

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**HENRIQUE ALCEU BELLONI MOGNON**

**ESTUDO DO MÉTODO DO ESPECTRO DE RESPOSTA DA NORMA  
NBR 15421 PARA A DETERMINAÇÃO DAS CARGAS SÍSMICAS EM UM  
EDIFÍCIO DE CONCRETO ARMADO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CAMPO MOURÃO  
2021**

**HENRIQUE ALCEU BELLONI MOGNON**

**ESTUDO DO MÉTODO DO ESPECTRO DE RESPOSTA DA NORMA  
NBR 15421 PARA A DETERMINAÇÃO DAS CARGAS SÍSMICAS EM UM  
EDIFÍCIO DE CONCRETO ARMADO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, do Departamento Acadêmico de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Marcelo Rodrigo Carreira  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Coorientador: Angelo Giovanni Bonfim Corelhano  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CAMPO MOURÃO  
2021**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Campo Mourão  
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **Trabalho de Conclusão de Curso**

# **ESTUDO DO MÉTODO DO ESPECTRO DE RESPOSTA DA NORMA NBR 15421 PARA A DETERMINAÇÃO DAS CARGAS SÍSMICAS EM UM EDIFÍCIO DE CONCRETO ARMADO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS**

por

**HENRIQUE ALCEU BELLONI MOGNON**

Esse Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às **10h00min do dia 19 de agosto de 2021** como **requisito parcial** para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **APROVADO**.

**Prof. Me. Angelo Giovanni Bonfim Corelhano**  
(UTFPR)  
Co-orientador

**Prof. Dr. Jorge Luis Nunes de Goes**  
(UTFPR)

**Prof. Dr. Douglas Fukunaga Surco**  
(UTFPR)

**Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Carreira**  
(UTFPR)  
***Orientador***

Responsável pelo TCC: **Prof. Dr. Ewerton Clayton Alves Da Fonseca**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:  
**Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

O termo de aprovação assinado encontra-se na coordenação do curso

**CAMPO MOURÃO**  
**2021**

Ao Seu Alceu e Dona Iva.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, à minha família. Meus pais, por proporcionarem todos os momentos que pude vivenciar. À minha irmã, que sempre está ao meu lado, e por sermos capazes de nos darmos tão bem e tão mal ao mesmo tempo.

Ainda, agradeço a todos os meus amigos, em especial aqueles que tive a honra de conhecer durante o tempo enquanto universitário, que dividiram conhecimentos, momentos de alegria e tristeza, e que como um time nos tornamos capazes, técnica e humanamente, de sermos chamados engenheiros civis.

Além disso, também agradeço aos meus professores, que foram capazes de transmitir o conhecimento da "melhor maneira possível", como brincam alguns. Em especial, aos professores Marcelo Rodrigo Carreira e Angelo Giovanni Bonfim Corelhano, por aceitar o convite de colaborar na construção de um trabalho que instigasse a busca por conhecimento.

Por fim, à Deus, pela minha saúde e por ser capaz de realizar feitos que muitos não são capazes. Por ter ensinado que existem coisas mais importantes na vida do que a matéria, e por cada dia ter a possibilidade de me tornar uma versão melhor de eu mesmo.

Enfim, obrigado.

*Faça o teu melhor, nas condições que você tem, enquanto não tens condições melhores para melhor fazê-lo. (CORTELLA, Mario Sérgio, 2018).*

## RESUMO

MOGNON, Henrique Alceu Belloni. **ESTUDO DO MÉTODO DO ESPECTRO DE RESPOSTA DA NORMA NBR 15421 PARA A DETERMINAÇÃO DAS CARGAS SÍSMICAS EM UM EDIFÍCIO DE CONCRETO ARMADO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS**. 2021. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2021.

O estudo dos sismos em edificações tem se tornado cada vez mais evidente no Brasil. Com o aumento da eficiência de análises computacionais, a análise de estruturas complexas demandam uma previsão detalhada de seu comportamento, por questões econômicas e de segurança. Este trabalho busca fazer uma análise da norma brasileira de sismos, a ABNT NBR 15421:2006, evidenciando as etapas de análise de estruturas sismo-resistentes. De maneira mais específica, é feito um aprofundamento da análise por espectros de projeto, capazes de determinar o comportamento da estrutura considerando forças inerciais dinâmicas. Posteriormente, é realizado a análise de uma estrutura considerando esforços nos estados limites últimos, nas condições normais e excepcionais, apresentando comparações das combinações e apresentando as análises obtidas com os resultados.

**Palavras-chave:** Análise sísmica. Estruturas em concreto armado. Espectro de resposta. Análise computacional.

## ABSTRACT

MOGNON, Henrique Alceu Belloni. **STUDY OF THE RESPONSE SPECTRUM METHOD OF THE BRAZILIAN NBR 15421 STANDARD FOR THE DETERMINATION OF SEISMIC LOADS IN A MULTIPLE-FLOOR REINFORCED CONCRETE BUILDING**. 2021. 72 p. Final Paper (Bachelor of Civil Engineering) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2021.

The study of earthquakes in buildings has become increasingly evident in Brazil. With the increase in the efficiency of computational analysis, the analysis of complex structures requires a detailed prediction of their behavior, for economic and security reasons. This work seeks to analyze the Brazilian standard for earthquakes, the ABNT NBR 15421:2006, highlighting the stages of analysis of earthquake-resistant structures. More specifically, an in-depth analysis is carried out using project spectrum, capable of determining the behavior of the structure considering dynamic inertial forces. Subsequently, the analysis of a structure is carried out considering efforts in the ultimate limit states, under normal and exceptional conditions, presenting comparisons of the combinations and the analyzes obtained with the results.

