresenta a aplicação dos “Section Cuts” para os cinco pavimentos analisados.

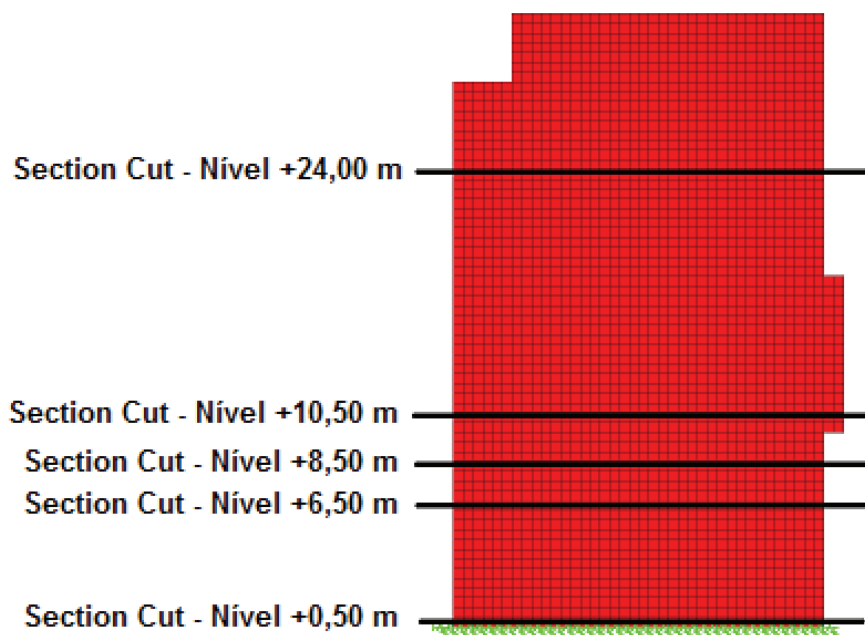


Figura 5-8 – Aplicação dos “Section Cuts”.

Para a obtenção das solicitações na laje de fundação, são calculados os centros de gravidade das paredes entre os níveis +0,00 m e +6,00 m. A Figura 5-9 apresenta um quadro com os parâmetros definidos para a realização do “Section Cut” no piso térreo, elevação +0,50 m.

Para a obtenção das solicitações no piso 1, elevação +6,00 m, são calculados os centros de gravidade das paredes entre os níveis +6,00 m e +8,00 m.

Para a obtenção das solicitações no piso 2, elevação +8,00 m, são calculados os centros de gravidade das paredes entre os níveis +8,00 m e +10,00 m.

Para a obtenção das solicitações no piso 3, elevação +10,00 m, são calculados os centros de gravidade das paredes entre os níveis +10,00 m e +23,50 m.

Para a obtenção das solicitações no piso 4, elevação +23,50 m, são calculados os centros de gravidade das paredes entre os níveis +23,50 m e +29,50 m.

As Figuras 5-10, 5-11, 5-12 e 5-13 apresentam os quadros com os parâmetros definidos para a realização do “Sections Cut” nos pisos 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Section Cut Data

Edit

Section Cut Name

Section Cut Defined By
 Group
 Quadrilateral Cutting Planes

Section Cut Group
Group

Section Cut Result Type
 Analysis (F1, F2, F3, M1, M2, M3)
 Design (P, V2, V3, T, M2, M3)

Results Reported at this Location
 Default
 User Defined
X Coordinate
Y Coordinate
Z Coordinate

Coordinate System

Units

Results Reported Are On This Side of Elements
 Positive 3 Axis Side of Quadrilateral
 Negative 3 Axis Side of Quadrilateral

Quadrilateral Cutting Planes
Number of Quadrilaterals
Currently Displayed Quadrilateral: 1

Point	X	Y	Z
1	-16,	9,	0,5
2	-16,	-12,	0,5
3	16,	-12,	0,5
4	16,	9,	0,5

Section cut results are reported for all elements that are fully cut by quadrilaterals and have their associated objects included in the section cut group.

Figura 5-9 – Aplicação do “Section Cut” – Elevação +0,00 m.

Section Cut Data

Edit

Section Cut Name

Section Cut Defined By
 Group
 Quadrilateral Cutting Planes

Section Cut Group
Group

Section Cut Result Type
 Analysis (F1, F2, F3, M1, M2, M3)
 Design (P, V2, V3, T, M2, M3)

Results Reported at this Location
 Default
 User Defined
X Coordinate
Y Coordinate
Z Coordinate

Coordinate System

Units

Results Reported Are On This Side of Elements
 Positive 3 Axis Side of Quadrilateral
 Negative 3 Axis Side of Quadrilateral

Quadrilateral Cutting Planes
Number of Quadrilaterals
Currently Displayed Quadrilateral: 1

Point	X	Y	Z
1	-16,	9,	6,5
2	-16,	-12,	6,5
3	16,	-12,	6,5
4	16,	9,	6,5

Section cut results are reported for all elements that are fully cut by quadrilaterals and have their associated objects included in the section cut group.

Figura 5-10 – Aplicação do “Section Cut” – Elevação +6,00 m.

Section Cut Data

Edit

Section Cut Name

Section Cut Defined By
 Group
 Quadrilateral Cutting Planes

Section Cut Group
Group

Section Cut Result Type
 Analysis (F1, F2, F3, M1, M2, M3)
 Design (P, V2, V3, T, M2, M3)

Results Reported at this Location
 Default
 User Defined
X Coordinate
Y Coordinate
Z Coordinate

Coordinate System

Units

Results Reported Are On This Side of Elements
 Positive 3 Axis Side of Quadrilateral
 Negative 3 Axis Side of Quadrilateral

Quadrilateral Cutting Planes
Number of Quadrilaterals
Currently Displayed Quadrilateral: 1

Point	X	Y	Z
1	-16,	9,	8,5
2	-16,	-12,	8,5
3	16,	-12,	8,5
4	16,	9,	8,5

Section cut results are reported for all elements that are fully cut by quadrilaterals and have their associated objects included in the section cut group.

Figura 5-11 – Aplicação do “Section Cut” – Elevação +8,00 m.

Section Cut Data

Edit

Section Cut Name

Section Cut Defined By
 Group
 Quadrilateral Cutting Planes

Section Cut Group
Group

Section Cut Result Type
 Analysis (F1, F2, F3, M1, M2, M3)
 Design (P, V2, V3, T, M2, M3)

Results Reported at this Location
 Default
 User Defined
X Coordinate
Y Coordinate
Z Coordinate

Coordinate System

Units

Results Reported Are On This Side of Elements
 Positive 3 Axis Side of Quadrilateral
 Negative 3 Axis Side of Quadrilateral

Quadrilateral Cutting Planes
Number of Quadrilaterals
Currently Displayed Quadrilateral: 1

Point	X	Y	Z
1	-16,	9,	10,5
2	-16,	-12,	10,5
3	16,	-12,	10,5
4	16,	9,	10,5

Section cut results are reported for all elements that are fully cut by quadrilaterals and have their associated objects included in the section cut group.

Figura 5-12 – Aplicação do “Section Cut” – Elevação +10,00 m.

Section Cut Data

Edit

<p>Section Cut Name <input type="text" value="nivel23,5"/></p> <p>Section Cut Defined By <input type="radio"/> Group <input checked="" type="radio"/> Quadrilateral Cutting Planes</p> <p>Section Cut Group Group <input type="text" value="All"/></p> <p>Section Cut Result Type <input checked="" type="radio"/> Analysis (F1, F2, F3, M1, M2, M3) <input type="radio"/> Design (P, V2, V3, T, M2, M3)</p> <p>Results Reported at this Location <input type="radio"/> Default <input checked="" type="radio"/> User Defined X Coordinate <input type="text" value="0,"/> Y Coordinate <input type="text" value="0,"/> Z Coordinate <input type="text" value="23,5"/></p>	<p>Coordinate System <input type="text" value="GLOBAL"/></p> <p>Units <input type="text" value="KN, m, C"/></p> <p>Results Reported Are On This Side of Elements <input checked="" type="radio"/> Positive 3 Axis Side of Quadrilateral <input type="radio"/> Negative 3 Axis Side of Quadrilateral</p> <p>Quadrilateral Cutting Planes Number of Quadrilaterals <input type="text" value="1"/> Currently Displayed Quadrilateral: 1 <input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Point</th> <th>X</th> <th>Y</th> <th>Z</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>-16,</td> <td>9,</td> <td>24,</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>-16,</td> <td>-12,</td> <td>24,</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>16,</td> <td>-12,</td> <td>24,</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>16,</td> <td>9,</td> <td>24,</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;"><input type="button" value="Check For Legal Quadrilateral"/></p> <p>Section cut results are reported for all elements that are fully cut by quadrilaterals and have their associated objects included in the section cut group.</p>	Point	X	Y	Z	1	-16,	9,	24,	2	-16,	-12,	24,	3	16,	-12,	24,	4	16,	9,	24,
Point	X	Y	Z																		
1	-16,	9,	24,																		
2	-16,	-12,	24,																		
3	16,	-12,	24,																		
4	16,	9,	24,																		

Figura 5-13 – Aplicação do “Section Cut” – Elevação +23,50 m.

6. RESULTADOS OBTIDOS NO MODELO COMPLETO

São a seguir mostrados os resultados das análises efetuadas com o modelo completo do prédio, considerando-se os parâmetros definidos no item 5. As análises foram realizadas tanto pelo método espectral como pelo método do domínio do tempo.

Na análise espectral utiliza-se como critério para a combinação das contribuições modais o método CQC. Já para a combinação dos efeitos direcionais é utilizado o critério SRSS.

A Figura 6-1 apresenta os resultados da força axial, tanto para a análise espectral quanto para a análise no histórico do tempo.

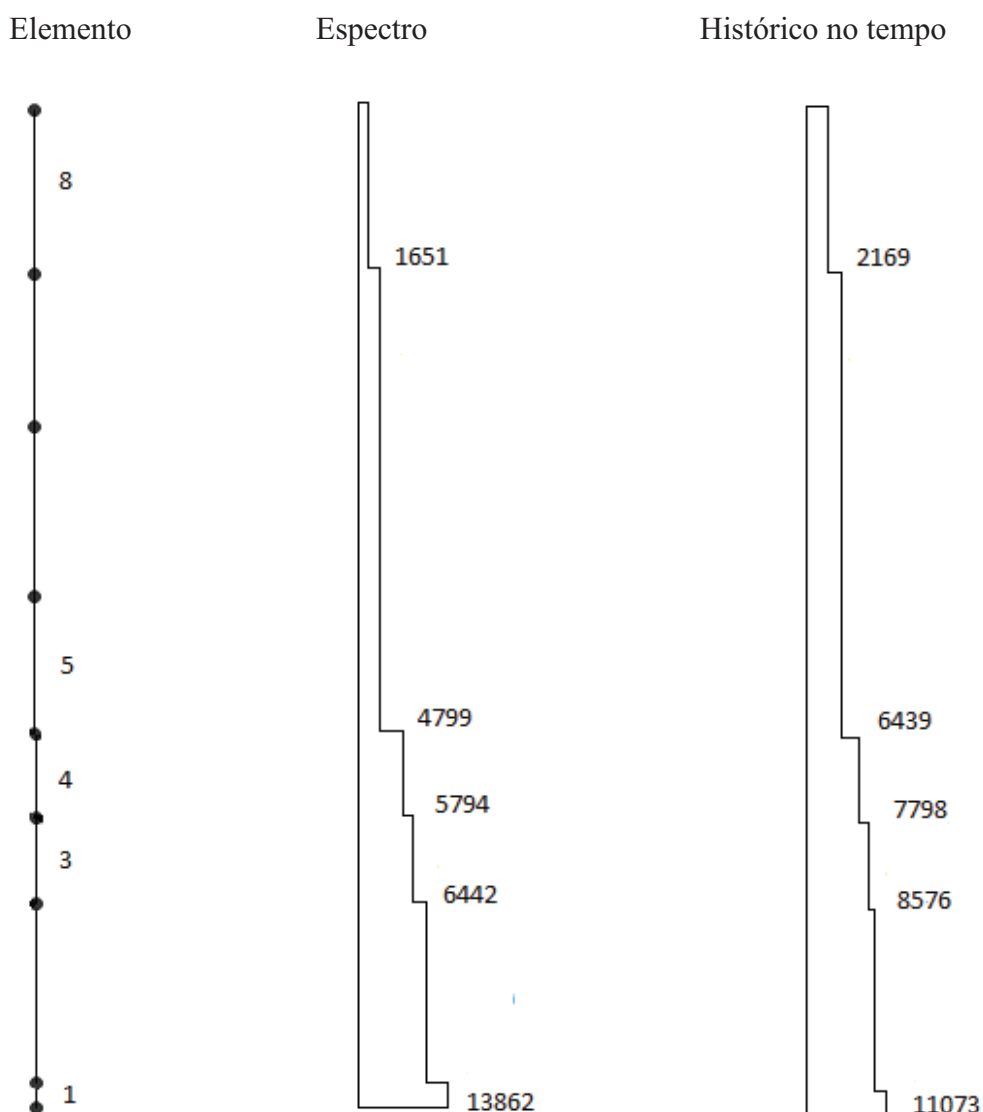


Figura 6-1 – Diagrama de esforços axiais – unidade: kN.