**Keywords:** Seismic analysis. Structures in reinforced concrete. Response spectrum. Computational analysis.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Movimento oscilatório de estrutura sob ação do vento . . . . .                                                           | 4  |
| Figura 2 - Características e fontes de carregamentos dinâmicos típicos . . . . .                                                    | 5  |
| Figura 3 - Modelo 1 GDL ideal; <i>a)</i> componentes básicas de um sistema dinâmico;<br><i>b)</i> diagrama de corpo livre . . . . . | 6  |
| Figura 4 - Sistema com 1GDL sujeito a deslocamento da base . . . . .                                                                | 9  |
| Figura 5 - Típico Espectro de resposta e sistema de 1GDL submetido a excitação<br>na base . . . . .                                 | 10 |
| Figura 6 - Pórtico plano com três andares . . . . .                                                                                 | 12 |
| Figura 7 - Fluxograma para integração direta pelo Método da Diferença Central<br>aplicado a sistemas com múltiplos GDL . . . . .    | 16 |
| Figura 8 - Fluxograma para integração direta pelo Método de Newmark aplicado a<br>sistemas com múltiplos GDL . . . . .              | 17 |
| Figura 9 - Ondas primárias e secundárias . . . . .                                                                                  | 18 |
| Figura 10 - Ondas superficiais . . . . .                                                                                            | 19 |
| Figura 11 - Mapeamento da aceleração sísmica horizontal característica no Brasil<br>para terrenos da classe B (“Rocha”) . . . . .   | 21 |
| Figura 12 - Variação do espectro de resposta de projeto ( $S_a/a_{gs0}$ ) em função do<br>período ( $T$ ) . . . . .                 | 30 |
| Figura 13 - Planta Baixa do Pavimento Tipo . . . . .                                                                                | 35 |
| Figura 14 - Planta Baixa do Pavimento Térreo . . . . .                                                                              | 36 |
| Figura 15 - Fachada . . . . .                                                                                                       | 37 |
| Figura 16 - Planta de Arquitetura Modificada . . . . .                                                                              | 38 |
| Figura 17 - Planta de Forma . . . . .                                                                                               | 39 |
| Figura 18 - Vista Estrutural . . . . .                                                                                              | 40 |
| Figura 19 - Localização . . . . .                                                                                                   | 43 |
| Figura 20 - Gráfico de espectro de projeto . . . . .                                                                                | 47 |
| Figura 21 - Modelo Espacial da Estrutura . . . . .                                                                                  | 48 |
| Figura 22 - Espectro de Projeto lançado no ROBOT . . . . .                                                                          | 50 |
| Figura 23 - Modelo da Estrutura de análise inserida no Robot . . . . .                                                              | 51 |
| Figura 24 - Pilares analisados e orientação dos esforços . . . . .                                                                  | 55 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Normas utilizadas em conjunto . . . . .                                                                  | 19 |
| Quadro 2 - Classe do terreno . . . . .                                                                              | 22 |
| Quadro 3 - Definição das categorias de utilização e dos fatores de importância de utilização ( <i>I</i> ) . . . . . | 23 |
| Quadro 4 - Categoria sísmica . . . . .                                                                              | 24 |
| Quadro 5 - Coeficiente de Ponderação $\gamma_g$ . . . . .                                                           | 32 |
| Quadro 6 - Coeficiente de Ponderação $\gamma_q$ . . . . .                                                           | 32 |
| Quadro 7 - Fator de Combinação $\gamma_q$ . . . . .                                                                 | 33 |
| Quadro 8 - Quadro de combinações . . . . .                                                                          | 49 |
| Quadro 9 - Comparações relativas de pilar de extremidade . . . . .                                                  | 56 |
| Quadro 10 - Comparações relativas de pilar de canto . . . . .                                                       | 57 |
| Quadro 11 - Comparações relativas de pilar intermediário . . . . .                                                  | 58 |
| Quadro 12 - Valores absolutos das combinações normais dos esforços internos no pilar de extremidade . . . . .       | 65 |
| Quadro 13 - Valores absolutos das combinações excepcionais dos esforços internos no pilar de extremidade . . . . .  | 66 |
| Quadro 14 - Valores absolutos das combinações normais dos esforços internos no pilar de canto . . . . .             | 67 |
| Quadro 15 - Valores absolutos das combinações excepcionais dos esforços internos no pilar de canto . . . . .        | 68 |
| Quadro 16 - Valores absolutos das combinações normais dos esforços internos no pilar intermediário . . . . .        | 69 |
| Quadro 17 - Valores absolutos das combinações excepcionais dos esforços internos no pilar intermediário . . . . .   | 70 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Zonas Sísmicas . . . . .                                                                           | 20 |
| Tabela 2 - Coeficientes de projeto para os diversos sistemas básicos sismo-resistentes                        | 25 |
| Tabela 3 - Valores de $C_T$ e $x$ . . . . .                                                                   | 27 |
| Tabela 4 - Coeficiente de limitação do período . . . . .                                                      | 27 |
| Tabela 5 - Fatores de amplificação sísmica no solo . . . . .                                                  | 29 |
| Tabela 6 - Tabela de pilares pré-dimensionados . . . . .                                                      | 41 |
| Tabela 7 - Propriedade dos materiais . . . . .                                                                | 41 |
| Tabela 8 - Tabela de Ações Variáveis e Permanentes . . . . .                                                  | 42 |
| Tabela 9 - Tabela com ações do vento distribuídos por andar . . . . .                                         | 42 |
| Tabela 10 - Coeficientes sísmicos adotados . . . . .                                                          | 44 |
| Tabela 11 - Cálculo do peso total da estrutura . . . . .                                                      | 44 |
| Tabela 12 - Período natural da estrutura . . . . .                                                            | 45 |
| Tabela 13 - Tabela força total atuante na base . . . . .                                                      | 45 |
| Tabela 14 - Forças Sísmicas Atuantes no Eixo X . . . . .                                                      | 45 |
| Tabela 15 - Forças Sísmicas Atuantes no Eixo Y . . . . .                                                      | 46 |
| Tabela 16 - % da massa total capturada na direção do eixo X . . . . .                                         | 52 |
| Tabela 17 - % da massa total capturada na direção do eixo Y . . . . .                                         | 53 |
| Tabela 18 - Verificação das forças obtidas . . . . .                                                          | 53 |
| Tabela 19 - Variação percentual dos valores de forças horizontais na base . . . . .                           | 54 |
| Tabela 20 - Tabela de comparação das combinações . . . . .                                                    | 54 |
| Tabela 21 - Envoltória de acréscimos relativos de esforços devidos a sismos no pilar de extremidade . . . . . | 59 |
| Tabela 22 - Envoltória de acréscimos relativos de esforços devidos a sismos no pilar de canto . . . . .       | 60 |
| Tabela 23 - Envoltória de acréscimos relativos de esforços devidos a sismos no pilar intermediário . . . . .  | 60 |
| Tabela 24 - Valores absolutos da envoltória dos esforços internos nos pilares de extremidade . . . . .        | 72 |
| Tabela 25 - Valores absolutos da envoltória dos esforços internos nos pilares de canto                        | 72 |
| Tabela 26 - Valores absolutos da envoltória dos esforços internos nos pilares de intermediários . . . . .     | 73 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|      |                                            |
|------|--------------------------------------------|
| 1GDL | Um Grau de Liberdade                       |
| MER  | Método do Espectro de Resposta             |
| MFE  | Método das Forças Horizontais Equivalentes |
| NGDL | Múltiplos Graus de Liberdade               |
| SPT  | Standart Penetration Test                  |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                 |                                                  |
|-----------------|--------------------------------------------------|
| $m$             | massa                                            |
| $p(t)$          | carregamento dinâmico                            |
| $k$             | rigidez                                          |
| $c$             | amortecimento viscoso                            |
| $\ddot{u}(t)$   | função de aceleração no tempo                    |
| $\dot{u}(t)$    | função de velocidade no tempo                    |
| $u(t)$          | função de deslocamento no tempo                  |
| $t$             | tempo                                            |
| $u_0$           | valor do deslocamento no instante $t=0$          |
| $\dot{u}_0$     | valor da velocidade no instante $t=0$            |
| $\omega_n$      | frequência angular natural                       |
| $T_n$           | período natural                                  |
| $\pi$           | pi                                               |
| $f_n$           | frequência natural                               |
| $\cos$          | cosseno                                          |
| $\sin$          | seno                                             |
| $\xi$           | fator de amortecimento ou amortecimento relativo |
| $c_{cr}$        | amortecimento crítico                            |
| $p_0$           | amplitude do carregamento                        |
| $p_0$           | amplitude do carregamento                        |
| $p_b(t)$        | força transmitida à fundação                     |
| $A_D$           | fator de amplificação dinâmica                   |
| $T_r$           | fator de transmissibilidade                      |
| $\phi$          | ângulo de fase                                   |
| $x_B(t)$        | deslocamento na base                             |
| $\ddot{u}_b(t)$ | aceleração absoluta da base                      |
| $[M]$           | matriz de massa discreta                         |
| $[C]$           | matriz de amortecimento                          |
| $[K]$           | matriz de rigidez                                |
| $\{\ddot{d}\}$  | vetor das acelerações                            |
| $\{\dot{d}\}$   | vetor das velocidades                            |
| $\{d\}$         | vetor dos deslocamentos                          |
| $\{p(t)\}$      | vetor das forças aplicadas                       |
| $\det$          | determinante                                     |
| $\{\phi_j\}$    | j-ésimo autovetor                                |
| $\lambda_j$     | j-ésimo autovalor                                |

|                   |                                                                                            |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| $[\Phi]$          | matriz modal                                                                               |
| $[\Omega]$        | matriz espectral                                                                           |
| $[M_m]$           | matriz de massa modal                                                                      |
| $[K_m]$           | matriz de rigidez modal                                                                    |
| $\{\ddot{q}\}$    | vetor das acelerações no espaço modal                                                      |
| $\{q\}$           | vetor dos deslocamentos no espaço modal                                                    |
| $\{P_m\}$         | vetor de forças modais                                                                     |
| $[M_m]$           | matriz de amortecimento modal                                                              |
| $\{\dot{q}\}$     | vetor das velocidades no espaço modal                                                      |
| $\{\ddot{q}\}$    | vetor das acelerações no espaço modal                                                      |
| $a_0$             | constante de proporcionalidade                                                             |
| $a_1$             | constante de proporcionalidade                                                             |
| $\{P_{ef}(t)\}$   | vetor das forças efetivas                                                                  |
| $\{1\}$           | vetor coluna                                                                               |
| $\{P_{m,ef}(t)\}$ | vetor das forças efetivas no espaço modal                                                  |
| $\gamma_g$        | coeficiente de majoração de esforços permanentes                                           |
| $\gamma_q$        | coeficiente de majoração de esforços acidentais                                            |
| $\gamma_{exc}$    | coeficiente de majoração de esforços excepcionais                                          |
| $a_g$             | aceleração sísmica horizontal                                                              |
| $g$               | aceleração gravitacional                                                                   |
| $V_s$             | velocidade de propagação de ondas de cisalhamento no terreno                               |
| $\overline{V}_s$  | média nos 30 m superiores do terreno, da velocidade de propagação de ondas de cisalhamento |
| $\overline{N}$    | média nos 30 m superiores do terreno, do número de golpes obtido no ensaio SPT             |
| $I$               | fator de importância da solicitação                                                        |
| $R$               | Coeficiente de modificação de resposta                                                     |
| $\Omega_0$        | Coeficiente de sobre-resistência                                                           |
| $C_d$             | Coeficiente de amplificação de deslocamentos                                               |
| $H$               | força horizontal na base da estrutura                                                      |
| $C_s$             | coeficiente de resposta sísmica                                                            |
| $W$               | peso total da estrutura                                                                    |
| $a_{gs0}$         | aceleração espectral para o período de 0,0s                                                |
| $a_{gs1}$         | aceleração espectral para o período de 1,0s                                                |
| $T$               | período natural                                                                            |
| $C_{up}$          | coeficiente de limitação do período                                                        |
| $T_a$             | período natural aproximado                                                                 |
| $C_T$             | coeficiente de período da estrutura                                                        |
| $h_n$             | altura da estrutura acima da base                                                          |
| $F_x$             | força horizontal aplicada no pavimento                                                     |

|                |                                                                                                                   |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $C_{vx}$       | coeficiente de distribuição vertical                                                                              |
| $w_i$          | parcela do peso efetivo total que corresponde à elevação $i$                                                      |
| $w_x$          | parcela do peso efetivo total que corresponde à elevação $x$                                                      |
| $h_i$          | altura entre a base e a elevação $i$                                                                              |
| $h_x$          | altura entre a base e a elevação $x$                                                                              |
| $z$            | expoente de distribuição                                                                                          |
| $M_t$          | momento de torção inerente                                                                                        |
| $M_{ta}$       | momento torsional accidental                                                                                      |
| $A_x$          | fator de amplificação torsional                                                                                   |
| $\delta_{max}$ | deslocamento horizontal máximo em uma direção, na elevação $x$ em questão                                         |
| $\delta_{avg}$ | média dos deslocamentos na mesma direção, nos pontos extremos da estrutura em um eixo transversal a esta direção. |
| $\delta_{xe}$  | deslocamento determinado em uma análise estática                                                                  |
| $E_{max}$      | valor máximo do efeito considerado                                                                                |
| $E_{N_{maxj}}$ | contribuição do $j$ -ésimo modo para o mesmo efeito                                                               |
| $C_a$          | fator de amplificação sísmica no solo para 0,0s                                                                   |
| $C_v$          | fator de amplificação sísmica no solo para 1,0s                                                                   |
| $S_d$          | deslocamento espectral                                                                                            |
| $S_V$          | pseudo-velocidade                                                                                                 |
| $\omega$       | frequência natural do sistema                                                                                     |
| $S_a$          | aceleração espectral                                                                                              |
| $f_{S_{max}}$  | força horizontal máxima                                                                                           |
| $H_t$          | força horizontal na base                                                                                          |
| $F_{G^{i,k}}$  | Valor característico das ações permanentes                                                                        |
| $F_{Q^{1,k}}$  | valor característico da ação variável considerada como ação principal para a combinação                           |
| $F_{Q^{i,k}}$  | valor característico da ação variável                                                                             |
| $F_{Q,exc}$    | valor da ação transitória excepcional                                                                             |
| $\Psi_{0j}$    | valor reduzido de combinação de cada uma das demais ações variáveis                                               |
| $\Psi_{0j,ef}$ | fator de combinação efetivo                                                                                       |

## SUMÁRIO

|          |                                                                       |          |
|----------|-----------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                                                     | <b>1</b> |
| <b>2</b> | <b>OBJETIVOS</b>                                                      | <b>2</b> |
| 2.1      | OBJETIVO GERAL                                                        | 2        |
| 2.2      | OBJETIVOS ESPECÍFICOS                                                 | 2        |
| <b>3</b> | <b>JUSTIFICATIVA</b>                                                  | <b>3</b> |
| <b>4</b> | <b>REVISÃO DA LITERATURA</b>                                          | <b>4</b> |
| 4.1      | FUNDAMENTOS DE DINÂMICA DE ESTRUTURAS                                 | 4        |
| 4.1.1    | Classificação da Vibração.                                            | 5        |
| 4.1.2    | Sistemas Discretos com um Grau de Liberdade.                          | 6        |
| 4.1.2.1  | Resposta a vibração livre não amortecida                              | 6        |
| 4.1.2.2  | Resposta a vibração livre amortecida                                  | 7        |
| 4.1.2.3  | Resposta à solicitação harmônica                                      | 8        |
| 4.1.2.4  | Força transmitida para a base                                         | 8        |
| 4.1.2.5  | Resposta a movimentação da base                                       | 9        |
| 4.1.3    | Espectro de Resposta                                                  | 9        |
| 4.1.3.1  | Espectro de resposta para acelerações de base                         | 10       |
| 4.1.4    | Sistemas Discretos com Múltiplos Graus de Liberdade                   | 11       |
| 4.1.4.1  | Vibração livre                                                        | 13       |
| 4.1.5    | Espaço Modal para Sistemas de Múltiplos Graus de Liberdade            | 13       |
| 4.1.5.1  | Vibração forçada sem amortecimento                                    | 14       |
| 4.1.5.2  | Sistemas com amortecimento proporcional                               | 15       |
| 4.1.5.3  | Sistema de múltiplos graus de liberdade sujeito a aceleração de base. | 15       |
| 4.1.6    | Métodos Numéricos para Soluções de Sistemas de NGDL                   | 16       |
| 4.1.7    | Espectros de Projeto para NGDL                                        | 17       |
| 4.2      | OCORRÊNCIAS SÍSMICAS                                                  | 17       |
| 4.3      | PONDERAÇÕES SOBRE A NBR 15421:2006                                    | 19       |
| 4.3.1    | Requisitos de Segurança                                               | 19       |
| 4.3.2    | Valores Característicos                                               | 20       |
| 4.3.3    | Análise Sísmica pelo Método das Forças Horizontais Equivalentes       | 26       |
| 4.3.4    | Análise Sísmica pelo Método Espectral                                 | 28       |
| 4.3.4.1  | Determinação do espectro de projeto                                   | 29       |
| 4.3.4.2  | Forças elásticas máximas                                              | 30       |
| 4.3.4.3  | Verificação das forças obtidas                                        | 31       |
| 4.3.5    | Requisitos para Análise de Prédios                                    | 31       |
| 4.4      | COMBINAÇÃO DE AÇÕES                                                   | 31       |
| 4.5      | PRÉ-DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL                                        | 33       |

|          |                                                                                                         |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5</b> | <b>MÉTODOS</b>                                                                                          | <b>34</b> |
| 5.1      | LIMITAÇÕES DO TRABALHO                                                                                  | 34        |
| 5.1      | EDIFÍCIO ANALISADO                                                                                      | 34        |
| 5.3      | ANÁLISE DA ESTRUTURA E MODIFICAÇÕES PROPOSTAS                                                           | 37        |
| 5.4      | PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS                                                           | 40        |
| 5.5      | DETERMINAÇÃO DAS AÇÕES USUAIS                                                                           | 41        |
| 5.6      | DETERMINAÇÃO DA AÇÃO SÍSMICA                                                                            | 43        |
| 5.6.1    | Forças Horizontais Equivalentes                                                                         | 44        |
| 5.6.2    | Definição do Espectro de Projeto                                                                        | 46        |
| 5.7      | MODELAGEM ESTRUTURAL                                                                                    | 47        |
| 5.7.1    | Combinações de Análise                                                                                  | 48        |
| 5.8      | MÉTODO DO ESPECTRO DE RESPOSTA                                                                          | 49        |
| <b>6</b> | <b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>                                                               | <b>52</b> |
| 6.1      | COMPARAÇÃO DAS COMBINAÇÕES NORMAIS E EXCEPCIONAIS                                                       | 54        |
| 6.2      | AVALIAÇÃO DO INCREMENTO DE ESFORÇOS INTERNOS NOS PILARES DA ESTRUTURA                                   | 54        |
| 6.3      | ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS                                                                          | 58        |
| <b>7</b> | <b>CONCLUSÃO</b>                                                                                        | <b>62</b> |
| 7.1      | TRABALHOS FUTUROS                                                                                       | 62        |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b>                                                                                      | <b>63</b> |
|          | <b>APÊNDICE A - Quadros de valores absolutos das combinações normais e excepcionais</b>                 | <b>64</b> |
|          | <b>APÊNDICE B - Tabelas de valores absolutos das envoltórias das combinações normais e excepcionais</b> | <b>71</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O movimento do solo na base da estrutura de edificações, durante um evento sísmico, causa esforços adicionais nos elementos em função das forças inerciais, acréscimos que se não levados em consideração podem causar danos e levar a estrutura ao colapso. Para verificar a segurança aos sismos, se faz necessário o conhecimento da análise dinâmica de estruturas, com o objetivo de investigar os efeitos de solicitações sísmicas nas edificações.

Devido a ocorrência de sismos significativos em parte do território brasileiro, os estudos realizados para a elaboração da ABNT NBR 15421:2006 - Projetos de estruturas resistentes a sismos - procedimento, possibilitam identificar os locais que exigiriam uma verificação cautelosa de estruturas sob ações sísmicas e seus métodos de análise.