A Figura 6-2 apresenta os resultados da força cortante na direção x, tanto para a análise espectral quanto para a análise no histórico do tempo.

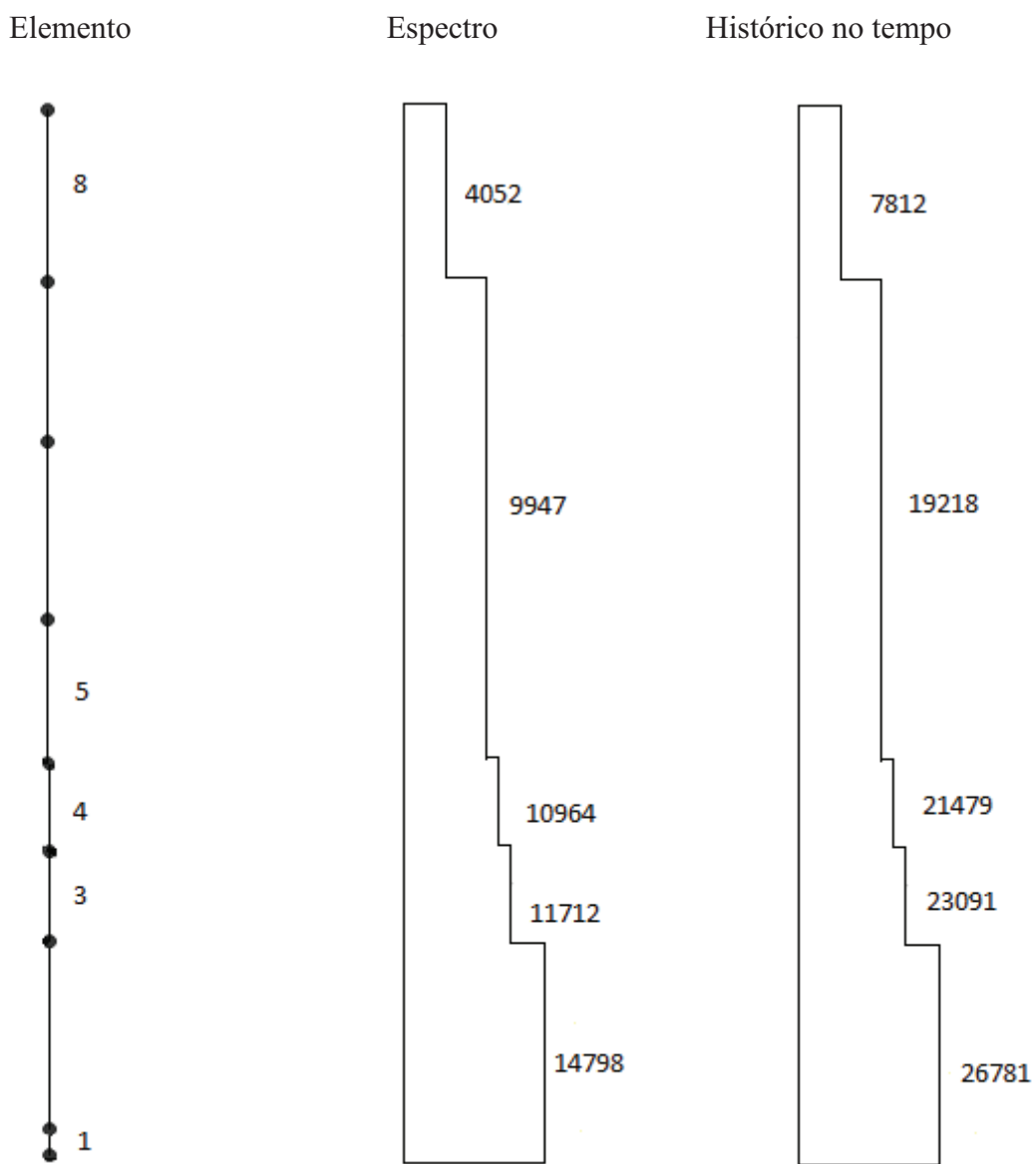


Figura 6-2 – Diagrama de esforços cortantes na direção X – unidade: kN.

A Figura 6-3 apresenta os resultados da força cortante na direção y, tanto para a análise espectral quanto para a análise no histórico do tempo.

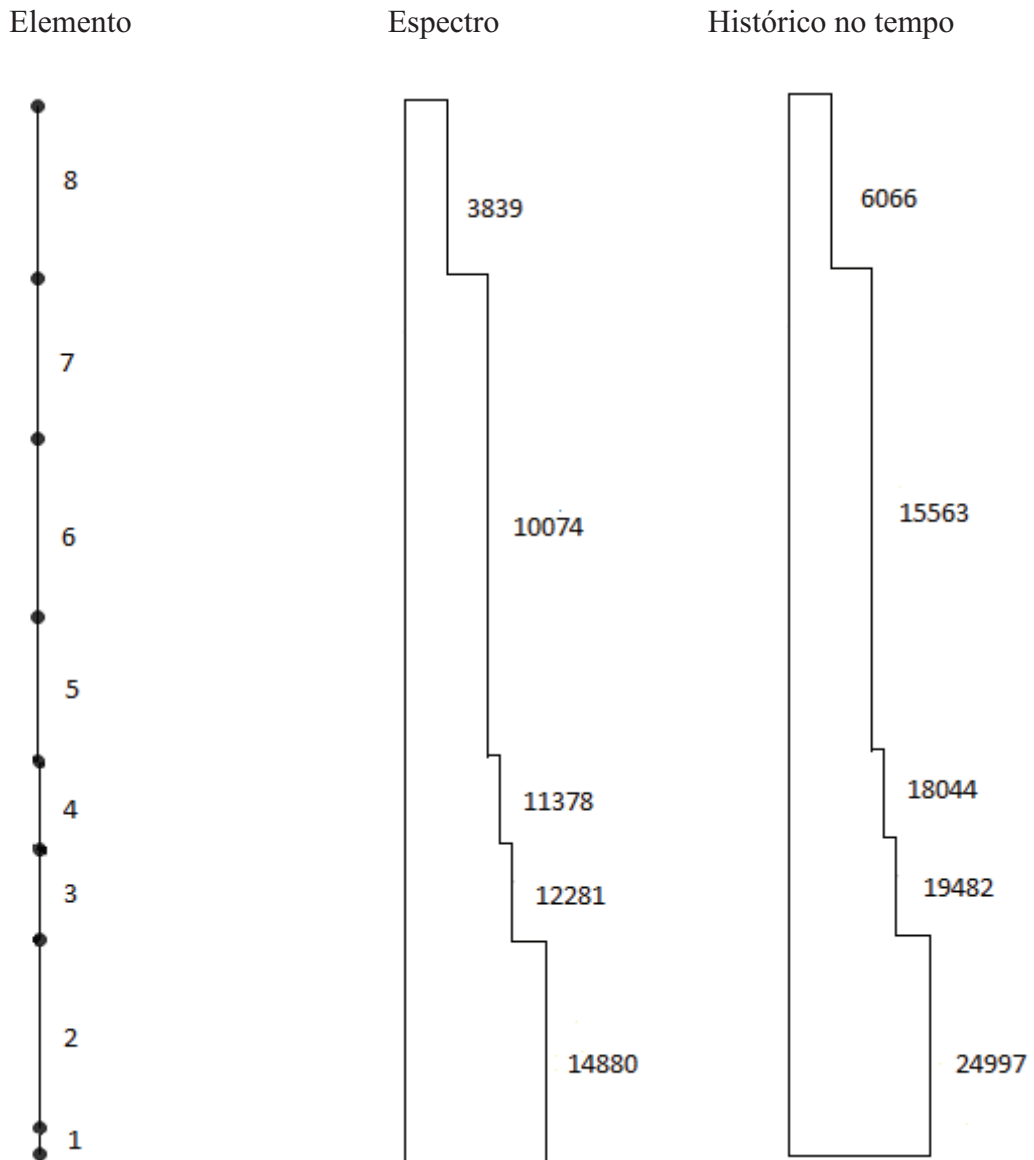


Figura 6-3 – Diagrama de esforços cortantes na direção Y – unidade: kN.

A Figura 6-4 apresenta os resultados do momento de torção, tanto para a análise espectral quanto para a análise no histórico do tempo.

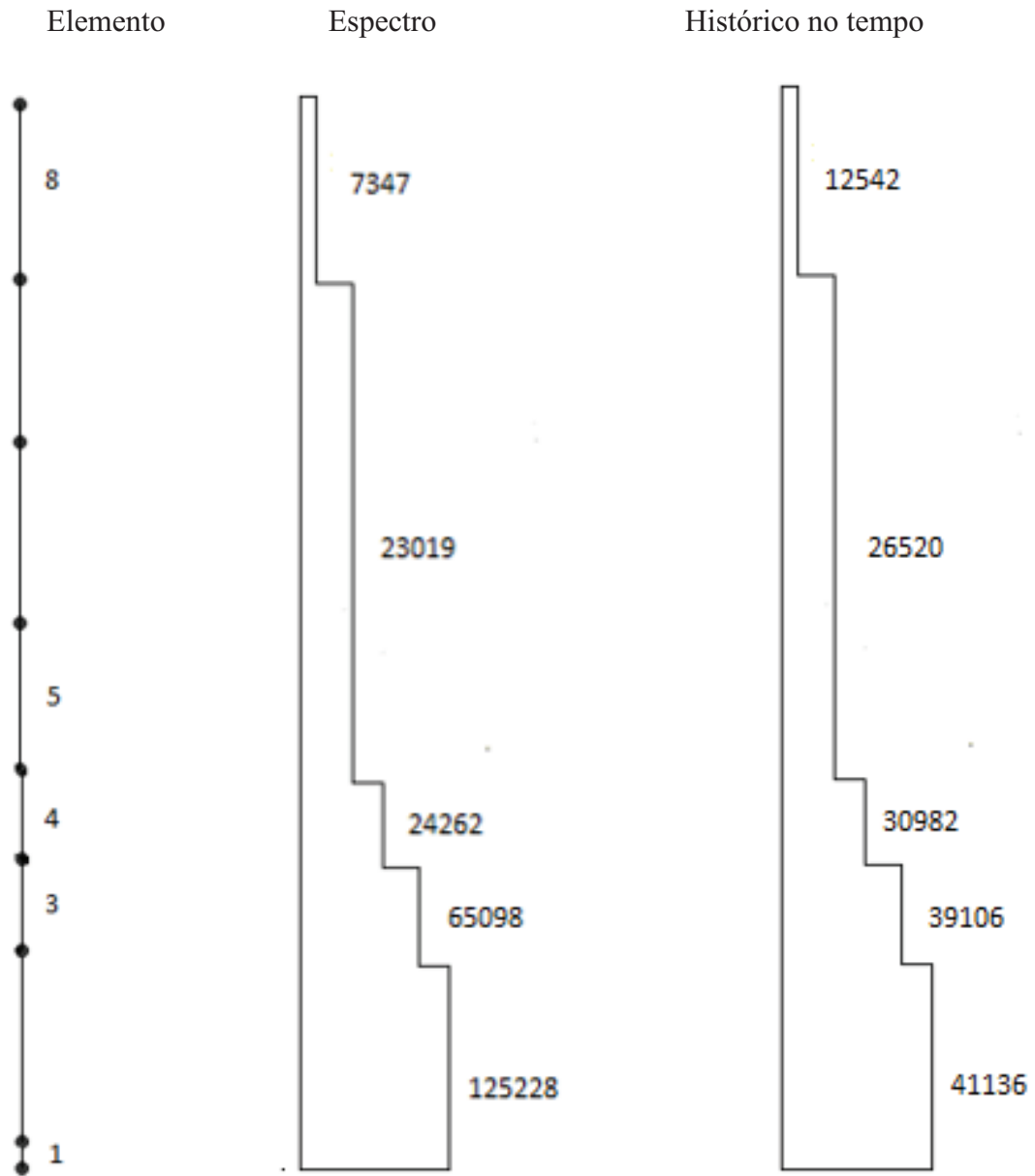


Figura 6-4 – Diagrama de momentos de torção na direção Z – unidade: kNm.

A Figura 6-5 apresenta os resultados do momento fletor na direção x, tanto para a análise espectral quanto para a análise no histórico do tempo.