Por isso, o estudo da análise dinâmica estrutural começa a ganhar mais destaque, visto a necessidade de execução de edificações cada vez mais altas e esbeltas, que acabam por ter seus efeitos dinâmicos intensificados.

Assim, este trabalho visa o estudo do método do espectro de resposta, um dos três presente na norma brasileira de sismos, a ABNT NBR 15421:2006, e demonstra a influência das ações sísmicas na engenharia de estruturas.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar o Método do Espectro de Resposta da norma ABNT NBR 15421:2006 para a determinação das ações sísmicas em um edifício de múltiplos pavimentos de concreto armado.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Estudar os Fundamentos de Análise Dinâmica de sistemas discretos sujeitos a ações não periódicas;
- b) Reconhecer as ações sísmicas e seus efeitos nas estruturas;
- c) Compreender os métodos para obtenção das cargas sísmicas definidos na norma ABNT NBR 15421:2006;
- d) Aplicar o método do espectro de resposta em um edifício hipotético de múltiplos pavimentos em concreto armado, localizado no estado do Acre, cidade de Rio Branco;
- e) Avaliar o incremento nos esforços internos dos pilares do edifício ao se considerar as ações sísmicas.

### 3 JUSTIFICATIVA

A atividade sísmica no Brasil é consideravelmente baixa em comparação a países que se localizam em territórios próximos ao encontro de placas tectônicas, como o Japão, localizado na zona de convergência das placas Pacífico, Euro-asiática Oriental, Norte-Americana e das Filipinas, e o Chile, na zona de convergência das placas de Nazca e a Sul-americana. Isso faz com que esta área de estudo e produção científica tenha um enfoque menor no Brasil.

Com a ABNT NBR 15421:2006, acredita-se que o espaço para discussão de estudo de estrutura sismo-resistentes seja ampliado.

Ainda, mesmo que com pouca frequência e intensidade, o Brasil possui histórico de ocorrências sísmicas, sendo o Mato Grosso o estado com o maior tremor já registrado com epicentro no território brasileiro, atingindo a magnitude de 6,6<sup>º</sup> na escala Richter no ano de 1995.

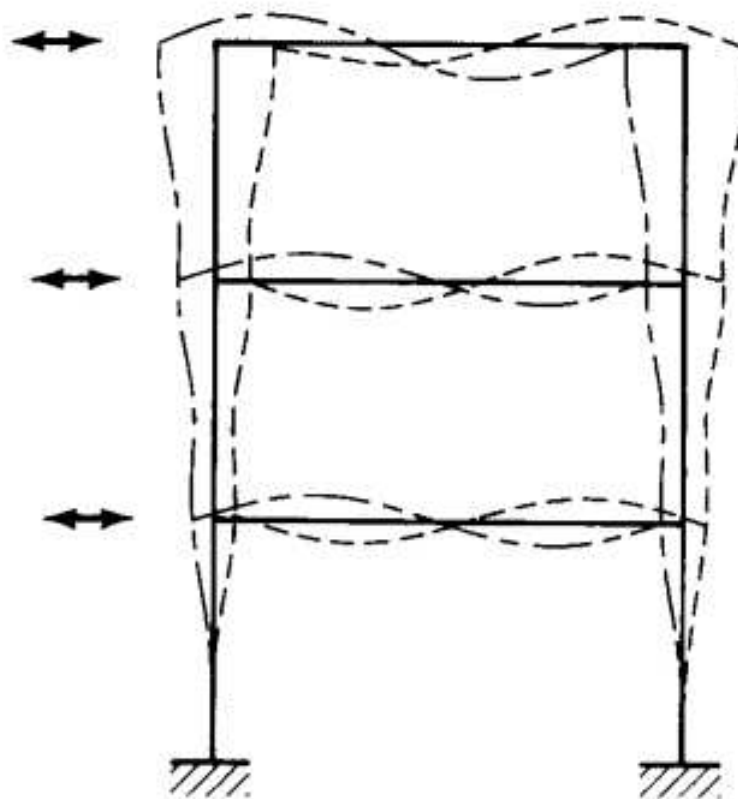
A norma brasileira divide o país em regiões sísmicas, e determinadas regiões precisam levar em conta as ações de sismos para a análise estrutural de edifícios. A partir disso vem a necessidade de apresentar de maneira prática como utilizar o método presente na norma brasileira para a obtenção das cargas sísmicas, através de um passo a passo em etapas de realização, haja visto a ausência do conteúdo na grade dos cursos de engenharia civil.

## 4 REVISÃO DA LITERATURA

### 4.1 FUNDAMENTOS DE DINÂMICA DE ESTRUTURAS

De acordo com Humar (2001), a resposta de objetos físicos a cargas dinâmicas ou variáveis no tempo é uma importante área de estudo em física e engenharia. Esse objeto pode ser tratado como um corpo rígido ou deformável. A dinâmica de corpos rígidos trata objetos rígidos que se movem sem deformação quando são aplicadas ações dinâmicas. Entretanto, a resposta dinâmica relacionada a corpos deformáveis é a que recebe mais atenção. Seu estudo, possui várias aplicações, como exemplo, a resposta de uma estrutura submetida a ações sísmicas. As respostas dinâmicas envolvendo estruturas deformáveis são habitualmente oscilatórias, vibrando em torno de um equilíbrio estável, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Movimento oscilatório de estrutura sob ação do vento

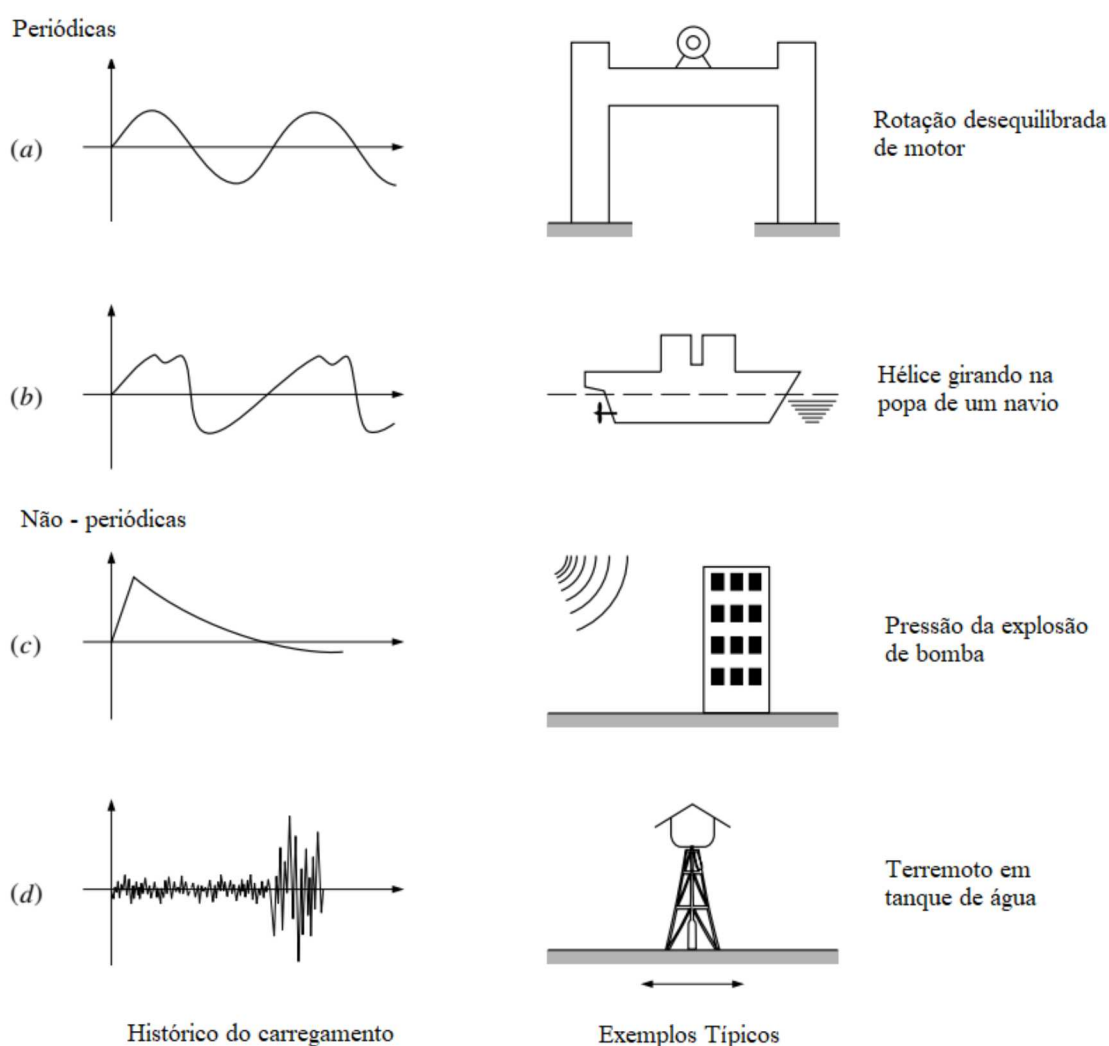


Fonte: Humar (2001)

#### 4.1.1 Classificação da Vibração

Para Clough e Penzien (1995), os carregamentos dinâmicos podem ser subdivididos em duas categorias básicas: periódicas e não periódicas. A solicitação periódica mais simples é a mostrada na Figura 2-a, denominada solicitação harmônica simples, que pode ser causada pela rotação desequilibrada de um motor. Outras solicitações periódicas, como a hélice girando na popa de um navio, são mais complexas de serem analisadas. Entretanto, por meio das séries de Fourier, é possível descrever uma solicitação periódica como a soma de várias solicitações harmônicas simples.

Figura 2 – Características e fontes de carregamentos dinâmicos típicos



Fonte: Adaptado, Clough e Penzien (1995)

As solicitações não periódicas podem ser impulsivas de curta duração ou de longa duração. Uma explosão é considerada impulsiva, enquanto um terremoto é considerado uma ação de longa duração (PARISENTI, 2011).

As vibrações ainda, podem ser consideradas livres ou forçadas. A vibração livre ocorre quando um sistema oscila sob a ação de forças que são intrínsecas ou na inexistência de qualquer força externa. A vibração forçada recebe o nome pelo fato de ocorrer sob a

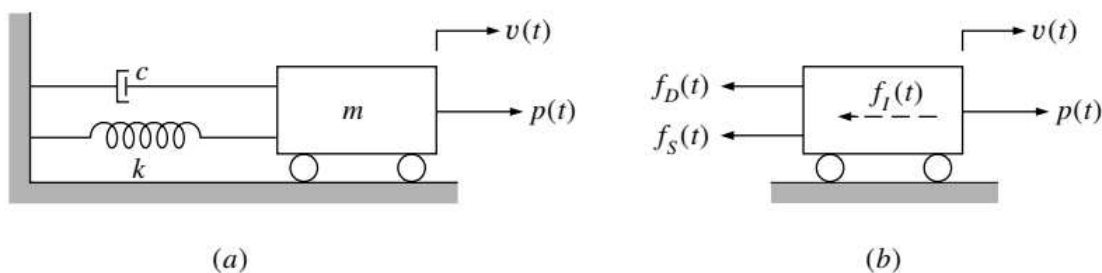
excitação de forças externas. Se a excitação é harmônica, o sistema vibra na mesma frequência da excitação. Caso a frequência de excitação coincida com a frequência natural do sistema, forma-se um estado de ressonância, causando a amplificação das oscilações, levando ao colapso de estruturas civis (THOMSON, 1978).

#### 4.1.2 Sistemas Discretos com um Grau de Liberdade

A configuração deslocada de muitos sistemas mecânicos e estruturas sujeitas a cargas dinâmicas pode ser completamente descrita especificando o deslocamento variável no tempo ao longo de apenas uma direção de coordenada. Esses sistemas são chamados de sistema de Um Grau de Liberdade (1GDL). Para alguns sistemas, a representação como um modelo de grau de liberdade único é bastante satisfatória do ponto de vista da engenharia. Além disso, a análise da resposta de sistemas de vários graus de liberdade mais complexos é, em muitos casos, realizada pela superposição de vários sistemas de grau único de liberdade (HUMAR, 2001).

Seja um corpo de massa  $m$ , submetido a uma ação externa  $p(t)$ , com uma rigidez  $k$  e amortecimento viscoso  $c$ , (Figura 3), a variação de sua posição no tempo é  $u(t)$ .

Figura 3 – Modelo 1 GDL ideal; a) componentes básicas de um sistema dinâmico; b) diagrama de corpo livre



Fonte: Clough e Penzien (1995)

Fazendo o equilíbrio dinâmico das forças mostradas no diagrama de corpo livre da Figura 3(b), é possível deduzir a equação geral do movimento para um sistema de 1GDL, conforme Equação 1.

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = p(t) \quad (1)$$

##### 4.1.2.1 Resposta a vibração livre não amortecida

Se o sistema mostrado na Figura 3(a) for submetido a uma perturbação inicial, como um deslocamento ou velocidade no instante  $t=0$ , este entrará em vibração livre. Nesse caso, o sistema vibra na ausência de uma força externa. Assim, anulando, a força externa

na Equação 1, tem-se a equação de movimento para o caso de vibração livre, dada pela Equação 2.

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (2)$$

Considerando um movimento não amortecido, a equação é simplificada para a Equação 3:

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (3)$$

De acordo com Lima e Santos (2008), a solução da equação 3 para a condição  $u(0) = u_0$  e/ou  $\dot{u}(0) = \dot{u}_0$  é dada por:

$$u(t) = u_0 \cos(w_n t) + \frac{\dot{u}_0}{w_n} \sin(w_n t) \quad (4)$$

com a frequência natural não amortecida sendo:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

O período natural  $T_n$  é dado por:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (6)$$

O seu inverso fornece a frequência natural dada por:

$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (7)$$

#### 4.1.2.2 Resposta a vibração livre amortecida

Ao considerar o amortecimento, o sistema passa a ser não conservativo, pois há a perda de energia, sendo regido pela Equação 1 (LIMA; SANTOS, 2008). Impondo as condições iniciais,  $u(0) = u_0$  e  $\dot{u}(0) = \dot{u}_0$ , e considerando o amortecimento viscoso com  $\xi < 1,0$  sua solução é dada por:

$$u(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left[ u_0 \cos(\omega_D t) + \frac{\dot{u}_0 + \xi\omega_n u_0}{\omega_d} \sin(\omega_D t) \right] \quad (8)$$

em que:

$\xi$ : fator de amortecimento ou amortecimento relativo,

$\omega_D$ : frequência angular amortecida,

sendo:

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} \quad (9)$$

e:

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (10)$$

onde:

$c_{cr}$ : amortecimento crítico.

#### 4.1.2.3 Resposta à solicitação harmônica

Para o caso de um sistema não amortecido, sob carregamento harmônico com amplitude  $p_0$  e senoidal, a Equação 1 é reescrita sob a forma:

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = p_0 \sin(\omega t) \quad (11)$$

Assim, segundo Chopra (2012), impondo as condições iniciais  $u(0) = u_0$  e  $\dot{u}(0) = \dot{u}_0$ , a solução para a Equação 11 é dada por:

$$u(t) = u_0 \cos(\omega_n t) + \left( \frac{\dot{u}_0}{\omega_n} - \frac{(\frac{\omega}{\omega_n})p_0}{k(1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2)} \right) \sin(\omega_n t) + \frac{p_0}{k(1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2)} \sin(\omega t) \quad (12)$$

Considerando o amortecimento, a Equação 11 é reescrita como:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = p_0 \sin(\omega t) \quad (13)$$

Considerando o amortecimento viscoso, com  $\xi < 1,0$ , a solução da Equação 13 é dada por:

$$u(t) = \frac{p_0}{2k\xi} \left\{ e^{-\xi\omega_n t} \left[ \cos(\omega_D t) + \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin(\omega_D t) \right] - \cos(\omega_n t) \right\} \quad (14)$$

#### 4.1.2.4 Força transmitida para a base

Ao considerar a Figura 3(a) uma força transmitida à fundação por um sistema de 1GDL, verifica-se que a mesma é a soma da força na mola com força no amortecedor, dada por:

$$p_b(t) = kx(t) + c\dot{x}(t) \quad (15)$$

De acordo com Lima e Santos (2008), a Equação 15 pode ser reescrita por:

$$p_b(t) = \frac{p_0}{k} A_D [k \sin(\omega t - \phi) + 2\xi m \omega_n \omega \cos(\omega t - \phi)] \quad (16)$$

onde o fator de amplificação dinâmica  $A_D$  é definido como sendo:

$$A_D = \frac{1}{\sqrt{(1 - \alpha^2)^2 + (2\xi\alpha)^2}} \quad (17)$$

O fator de transmissibilidade  $T_r$ , representa a relação entre a amplitude da força transmitida à base e a amplitude da força aplicada, sendo dado por:

$$T_r = \sqrt{\frac{1 + (2\xi\alpha)^2}{(1 - \alpha^2)^2 + (2\xi\alpha)^2}} \quad (18)$$

com o ângulo de fase  $\phi$ :