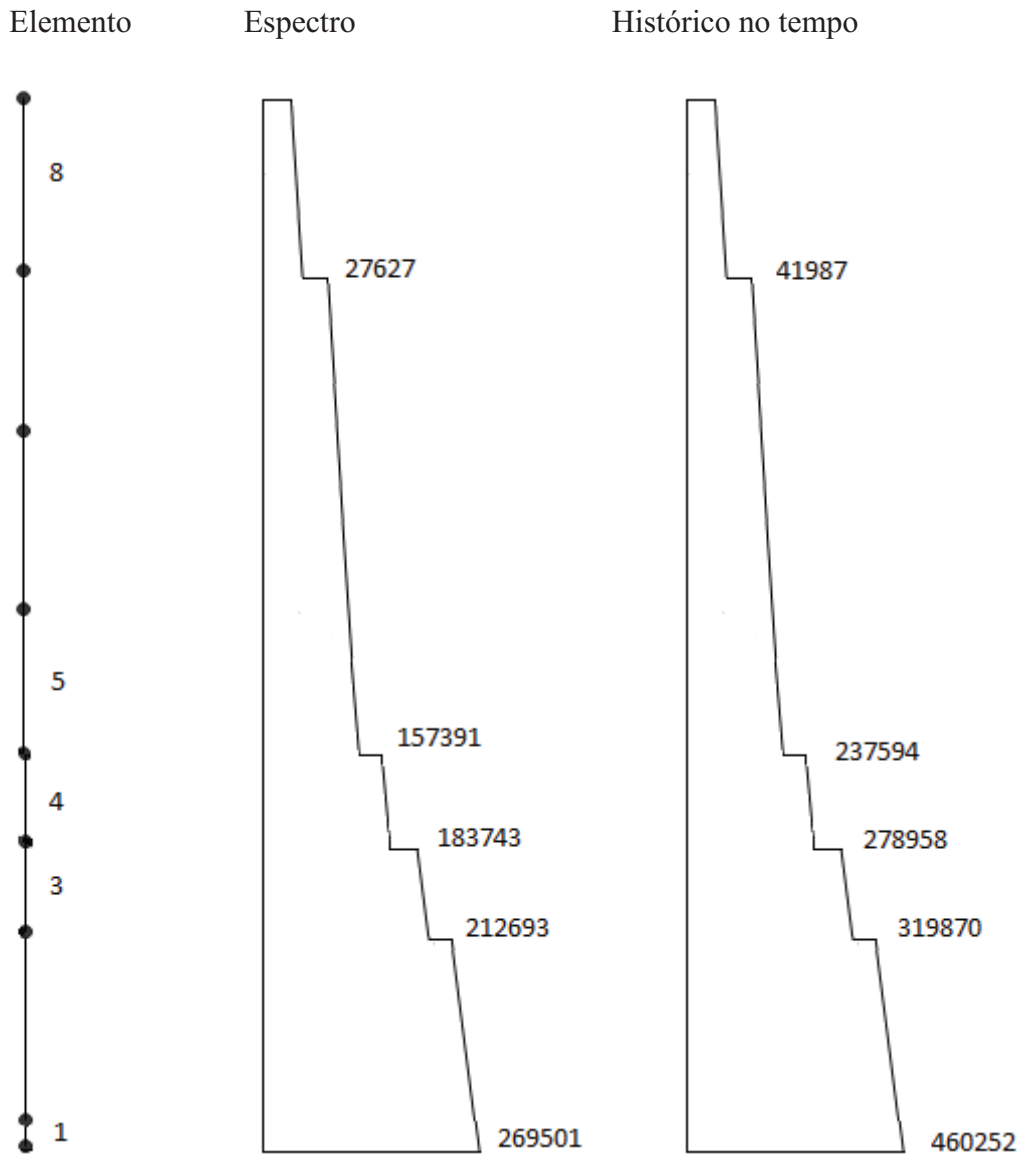


Figura 6-5 – Diagrama de momentos fletores na direção X – unidade: kNm.

A Figura 6-6 apresenta os resultados do momento fletor y, tanto para a análise espectral quanto para a análise no histórico do tempo.

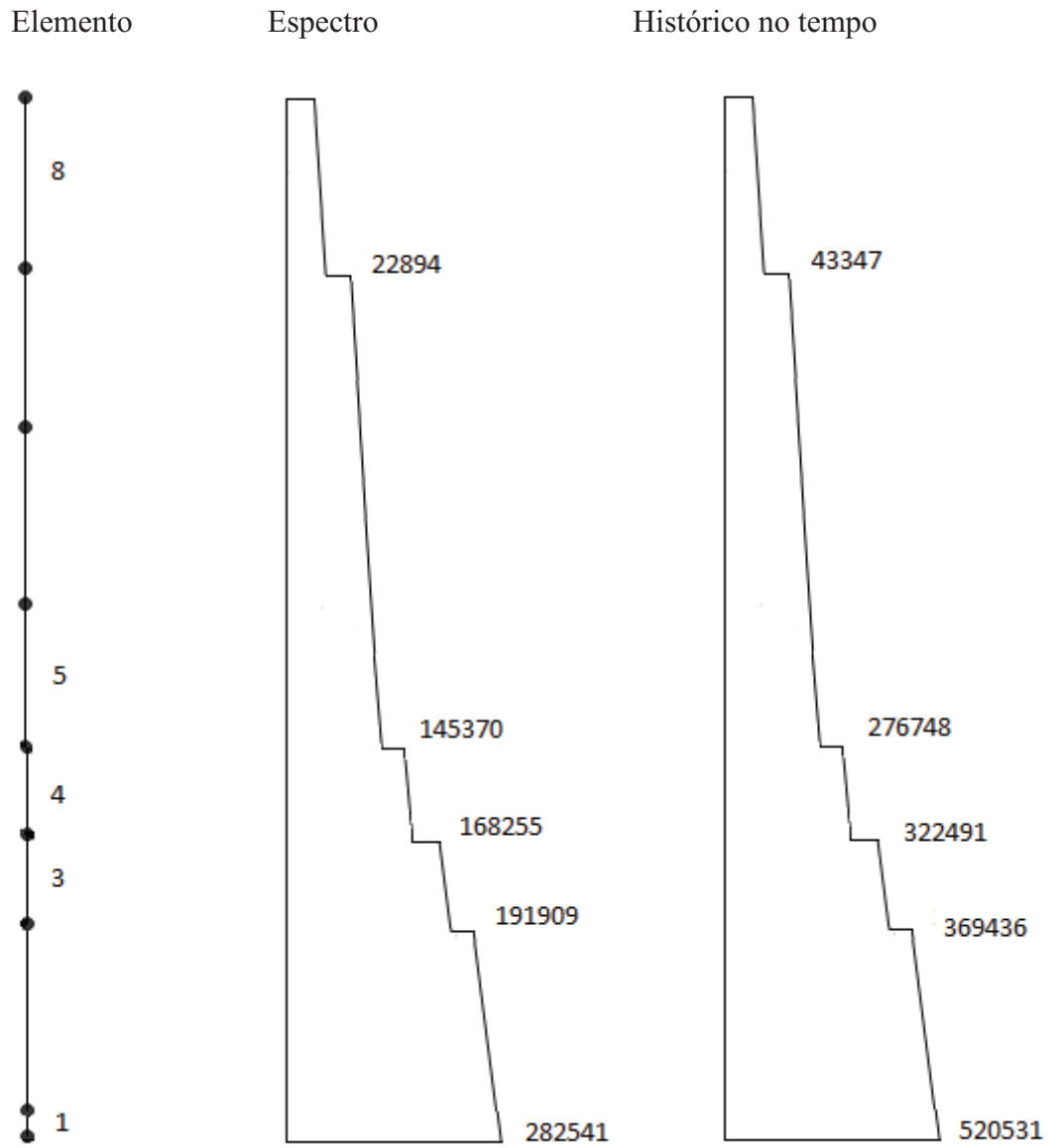


Figura 6-6 – Diagrama de momentos fletores na direção Y – unidade: kNm.

A Tabela 6-1 e a Tabela 6-2 apresentam os quadros resumos com as solicitações obtidas para o modelo completo, para os casos de análise espectral e análise no domínio do tempo.

Tabela 6-1 – Solicitações obtidas por meio do modelo completo – análise espectral

Elevação	Axial(kN)	Cortante X (kN)	Cortante Y (kN)	Torção (kNm)	Momento XX (kNm)	Momento YY (kNm)
Térreo	13862	14798	14880	125228	269501	282541
Nível 6	6442	11712	12281	65098	212693	191909
Nível 8	5794	10964	11378	24262	183743	168255
Nível 10	4799	9947	10074	23019	157391	145370
Nível 23,5	1651	4052	3839	7347	27627	22894

Tabela 6-2 – Solicitações obtidas por meio do modelo completo – análise no histórico do tempo

Elevação	Axial(kN)	Cortante X (kN)	Cortante Y (kN)	Torção (kNm)	Momento XX (kNm)	Momento YY (kNm)
Térreo	11073	26781	24997	41136	460252	520531
Nível 6	8576	23091	19482	39106	319870	369436
Nível 8	7798	21479	18044	30982	278958	322491
Nível 10	6439	19218	15563	26520	237594	276748
Nível 23,5	2169	7812	6066	12542	41987	43347

A Figura 6-7 apresenta os deslocamentos para a direção X tanto para a análise espectral quanto para a análise no histórico do tempo.

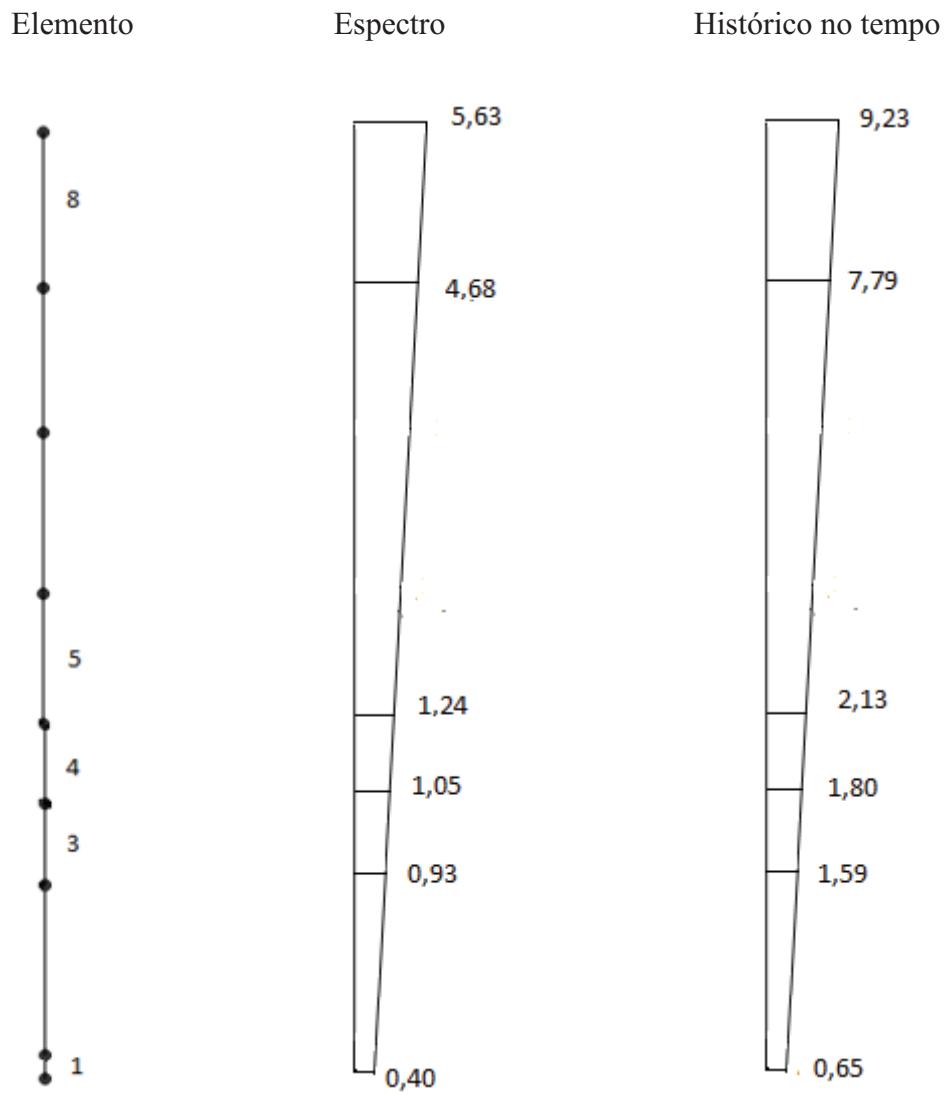


Figura 6-7 – Diagrama de deslocamentos na direção X – unidade: mm.

A Figura 6-8 apresenta os deslocamentos para a direção Y tanto para a análise espectral quanto para a análise no histórico do tempo.

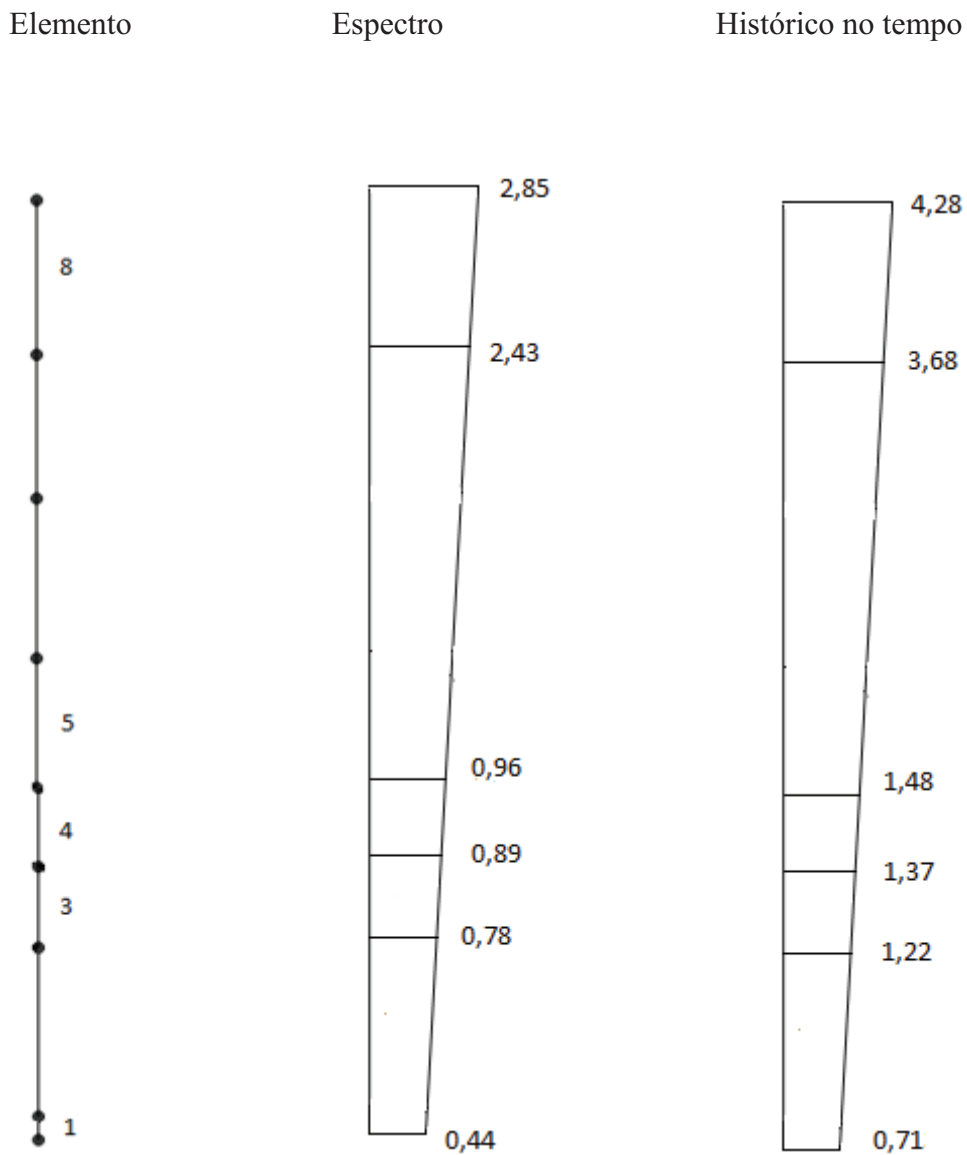


Figura 6-8 – Diagrama de deslocamentos na direção Y – unidade: mm.

A Figura 6-9 apresenta os deslocamentos para a direção Z tanto para a análise espectral quanto para a análise no histórico do tempo.

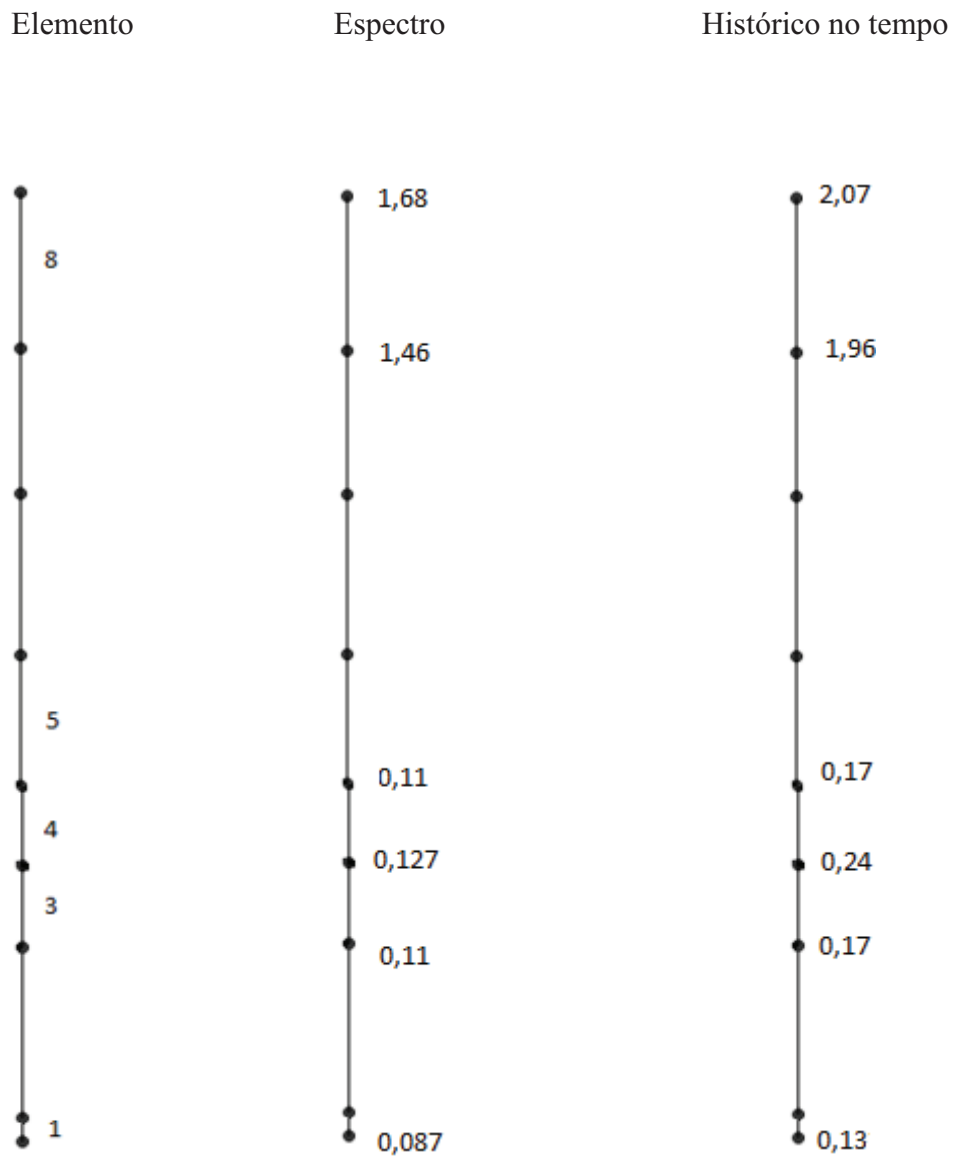


Figura 6-9 – Diagrama de deslocamentos na direção Z – unidade: mm.

Tabela 6-3 – Deslocamentos máximos – modelo completo – análise espectral

Deslocamentos (mm)	Direção X	Direção Y	Direção Z
Cobertura	5,63	2,85	1,68
Nível +23,50	4,68	2,43	1,46
Nível +10,00	1,24	0,96	0,11
Nível +8,00	1,05	0,89	0,13
Nível +0,75	0,93	0,78	0,11
Nível +0,00	0,40	0,44	0,09

Tabela 6-4 – Deslocamentos máximos – modelo completo – análise no histórico do tempo

Deslocamentos (mm)	Direção X	Direção Y	Direção Z
Cobertura	9,23	4,28	2,07
Nível +23,50	7,79	3,68	1,96
Nível +10,00	2,13	1,48	0,17
Nível +8,00	1,80	1,37	0,24
Nível +0,75	1,59	1,22	0,17
Nível +0,00	0,65	0,71	0,13

A Tabela 6-3 apresenta as frequências obtidas para os primeiros 10 modos de vibração da estrutura com o modelo completo, e a Tabela 6-4 os respectivos fatores de participação de massa obtidos com o SAP 2000.

As Figuras 6-10 a 6-12 apresentam, respectivamente, o modelo completo não deformado e as deformações do primeiro e do segundo modos de vibração.

Para a comparação de resultados observa-se que as duas primeiras frequências do modelo completo (ver Tabela 6-5) correspondem, respectivamente, à primeira 4,02 Hz e à terceira 6,32 Hz frequências do modelo simplificado (ver Tabela 4-5). Ressalta-se que a comparação entre modos dos dois modelos é bastante dificultada pelos inúmeros efeitos locais que se apresentam no modelo completo, o que já pode ser observado no segundo modo de vibração.

Tabela 6-5 – Frequências para o modelo completo

Modelo Completo	
Modo de Vibração	Frequência (Hz)
1	4,12
2	5,60
3	7,20
4	7,46
5	8,09
6	8,50
7	8,97
8	9,38
9	9,49
10	9,84

Tabela 6-6 – Fatores de participação de massa para o modelo completo

TABLE: Modal Participating Mass Ratios						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	0,24244	0,00082	0,50415	0,00012
MODAL	Mode	2	0,17829	0,60774	0,00055	0,00000
MODAL	Mode	3	0,13761	0,00013	0,00006	0,00621
MODAL	Mode	4	0,13400	0,00109	0,01435	0,00070
MODAL	Mode	5	0,12356	0,00171	0,00049	0,00168
MODAL	Mode	6	0,11766	0,00359	0,00010	0,00276
MODAL	Mode	7	0,11142	0,00003	0,00032	0,04871
MODAL	Mode	8	0,10658	0,00158	0,00228	0,00155
MODAL	Mode	9	0,10531	0,00111	0,00903	0,11024
MODAL	Mode	10	0,10159	0,02074	0,00083	0,00069

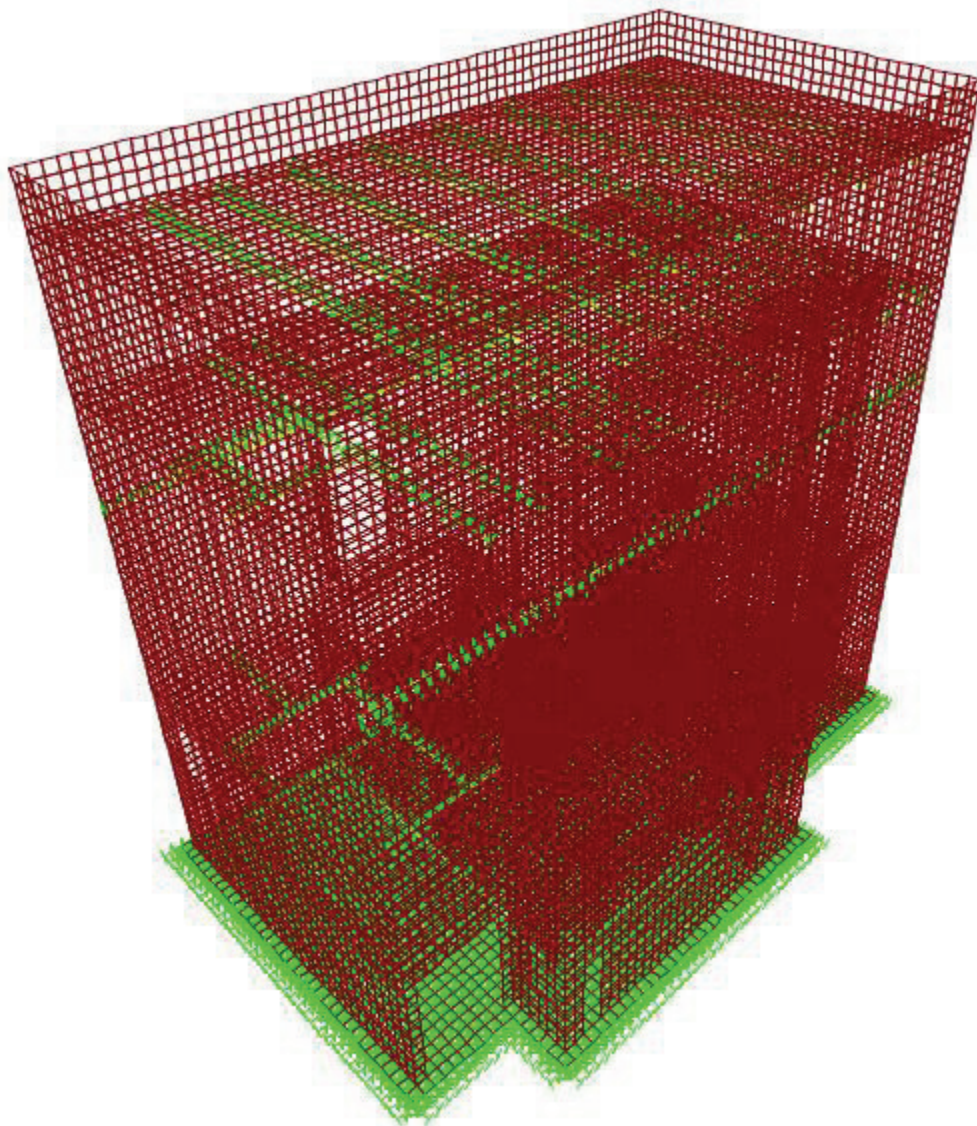


Figura 6-10 – Modelo completo – estrutura indeformada.