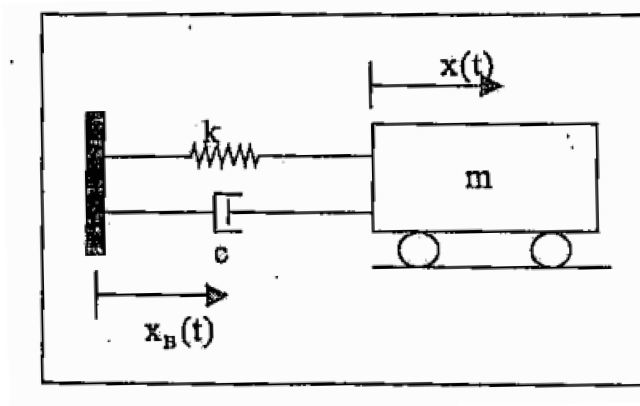
$$\phi = \arctan\left(\frac{2\xi\alpha}{1 - \alpha^2}\right) \quad (19)$$

#### 4.1.2.5 Resposta a movimentação da base

Um sistema com 1GDL sujeito ao deslocamento harmônico em sua base  $x_B(t)$ , conforme a Figura 4, possui a equação diferencial do movimento dada por:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -m \cdot x_B(t) \quad (20)$$

Figura 4 – Sistema com 1GDL sujeito a deslocamento da base



Fonte: Lima e Santos (2008)

De acordo com Lima e Santos (2008), sua solução é dada por:

$$x(t) = \frac{x_{B0} \sqrt{1 + (2\xi r)^2}}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \sin(\omega t + \alpha - \phi) \quad (21)$$

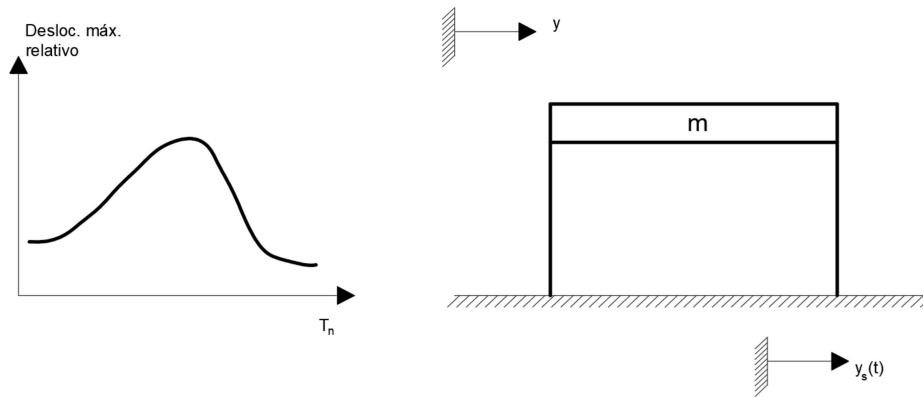
com fator de transmissibilidade definido pela Equação 18.

#### 4.1.3 Espectro de Resposta

O espectro de resposta é um gráfico da resposta máxima (deslocamento máximo, velocidade, aceleração ou qualquer outra quantidade de interesse) para uma solicitação de carregamentos para sistemas de um grau de liberdade. A abscissa do espectro representa o período do sistema e a ordenada a resposta máxima. A Figura 5 exemplifica a situação. Um sistema com 1GDL sofre um deslocamento da sua base, indicado por  $y_s(t)$ . A curva

mostrada a esquerda é o espectro de resposta para o movimento de base da estrutura em questão. A partir dela é possível determinar o deslocamento máximo da massa  $m$  em relação ao deslocamento da base. Por isso, para determinar a resposta de uma excitação específica, basta saber a frequência natural do sistema (PAZ, 1985).

Figura 5 – Típico Espectro de resposta e sistema de 1GDL submetido a excitação na base



Fonte: Adaptado, Paz (1985)

O conceito de espectro de projeto é fundamental para a engenharia sísmica pela sua capacidade de avaliar a resposta máxima de um sistema de 1GDL. Seguido por uma série de estudos estatísticos e característicos dos espectros de resposta a terremotos ocorridos, torna capaz a análise para projeto de novos edifícios e avaliação de segurança de edifícios existentes contra futuros terremotos (BANGASH, 2011).

#### 4.1.3.1 Espectro de resposta para acelerações de base

Para Lima e Santos (2008), os espectros de respostas para acelerações de base são importantes para a análise sísmica, em que tais espectros são capazes de descrever melhor os efeitos nas estruturas submetidas a sismos, haja visto a possibilidade de espectros de resposta para velocidades e deslocamentos.

A equação diferencial de movimento para um sistema de 1 GDL devido à acelerações de base é definida por:

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega_n\dot{u}(t) + \omega_n^2u(t) = -\ddot{u}_b(t) \quad (22)$$

onde:

$\ddot{u}_b(t)$ : aceleração absoluta da base.

Com a aceleração da base conhecida e o amortecimento definido, a equação é resolvida para vários valores de  $\omega_n$ . Pela integral de Duhamel se a solução analítica dada por:

$$u(t) = -\frac{1}{\omega_D} \int_0^t \ddot{u}_b(\tau) e^{-\xi\omega_n(t-\tau)} \sin[\omega_D(t-\tau)] d\tau \quad (23a)$$

que resulta em:

$$u(t) = -\frac{1}{\omega_D} \int_0^t \ddot{u}_b(\tau) e^{-\xi\omega_n(t-\tau)} \left[ -\xi\omega_n \sin[\omega_D(t-\tau)] + \omega_D \cos[\omega_D(t-\tau)] \right] d\tau \quad (23b)$$

A aceleração absoluta da massa  $m$  é dada por:

$$\ddot{u}(t) = -2\xi\omega_n\dot{u}(t) - \omega_n^2 u(t) \quad (24)$$

Segundo Lima e Santos (2008), a porção  $\omega_n^2 u(t)$  é chamada pseudo-aceleração e representa uma boa aproximação da aceleração absoluta para sistemas ligeiramente amortecidos, podendo ser escrito por:

$$\ddot{u}(t) = -\omega_n^2 u(t) \quad (25)$$

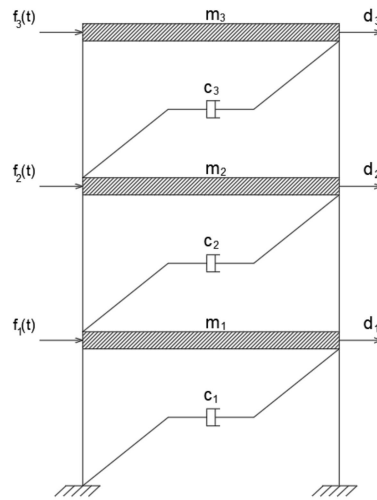
No entanto, o espectro de resposta é próprio de um único e determinado sismo, assim sendo não apresenta um benefício para a análise de estruturas sismo-resistentes. Foi a partir disso que surgiu a ideia dos espectros de projeto, obtidos por critérios estatísticos para cada local de interesse de análise de estruturas sismo-resistentes (LIMA; SANTOS, 2008).

#### 4.1.4 Sistemas Discretos com Múltiplos Graus de Liberdade

Dependendo da complexidade da estrutura e de seus modos de vibrar a serem considerados na análise sísmica, pode ser necessário descrever os deslocamentos em diversos nós e em diferentes direções. Esse sistema é conhecido como sistema de Múltiplos Graus de Liberdade (NGDL). Apesar de complexos em detalhes, o sistema de NGDL segue os mesmos princípios do sistema de 1GDL (HUMAR, 2001).

Seja um sistema com 3 graus de liberdade, exemplificado pela Figura 6 como um pórtico de 3 andares.

Figura 6 – Pórtico plano com três andares



Fonte: Adaptado, Lima e Santos (2008)

Fazendo o diagrama de corpo livre de cada um dos graus de liberdade, chega-se a equação de movimento:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \\ p_3(t) \end{Bmatrix} \quad (26)$$

que pode ser simplificada para:

$$[M]\{\ddot{d}\} + [C]\{\dot{d}\} + [K]\{d\} = \{p(t)\} \quad (27)$$

onde:

$[M]$ : Matriz de massa discreta;

$[C]$ : Matriz de amortecimento;

$[K]$ : Matriz de Rigidez;

$\{\ddot{d}\}$ : Vetor das acelerações;

$\{\dot{d}\}$ : Vetor das velocidades;

$\{d\}$ : Vetor dos deslocamentos;

$\{p(t)\}$ : Vetor das forças aplicadas.