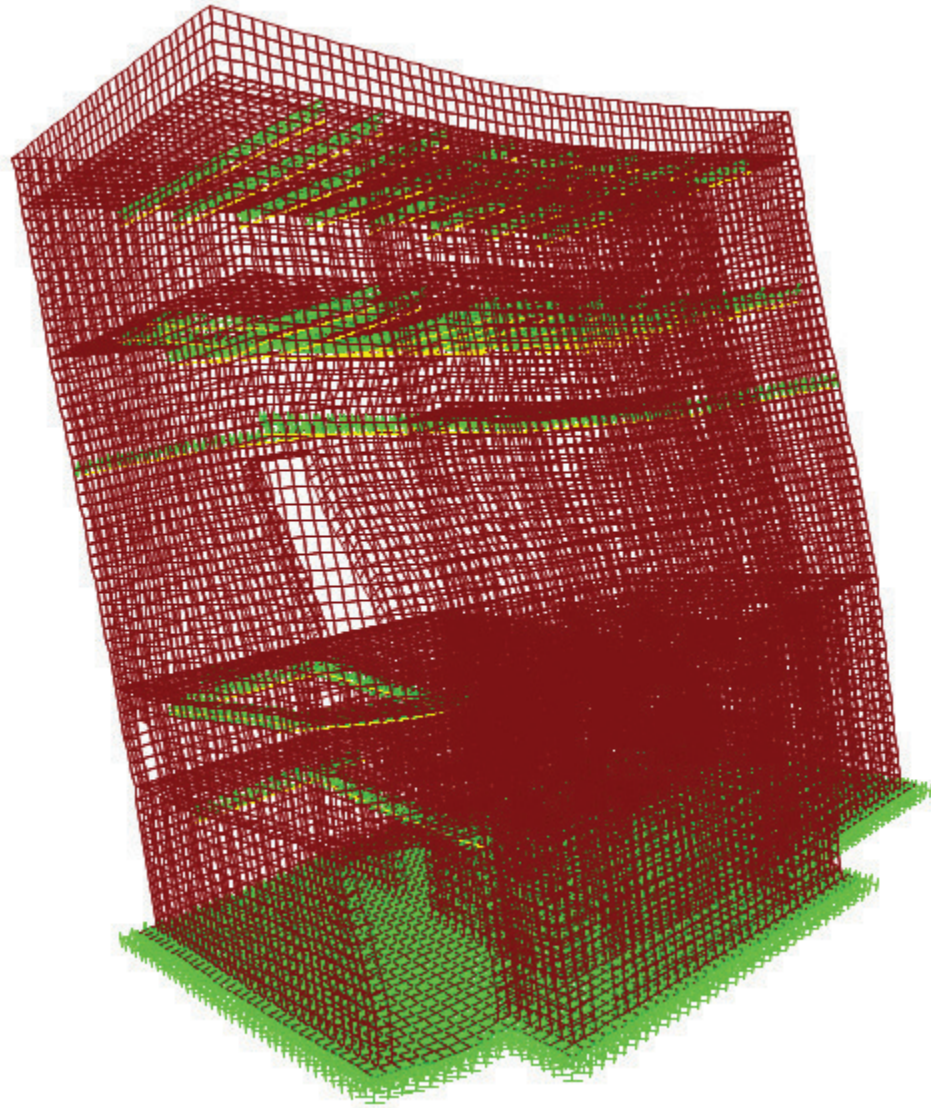


Figura 6-11 – Modelo completo – primeiro modo de vibração.

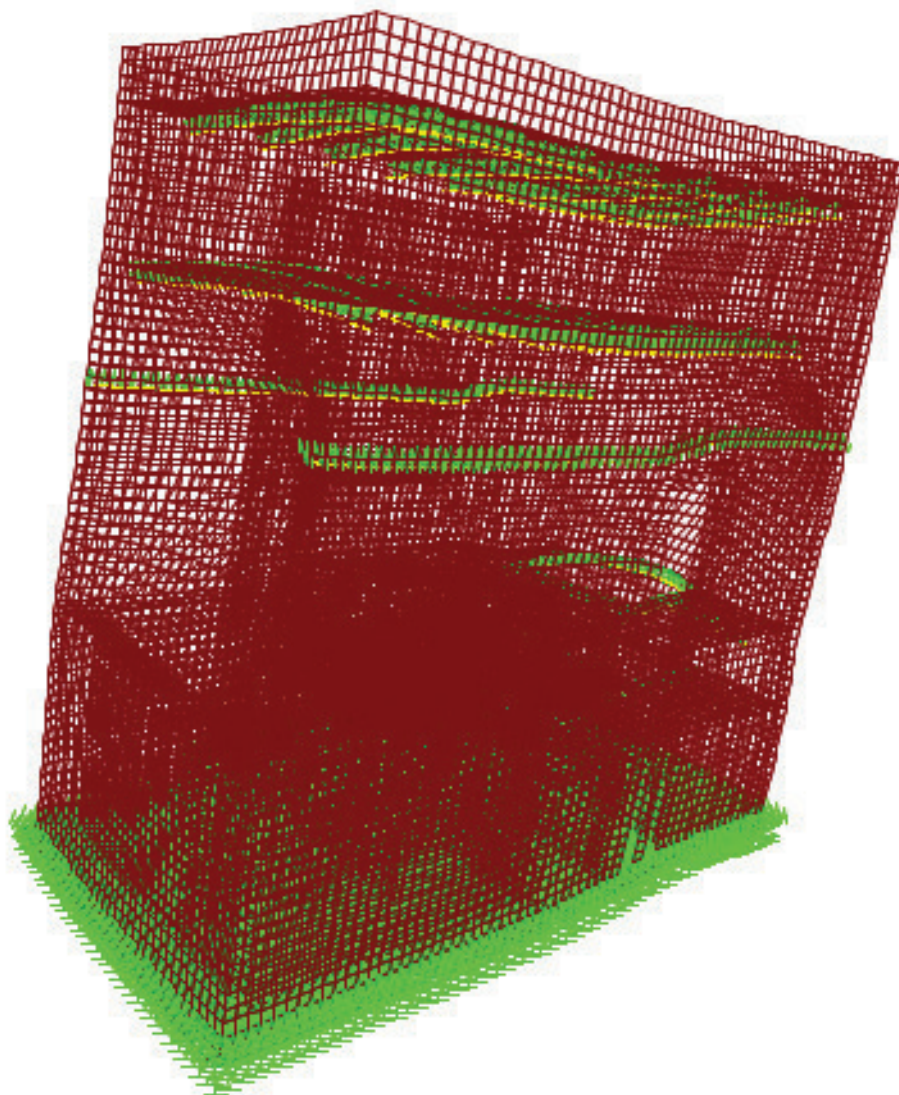


Figura 6-12 – Modelo completo – segundo modo de vibração.

7. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NOS MODELOS SIMPLIFICADO E COMPLETO

7.1. Resumo dos resultados

Neste item, apresenta-se o resumo dos resultados obtidos nos itens 4 e 6, para que seja realizada a comparação dos valores obtidos com o modelo simplificado e com o modelo completo, considerando a análise espectral e a análise com histórico no tempo. A sigla MS significa modelo simplificado e MC modelo completo.

A Figura 7-1 apresenta os resultados obtidos para a força axial, nas quatro análises realizadas.

Tabela 7-1 – Forças axiais para os modelos simplificado e completo – Unidade: kN.

Força axial (kN)	Análise Espectral			Análise com histórico no Tempo		
	MS	MC	MS/MC	MS	MC	MS/MC
EL 0,00 = Elemento 1	12811	13862	0,92	14080	11073	1,27
EL 6,00 = Elemento 3	7777	6442	1,21	7615	8576	0,89
EL 8,00 = Elemento 4	6338	5794	1,09	5904	7798	0,76
EL1 0,00 = Elemento 5	5034	4799	1,05	4406	6439	0,68
EL 23,50 = Elemento 8	1449	1651	0,88	1212	2169	0,56

A Figura 7-1 apresenta o gráfico da relação MS/MC obtido para a força axial em função das elevações dos pavimentos da estrutura, para as análises espectral e no histórico do tempo.

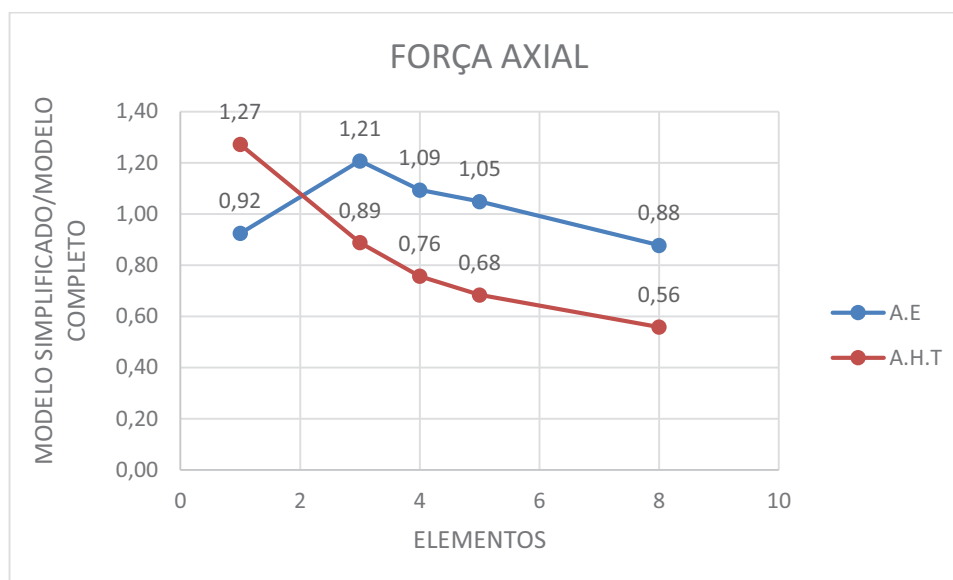


Figura 7-1 – Relação MS/MC – Força Axial

A Tabela 7-2 apresenta os resultados obtidos, para as forças cortantes na direção X, nas quatro análises realizadas.

Tabela 7-2 – Forças cortantes X para os modelos simplificado e completo – Unidade: kN.

Força Cortante X (kN)	Análise Espectral			Análise com histórico no tempo		
	MS	MC	MS/MC	MS	MC	MS/MC
EL 0,00 = Elemento 1	13025	14798	0,88	13861	26781	0,52
EL 6,00 = Elemento 3	9009	11712	0,77	8638	23091	0,37
EL 8,00 = Elemento 4	7941	10964	0,72	7910	21479	0,37
EL1 0,00 = Elemento 5	7015	9947	0,71	7501	19218	0,39
EL 23,50 = Elemento 8	2636	4052	0,65	3027	7812	0,39

A Figura 7-2 apresenta o gráfico da relação MS/MC obtido para a força cortante X em função das elevações dos pavimentos da estrutura, para as análises espectral e no histórico do tempo.

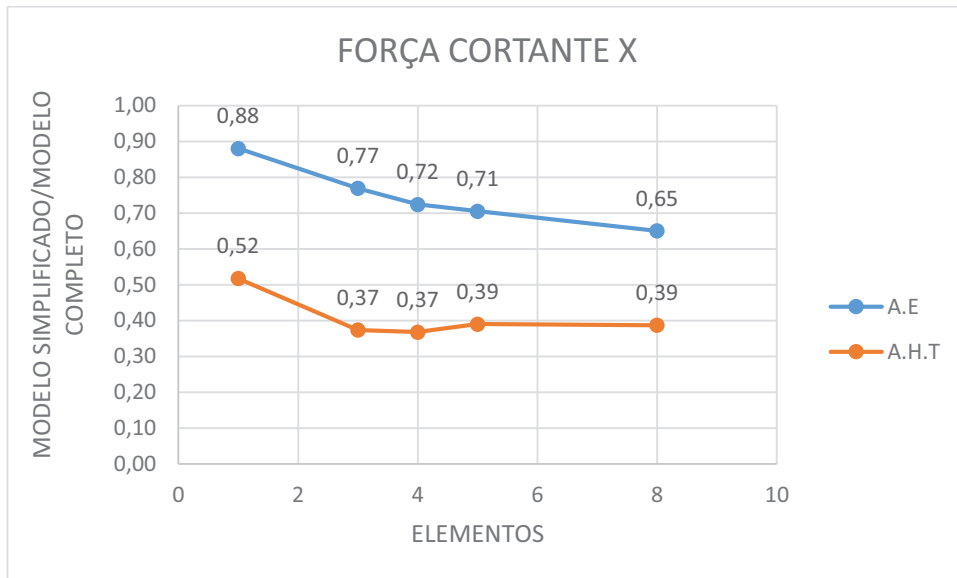


Figura 7-2 – Relação MS/MC – Força Cortante X

A Tabela 7-3 apresenta os resultados obtidos, para as forças cortantes na direção Y, nas quatro análises realizadas.

Tabela 7-3 – Forças cortantes Y para os modelos simplificado e completo – Unidade: kN.

Força Cortante Y (kN)	Análise Espectral			Análise com histórico no tempo		
	MS	MC	MS/MC	MS	MC	MS/MC
EL 0,00 = Elemento 1	16645	14880	1,12	18777	24997	0,75
EL 6,00 = Elemento 3	11267	12281	0,92	13212	19482	0,68
EL 8,00 = Elemento 4	9627	11378	0,85	11326	18044	0,63
EL1 0,00 = Elemento 5	8109	10074	0,80	9466	15563	0,61
EL 23,50 = Elemento 8	2747	3839	0,72	3115	6066	0,51

A Figura 7-3 apresenta o gráfico da relação MS/MC obtido para a força cortante Y em função das elevações dos pavimentos da estrutura, para as análises espectral e no histórico do tempo.

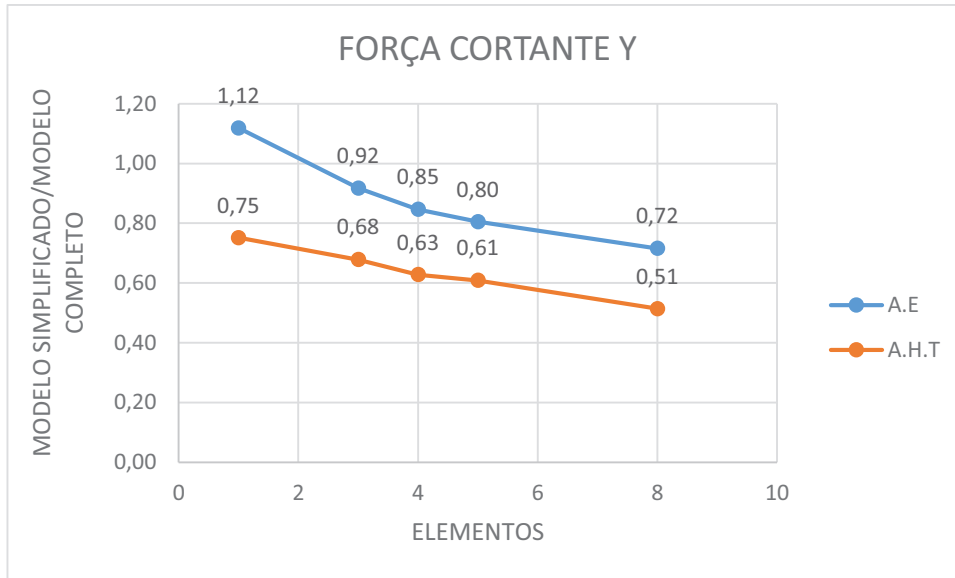


Figura 7-3 – Relação MS/MC – Força Cortante Y

A Tabela 7-4 apresenta os resultados obtidos, para os momentos fletores na direção X, nas quatro análises realizadas.

Tabela 7-4 – Momentos fletores X para os modelos simplificado e completo – Unidade: kNm

Momento Fletor X (kNm)	Análise Espectral			Análise com histórico no tempo		
	MS	MC	MS/MC	MS	MC	MS/MC
EL 0,00 = Elemento 1	279800	269501	1,04	327977	460252	0,71
EL 6,00 = Elemento 3	189566	212693	0,89	205672	319870	0,64
EL 8,00 = Elemento 4	164188	183743	0,89	175467	278958	0,63
EL1 0,00 = Elemento 5	135448	157391	0,86	152061	237594	0,64
EL 23,50 = Elemento 8	23230	27627	0,84	25279	41987	0,60

A Figura 7-4 apresenta o gráfico da relação MS/MC obtido para o momento fletor X em função das elevações dos pavimentos da estrutura, para as análises espectral e no histórico do tempo.

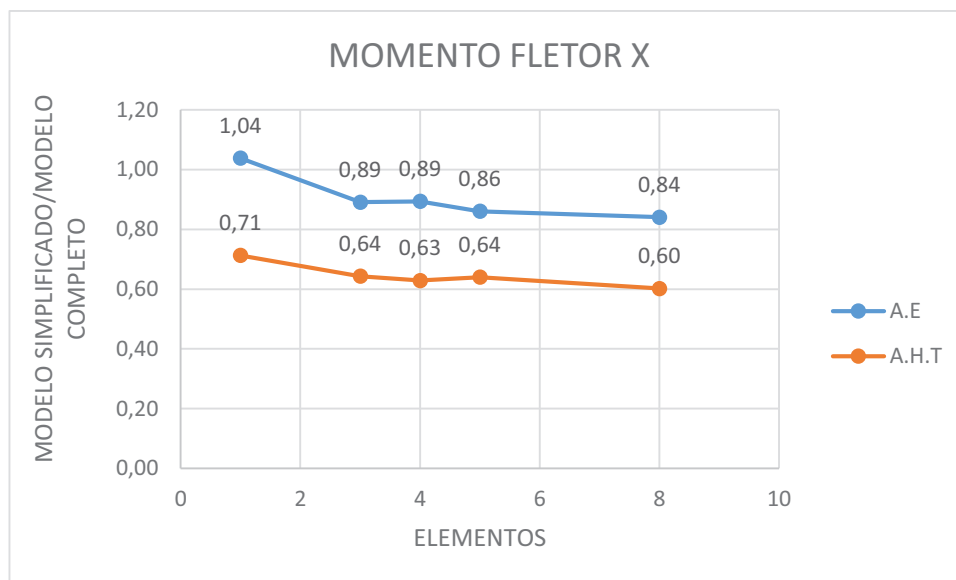


Figura 7-4 – Relação MS/MC – Momento fletor X

A Tabela 7-5 apresenta os resultados obtidos, para os momentos fletores na direção Y, nas quatro análises realizadas.

Tabela 7-5 – Momentos fletores Y para os modelos simplificado e completo – Unidade: kNm

Momento Fletor Y (kNm)	Análise Espectral			Análise com histórico no tempo		
	MS	MC	MS/MC	MS	MC	MS/MC
EL 0,00 = Elemento 1	203005	282541	0,72	206218	520531	0,40
EL 6,00 = Elemento 3	142654	191909	0,74	156617	369436	0,42
EL 8,00 = Elemento 4	125274	168255	0,74	140077	322491	0,43
EL10,00 = Elemento 5	109064	145370	0,75	123125	276748	0,44
EL23,50 = Elemento 8	19323	22894	0,84	22877	43347	0,53

A Figura 7-5 apresenta o gráfico da relação MS/MC obtido para o momento fletor Y em função das elevações dos pavimentos da estrutura, para as análises espectral e no histórico do tempo.

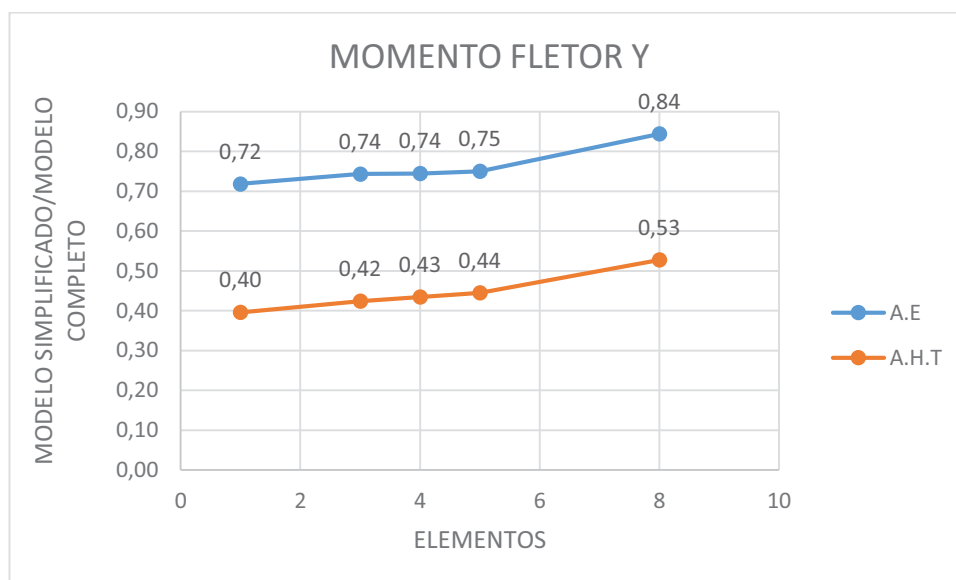


Figura 7-5 – Relação MS/MC – Momento fletor Y

A Tabela 7-6 apresenta os resultados obtidos, para os momentos de torção, nas quatro análises realizadas.

Tabela 7-6 – Momentos de torção para os modelos simplificado e completo – Unidade: kNm

Momento de Torção (kNm)	Análise Espectral			Análise com histórico no tempo		
	MS	MC	MS/MC	MS	MC	MS/MC
EL 0,00 = Elemento 1	78194	299600	0,26	109494	41136	2,66
EL 6,00 = Elemento 3	79073	65098	1,21	93285	39106	2,39
EL 8,00 = Elemento 4	72871	24262	3,00	84786	30982	2,74
EL1 0,00 = Elemento 5	43847	23019	1,90	57900	26520	2,18
EL 23,50 = Elemento 8	13052	7347	1,78	14870	12542	1,19

A Figura 7-6 apresenta o gráfico da relação MS/MC obtido para o momento de Torção em função das elevações dos pavimentos da estrutura, para as análises espectral e no histórico do tempo.

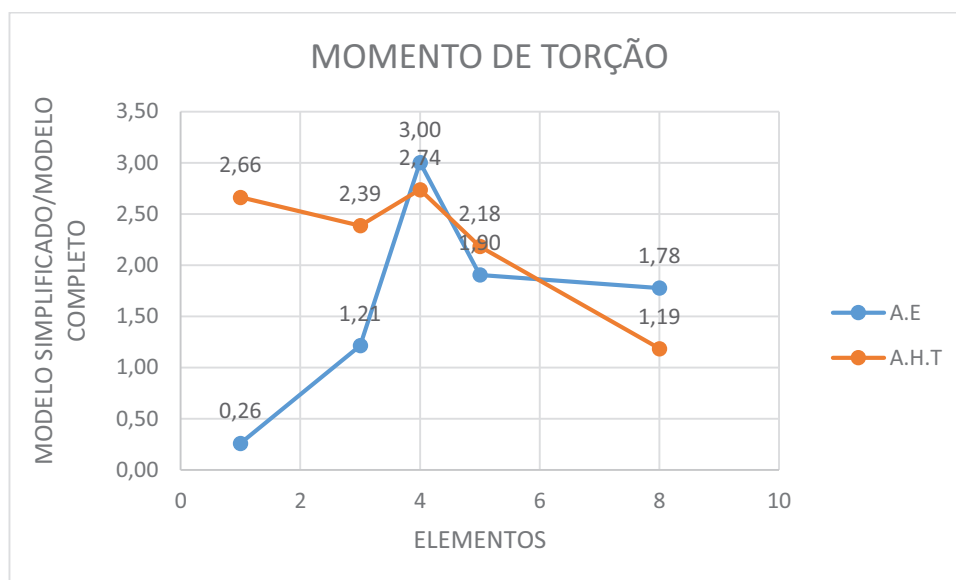


Figura 7-6 – Relação MS/MC – Momento de Torção

A seguir são apresentadas tabelas que contêm os valores os deslocamentos obtidos, para as quatro análises realizadas.

Tabela 7-7 – Deslocamentos X nos modelos simplificado e completo – Unidade: mm

Deslocamentos em X (mm)	Análise Espectral			Análise com histórico no tempo		
	MS	MC	MS/MC	MS	MC	MS/MC
EL 0,00 = Elemento 1	0,39	0,40	0,98	0,66	0,65	1,02
EL 6,00 = Elemento 3	0,88	0,93	0,95	1,31	1,59	0,82
EL 8,00 = Elemento 4	1,10	1,05	1,05	1,61	1,8	0,89
EL10,00 = Elemento 5	1,46	1,24	1,18	2,08	2,13	0,98
EL 23,50 = Elemento 8	4,21	4,68	0,90	4,99	7,79	0,64
Cobertura	5,36	5,63	0,95	6,18	9,23	0,67

A Figura 7-7 apresenta o gráfico da relação MS/MC obtido para os deslocamentos na direção x em função das elevações dos pavimentos da estrutura, para as análises espectral e no histórico do tempo.

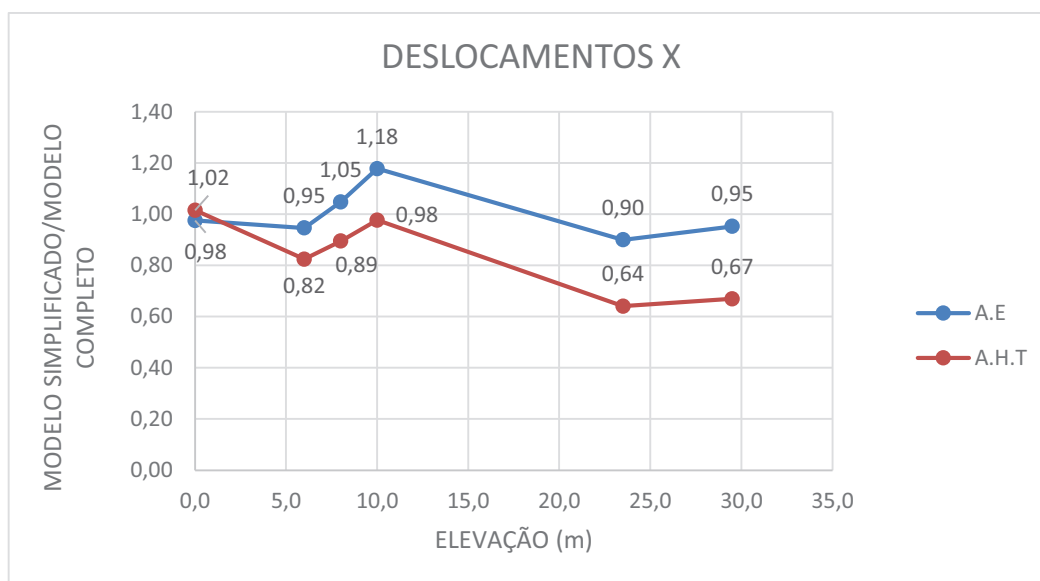


Figura 7-7 – Relação MS/MC – Deslocamentos na direção X

Tabela 7-8 – Deslocamentos Y nos modelos simplificado e completo – Unidade: mm

Deslocamentos em Y (mm)	Análise Espectral			Análise com histórico no tempo		
	MS	MC	MS/MC	MS	MC	MS/MC
EL 0,00 = Elemento 1	0,51	0,44	1,16	0,58	0,71	0,82
EL 6,00 = Elemento 3	0,79	0,78	1,01	0,92	1,22	0,75
EL 8,00 = Elemento 4	0,89	0,89	1,00	1,04	1,37	0,76
EL 10,00 = Elemento 5	0,99	0,96	1,03	1,17	1,48	0,79
EL 23,50 = Elemento 8	2,04	2,43	0,84	2,38	3,68	0,65
Cobertura	2,46	2,85	0,86	2,89	4,28	0,68

A Figura 7-8 apresenta o gráfico da relação MS/MC obtido para os deslocamentos na direção Y em função das elevações dos pavimentos da estrutura, para as análises espectral e no histórico do tempo.

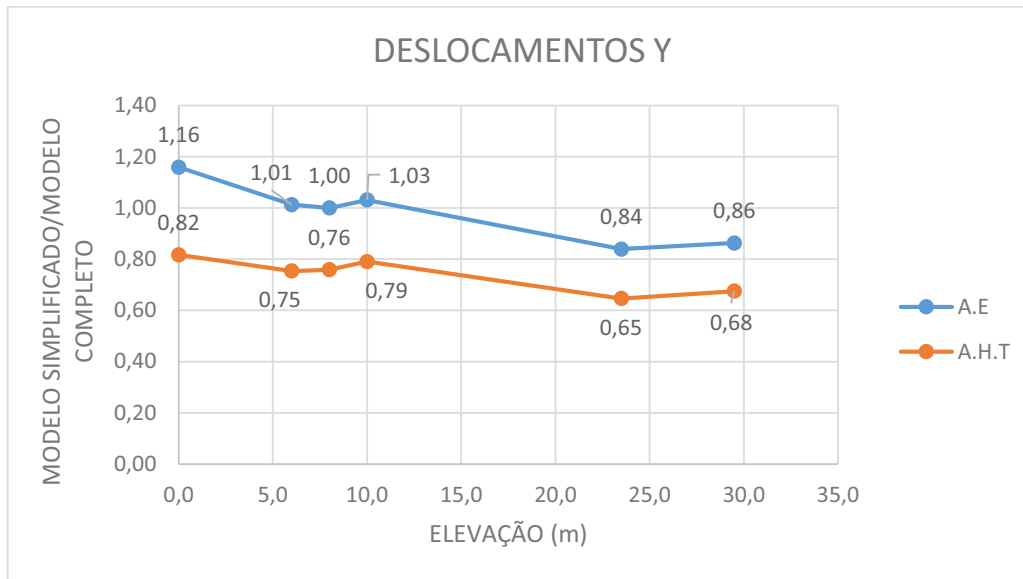


Figura 7-8 – Relação MS/MC – Deslocamentos na direção Y

Tabela 7-9 – Deslocamentos Z nos modelos simplificado e completo – Unidade: mm

Deslocamentos em z (mm)	Análise Espectral			Análise com histórico no tempo		
	MS	MC	MS/MC	MS	MC	MS/MC
EL 0,00 = Elemento 1	0,09	0,09	1,00	0,11	0,13	0,85
EL 6,00 = Elemento 3	0,16	0,11	1,45	0,16	0,17	0,94
EL 8,00 = Elemento 4	0,14	0,13	1,10	0,14	0,24	0,58
EL 10,00 = Elemento 5	0,14	0,11	1,27	0,15	0,17	0,88
EL 23,50 = Elemento 8	0,21	1,46	0,14	0,21	1,96	0,11
Cobertura	0,22	1,68	0,13	0,22	2,07	0,11

A Figura 7-9 apresenta o gráfico da relação MS/MC obtido para os deslocamentos na direção Z em função das elevações dos pavimentos da estrutura, para as análises espectral e no histórico do tempo.

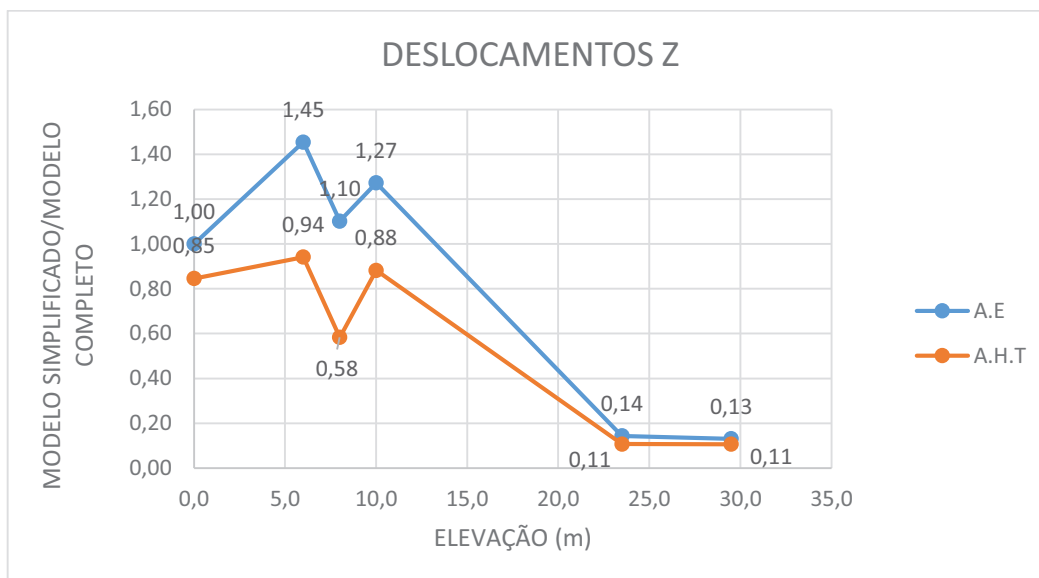


Figura 7-9 – Relação MS/MC – Deslocamentos na direção Z

7.2. Análise dos resultados

Compara-se inicialmente os resultados em termos de deslocamentos.

Nos resultados obtidos com o método espectral nos modelos simplificado e completo, observa-se uma excelente concordância entre eles. A exceção são os resultados obtidos na direção vertical z para o nível +23,50 m e para a cobertura, onde houve uma diferença muito grande entre os valores obtidos com os dois modelos, que pode ser explicada pela grande flexibilidade da laje de cobertura, não capturada pelo modelo simplificado.

Para ilustrar a diferença entre deslocamentos no centro e nas bordas nos níveis +23,50 m e Cobertura, apresenta-se na Figura 7-10 uma vista lateral do 7º modo de vibração do modelo completo (vertical), onde essas diferenças se tornam evidentes.

Apresentam-se também na Figura 7-11 em vista lateral, os máximos deslocamentos obtidos no modelo completo com o método espectral. Ficam evidenciados os efeitos localizados de grandes deslocamentos em regiões mais flexíveis da estrutura, não somente na cobertura, como já comentado, como também na região central das paredes, entre as elevações +10,00 e +23,50, onde surgem grandes deslocamentos horizontais.

A menos dessa diferença devida a um efeito localizado na estrutura, pode-se afirmar que os deslocamentos e acelerações globais são obtidas com muita precisão nos modelos simplificados.

Comparando-se agora resultados obtidos com os históricos de deslocamentos no tempo por integração direta das equações de movimento com os obtidos com o método espectral, observa-se, tanto para o modelo simplificado como para o modelo completo, um certo conservadorismo nos resultados obtidos com o método da integração direta.

Isso pode ser justificado pelo fato de que nenhum terremoto gerado artificialmente consegue reproduzir exatamente o espectro de resposta de projeto, conforme já explicado no item 3.3. Os resultados de uma análise espectral são únicos para um determinado espectro de projeto, mas irão variar no método da integração direta, para cada sismo artificial gerado aleatoriamente, dependendo do maior ou menor conservadorismo associado a cada um deles.

Compara-se a seguir os resultados em termos de forças.

Inicialmente analisando-se os resultados obtidos com o modelo simplificado, observa-se o mesmo conservadorismo nos resultados obtidos e já justificados com o método da integração direta relativamente ao método espectral. Existe uma discrepância maior no que diz respeito aos momentos de torção, já verificada em outras situações similares, e para a qual ainda não se tem uma justificativa adequada.

Relativamente às forças obtidas com o modelo completo, deve-se considerar que os resultados foram obtidos com o recurso “Section Cut” do SAP2000. Na análise espectral os resultados encontrados com esse recurso mostram-se ainda com valor numérico aceitável, dentro da ordem de grandeza esperada. Porém, para os resultados obtidos com o método de integração direta são atingidos valores que não encontram justificativa. Como se trata da avaliação de máximos obtidos em 1500 pontos de integração e ao longo de linhas contendo dezenas de elementos finitos, certamente o critério adotado pelo programa acaba sendo excessivamente conservador, chegando-se assim a resultados que podem ser considerados como incorretos.

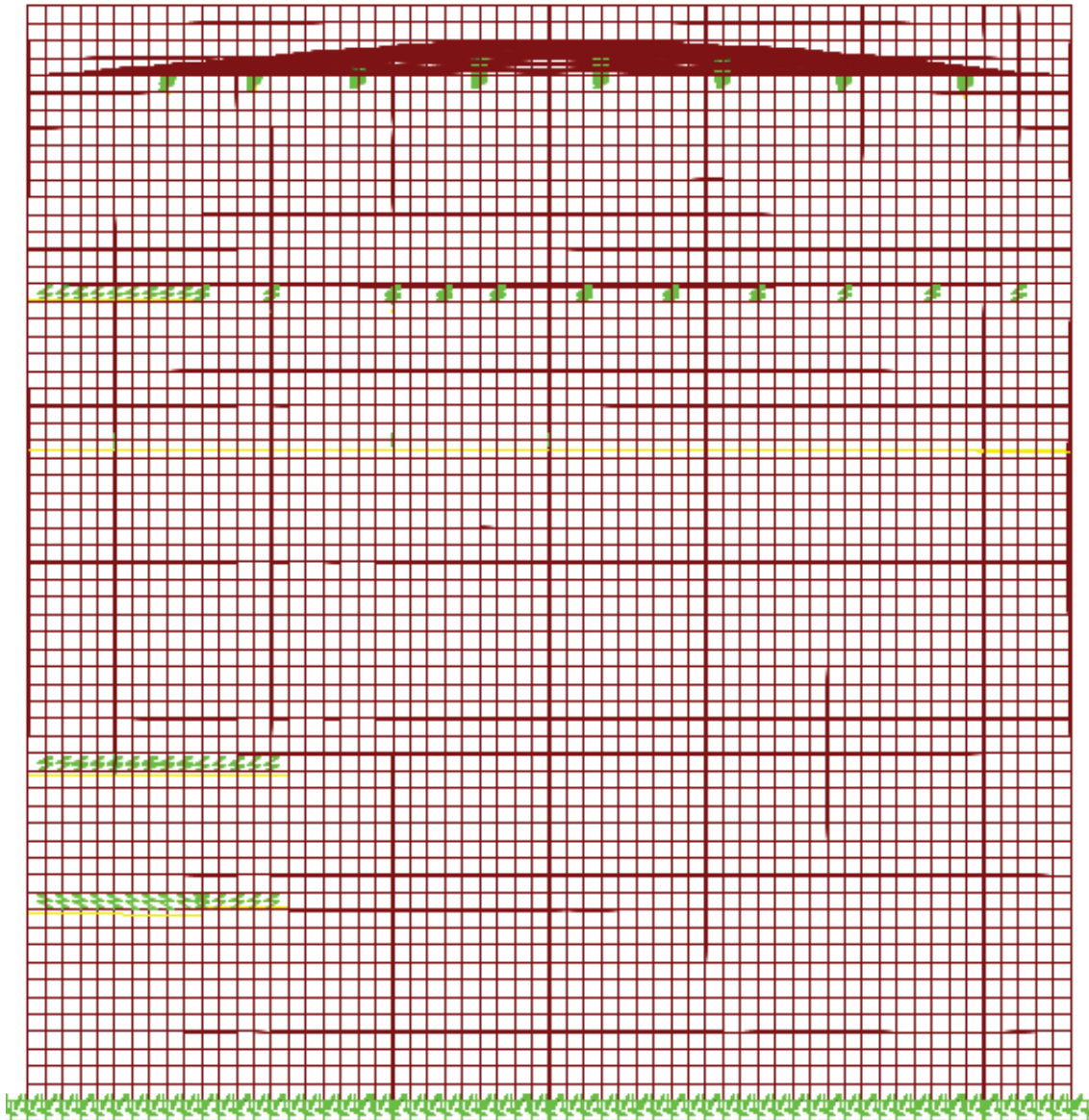


Figura 7-10 – Modelo completo – sétimo modo de vibração

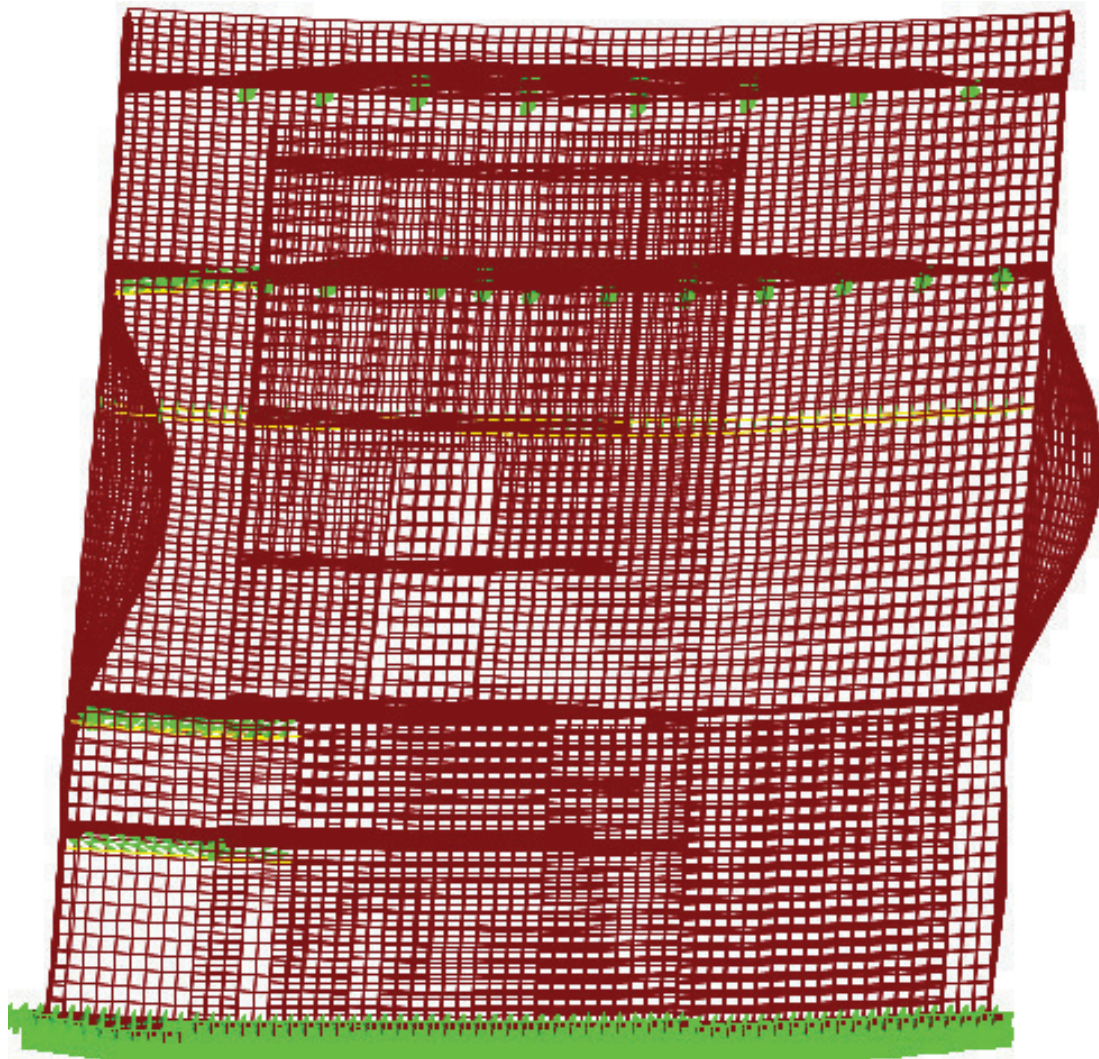


Figura 7-11 – Modelo completo – desplazamientos máximos – método espectral

8. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se um estudo comparativo para a análise sísmica de uma estrutura típica da indústria nuclear, por meio de um modelo simplificado e de um modelo completo. Foram utilizados os métodos de análise espectral e de integração no domínio do tempo. Observa-se que apesar da estrutura escolhida apresentar a grande rigidez típica das estruturas da indústria nuclear, apresenta regiões de maior flexibilidade, como grandes painéis de lajes e paredes, evidenciada na análise dos diversos modos de vibração, que fazem que a análise apresentada não tenha aspectos muito específicos em termos de rigidez.

Após a análise dos resultados apresentadas no item anterior, busca-se responder às duas questões fundamentais colocadas na Introdução deste trabalho:

- qual a segurança assegurada pelas antigas análises em modelos simplificados?
- como interpretar e aplicar corretamente a enorme quantidade de resultados gerados em uma análise dinâmica completa com grandes modelos em elementos finitos?

Respondendo à primeira questão, considere-se que os deslocamentos e acelerações obtidos com os modelos simplificado e completo foram muito próximos. Considere-se também que em uma estrutura de grande rigidez como a analisada, a resposta sísmica é basicamente governada pelos primeiros modos de vibração. Em sendo assim, a metodologia descrita por SANTOS (1992), que consiste em aplicar estaticamente aos modelos estruturais as acelerações máximas obtidas nas análises dinâmicas, o que se mostra conservador para as estruturas de grande rigidez, pode ser aplicada.

Quanto à segunda questão, inicialmente ficou evidente que a aplicação da ferramenta “Section Cut” do SAP2000 a problemas de dinâmica pode oferecer problemas quanto à correção dos resultados. Então, do ponto de vista prático, como aplicar os resultados obtidos em uma análise dinâmica em que há resultados em centenas de elementos finitos, variando ao longo do tempo e com alternância de sinal? A solução, ainda não realizável do ponto de vista da tecnologia atual, só poderia ser encontrada com o dimensionamento em cada instante do tempo, em cada um dos elementos finitos, considerando a combinação das forças sísmicas com outras forças atuantes, por exemplo, de natureza estática.

Dentro da tecnologia disponível atualmente tudo indica que o roteiro da análise deve passar por uma análise dinâmica, com modelos simplificados, obtenção de acelerações nesses modelos, verificação de que a aplicação estática dessas forças conduz a resultados conservadores relativamente a forças e momentos globais obtidos com os modelos simplificados, e aplicação estática destas acelerações a modelos completos dessas estruturas. Nesses modelos completos devem ser avaliados os efeitos locais provocados à estrutura pelas excitações sísmicas.

Como sugestões para futuros trabalhos, considerando-se as conclusões desta Dissertação, fica evidente que há diversos temas ainda em aberto para futuros desenvolvimentos, dentro de linha de modelagem estrutural para a análise sísmica: análise de estruturas com outras características geométricas e de rigidez; consideração de efeitos de não-linearidade física; desenvolvimento de metodologias para dimensionamento estrutural, entre outros possíveis assuntos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE), *ASCE/SEI 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Reston, Virginia, United States, 2010.

ARAI, A., *Estudo comparativo de normas de projetos de estruturas resistentes a sismos*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Projeto de Estruturas, Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), *NBR 15421, Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2006.

CHALRÉO, A. W., *Estudo de Amplificação Sísmica em Solos Estratificados*, Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2012.

CHOPRA, A. K., *Structural Dynamics, Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Chapman & Hall, Fourth edition, 2011.

CODE OF FEDERAL REGULATIONS, *Title 10, Energy, Part 50, Domestic licensing of production and utilization facilities*, 2009.

CODE OF FEDERAL REGULATIONS, *Title 10, Energy, Part 100, Reactor Site Criteria*, 1997.

CSI COMPUTERS & STRUCTURES, INC., *SAP2000, Integrated Software for Structural Analysis & Design, Version 14*. CSI Inc, Berkeley, California, USA, 2010.

GAZETAS, G., *Analysis of Machine Foundation Vibrations: State of the Art*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 2, No. 1, 1983.

LEVY, S. e WILKINSON, J. P. D., *Generation of artificial time histories, rich in all frequencies, for given response spectra*, Nuclear Engineering and Design, London, Vol. 38, 1976.

RIBEIRO, M. A. A., *Análise comparativa de métodos utilizados no cálculo da interação solo-radier*. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2010.

RICHART, F.E., WOODS, R.D. e HALL Jr., J.R., *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice Hall, New York, 1970

RODRIGUES, R. M. R., *Geração de acelerogramas sísmicos artificiais compatíveis com um espectro de resposta*, Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2012.

SANTOS, S. H. C., *Aplicação dos modelos de biela-tirante ao projeto de estruturas sísmo-resistentes*. Tese de Doutorado, COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1992.

SANTOS, S. H. C.; LIMA, S. S.; ARAI, A., *Comparative Study of Codes for Seismic Design of Structures*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais [online]. vol.5, n.6, pp. 812-819, 2012.

SANTOS, S. H. C.; ZANAICA, L.; BUCUR, C.; SOUZA, L. S.; ARAI A., *Comparative Study of Codes for Seismic Design of Structures*. Mathematical Modelling in Civil Engineering. Volume 9, Issue 1, Pages 1–12, April 2013.

SOUZA LIMA, S.; SANTOS, S. H. C., *Análise Dinâmica das Estruturas*. Ed. Ciência Moderna, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, *Regulatory Guide 1.60 - Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants*, 1973.

VALENTE, L. S., *Análise dinâmica para efeito de tornado e impacto de míssil*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Projeto de Estruturas, Rio de Janeiro, 2012.

WOLF J. P., *Dynamic Soil-Structure Interaction*. Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, New York, 1985.

WOLF, J.P., *Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models*,
Prentice Hall, New York, 1994.