#### 4.1.4.1 Vibração livre

Seja um sistema de NGDL, sem excitações externas e amortecimento. Neste caso, a equação do movimento é dado por:

$$[M]\{\ddot{d}\} + [K]\{d\} = 0 \quad (28)$$

A solução é dada por:

$$-[M]\omega_n^2\{\phi_j\} + [K]\{\phi_j\} = 0 \quad (29)$$

e sua solução não-trivial para o sistema é dada por:

$$\det [K] - \omega_n^2[M] = 0 \quad (30)$$

A solução desta equação implica em um problema de auto-valores e auto-vetores, mas não há possibilidade dos valores absolutos, visto ser uma sistema possível e indeterminado, ou seja, admite infinitas soluções. É aplicado o processo de normalização através das matrizes de massa, determinando um valor a uma das componentes do vetor, através da equação:

$$\{\phi_j\} = \frac{\{\phi_j\}}{\sqrt{\{\phi_j\}^T [M] \{\phi_j\}}} \quad (31)$$

Os  $n$  autovetores  $\lambda_j$  (que representam os modos de vibração da estrutura) podem ser agrupados em uma matriz, chamada de matriz modal, enquanto os  $n$  autovalores (que representam as frequências circulares  $\omega_{n_j}$ ) podem ser agrupados na chamada matriz espectral, respectivamente, como mostrado na Equação 32.

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \phi_{1,j} & . & . & . & \phi_{1,n} \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ \phi_{n,j} & . & . & . & \phi_{n,n} \end{bmatrix} \quad [\Omega] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & . & . & . & 0 \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ 0 & . & . & . & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (32)$$

Por fim, a Equação 29 torna-se:

$$[M][\Phi][\Omega] = [K][\Phi] \quad (33)$$

#### 4.1.5 Espaço Modal para Sistemas de Múltiplos Graus de Liberdade

Em sistemas nos quais o número de graus de liberdade é pequeno, é possível obter a solução analítica direta manualmente. Entretanto, as estruturas reais possuem milhares de graus de liberdade, e por isso a solução analítica direta se torna inviável tendo em vista a necessidade de solucionar um sistema linear com milhares de equações. Assim sendo, a

resposta pode ser obtida com o método modal. É por este motivo que opta-se por uma análise numérica.

Para isso, se faz necessário realizar a conversão da equação de movimento do espaço físico para o espaço modal. A partir das condições de ortogonalidade dos modos é possível realizar o desacoplamento das coordenadas de deslocamento, sendo possível solucionar cada equação de forma individual. Assim, é feita uma transformação de coordenadas do domínio  $\{q\}$  para  $\{u\}$  (CARREIRA, 2020).

#### 4.1.5.1 Vibração forçada sem amortecimento

A equação do movimento no espaço modal da vibração forçada sem amortecimento é dada por:

$$[M_m]\{\ddot{q}\} + [K_m]\{q\} = \{P_m\} \quad (34)$$

onde:

$[M_m]$ : Matriz de massa modal;

$[K_m]$ : Matriz de rigidez modal;

$\{\ddot{q}\}$ : Vetor de acelerações no espaço modal;

$\{q\}$ : Vetor de deslocamentos no espaço modal;

$\{P_m\}$ : Vetor de forças modais;

Ainda, tem-se que:

$$[M_m] = [\Phi]^T [M] [\Phi] \quad (35a)$$

$$[K_m] = [\Phi]^T [K] [\Phi] \quad (35b)$$

$$[P_m] = [\Phi]^T [P] [\Phi] \quad (35c)$$

com:

$$[\Phi] = [\{\phi_1\} \ \{\phi_2\}] \quad (36a)$$

$$[\Phi]^T = [\{\phi_1^T\} \ \{\phi_2^T\}] \quad (36b)$$

Ao encontrar a solução no espaço modal  $\{q\}$ , pode-se encontrar-se a resposta no espaço físico  $\{u\}$  pela Equação 37.

$$\{u\} = [\Phi]\{q\} \quad (37)$$

#### 4.1.5.2 Sistemas com amortecimento proporcional

A equação de movimento no espaço modal para um sistema de múltiplos graus de liberdade submetido a vibração forçada com amortecimento viscoso é dada por:

$$[M_m]\{\ddot{q}\} + [C_m]\{\dot{q}\} + [K_m]\{q\} = \{P_m\} \quad (38)$$

onde:

$[M_m]$ : Matriz de amortecimento modal;

$\{\dot{q}\}$ : Vetor das velocidades no espaço modal;

$\{\ddot{q}\}$ : Vetor das acelerações no espaço modal;

Ainda, tem-se que:

$$[C_m] = [\Phi]^T [C] [\Phi] \quad (39)$$

De acordo com Carreira (2020), uma maneira simples de desacoplar as equações de movimento é considerar o amortecimento proporcional à matriz de massa ou rigidez. Logo:

$$[C] = a_0 [M] \quad (40a)$$

$$[C] = a_1 [K] \quad (40b)$$

de modo que:

$$[C_m] = a_0 [M_m] \quad (41a)$$

$$[C_m] = a_1 [K_m] \quad (41b)$$

onde  $a_0$  e  $a_1$  são constantes de proporcionalidade

Novamente, uma vez encontrado a solução no espaço modal, pode-se utilizar a Equação 37 para encontrar a solução no espaço físico.

#### 4.1.5.3 Sistema de múltiplos graus de liberdade sujeito a aceleração de base

Seja um sistema de múltiplos graus de liberdade submetido a uma aceleração de base. Segundo Carreira (2020), o vetor das forças efetivas  $\{P_{ef}(t)\}$  que ocorre na estrutura é dada por:

$$\{P_{ef}(t)\} = -[M]\{1\}\ddot{u}_b(t) \quad (42)$$

em que:

$[M]$ : matriz de massa da estrutura;

$\{1\}$ : vetor coluna contendo  $n$  linhas no qual todos os elementos são iguais a 1;  
 $\ddot{u}_b(t)$ : aceleração de base no instante  $t$ .

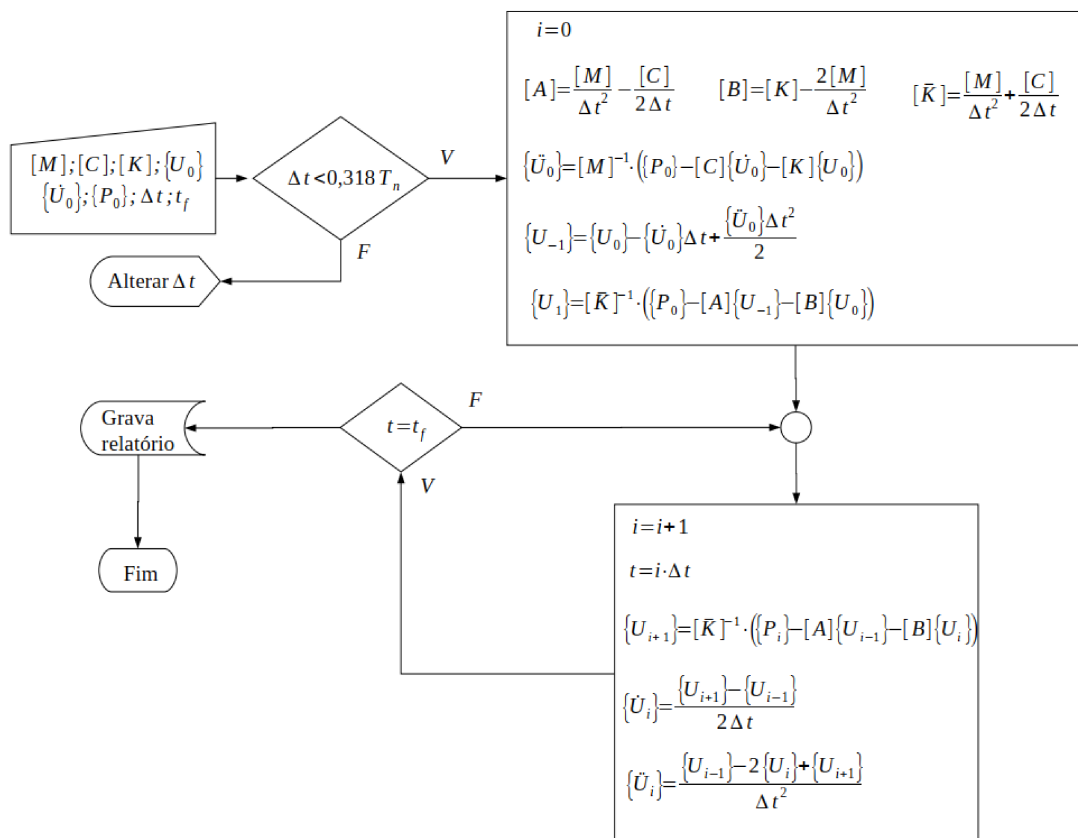
Por fim, o vetor das forças efetivas no espaço modal é dado por:

$$\{P_{m,ef}(t)\} = -[\Phi]^T[M]\{1\}\ddot{u}_b(t) \quad (43)$$

#### 4.1.6 Métodos Numéricos para Soluções de Sistemas de NGDL

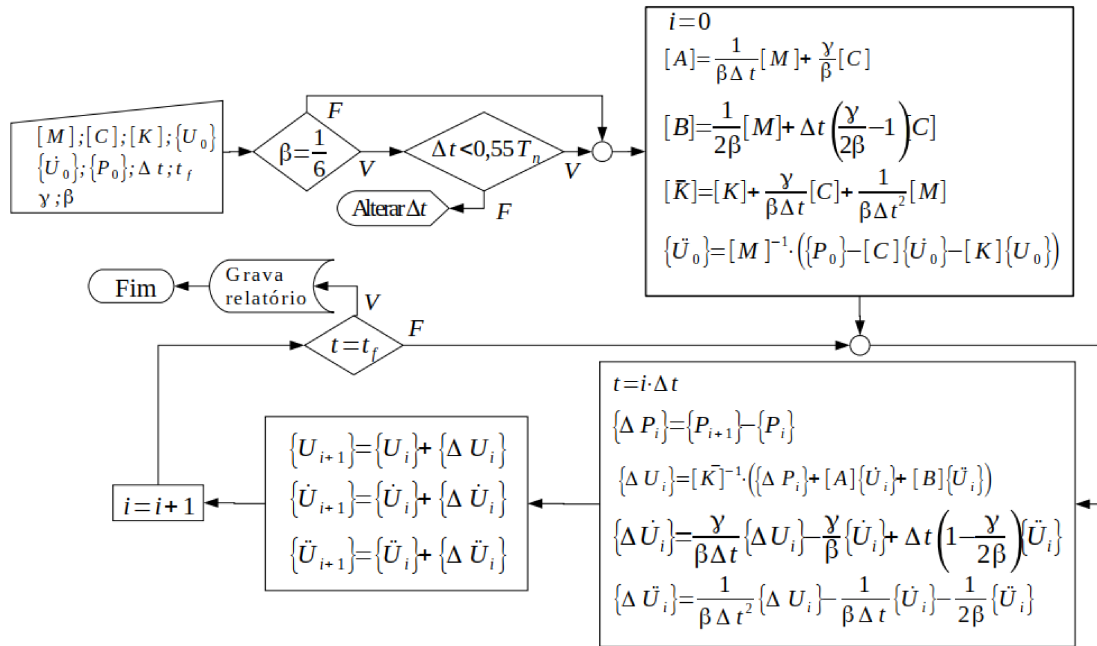
Abaixo, são apresentados os fluxogramas de dois métodos para a solução de sistema de múltiplos graus de liberdade. Em vista do volume de cálculo, seus objetivos são de trazer uma solução eficiente, através da programação em computador. A Figura 7 representa o Método das Diferenças Centrais e a Figura 8 o Método de Newmark.

Figura 7 – Fluxograma para integração direta pelo Método da Diferença Central aplicado a sistemas com múltiplos GDL



Fonte: Carreira (2020)

Figura 8 – Fluxograma para integração direta pelo Método de Newmark aplicado a sistemas com múltiplos GDL



Fonte: Carreira (2020)

#### 4.1.7 Espectros de Projeto para NGDL

Sabe-se que os espectros de reposta representam graficamente a resposta máxima, podendo ser em termos de aceleração, velocidade ou deslocamento) de um sistema de 1GDL a uma certa excitação. Nas análises sísmicas, os espectros de projeto representam os espectros de resposta de um sistema com 1GDL sujeito a sismos registrados em uma determinada região. Para os espectros de projeto, são considerados espectros de resposta de vários sismos e através de análise estatística são definidos.

Para sistemas com múltiplos graus de liberdade, é possível utilizar o espaço modal para decompor um sistema NGDL em  $n$  sistemas de 1GDL. A partir disso é possível aplicar o espectro de projeto para a obtenção da resposta máxima em cada modo de vibração. Posteriormente, com a superposição modal das respostas pode ser obtido a resposta máxima do sistema. Em edifícios complexos, com milhares de graus de liberdade, recorre-se a softwares capazes de realizar essas etapas com maior eficiência e velocidade, como é o caso do ROBOT.

## 4.2 OCORRÊNCIAS SÍSMICAS

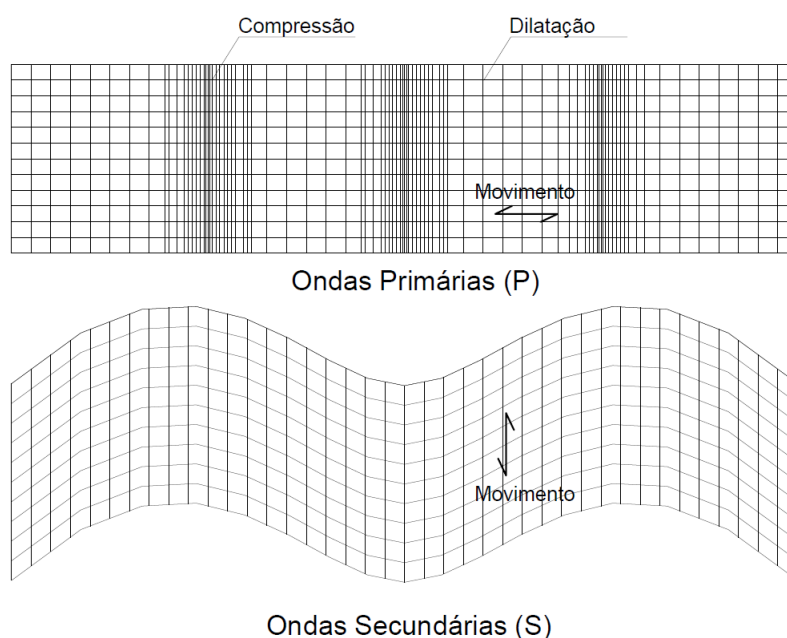
A atividade sísmica pode ser considerada de origem natural ou induzida. Os chamados induzidos são ocasionados pela ação humana de forma direta ou indireta, como os quais podem citar-se a extração de minerais, pressão da água de barragens, explosões, ruína de edifícios, etc. Os sismos naturais são os provocados pelo atrito causado pelo

movimento das placas tectônicas existentes sobre o manto do planeta terra (PARISENTI, 2011).

O movimento das placas tectônicas faz com que haja a acumulação de energia de deformação, que se concentra até o momento em que supere a resistência da rocha, é nesse momento em que ocorre uma grande liberação de energia, até o momento em que as placas atinjam uma nova posição de equilíbrio. A energia é liberada em forma de ondas de deformação que se propagam pela superfície (PARISENTI, 2011).

As ondas de deformação podem ser consideradas longitudinais de compressão – dilatação (ondas primárias ou P) ou transversais de corte (secundárias ou S), conforme pode ser visto na Figura 9 (DEFILTRO, 2018).

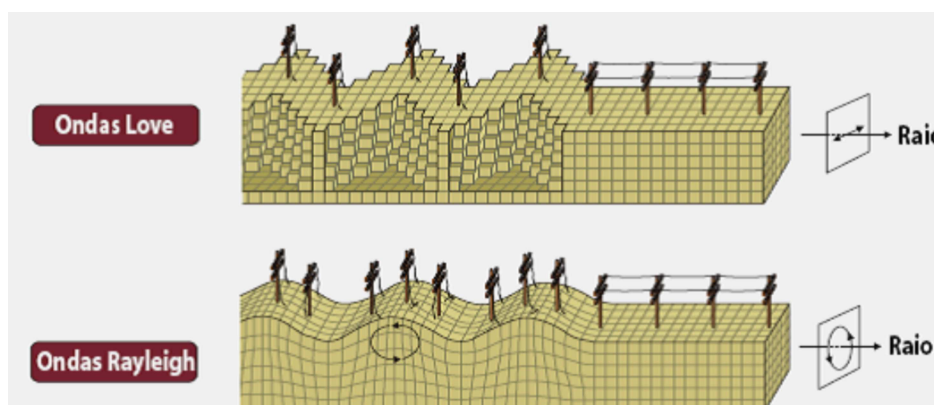
Figura 9 – Ondas primárias e secundárias



Fonte: Adaptado, Defiltro (2018)

Ainda existem duas outras ondas superficiais, as ondas R (de Rayleigh) e as ondas L (de Love), sendo distinguidas pelo movimento de menor velocidade, mas com alto potencial destrutivo. A Figura 10 ilustra melhor a sua ação (DEFILTRO, 2018).

Figura 10 – Ondas superficiais



Fonte: Torrao (2013)

### 4.3 PONDERAÇÕES SOBRE A NBR 15421:2006

A ABNT NBR 15421:2006 estabelece os procedimentos para o projeto de estruturas resistentes a sismos. Entretanto, a mesma apresenta uma série de requisitos a serem considerados para utilizá-la.

Tal norma não se aplica a estruturas especiais, como pontes, viadutos, obras hidráulicas, arcos, silos, tanques, vasos, chaminés, entre outros. Seu uso é voltado com o objetivo de garantir a segurança estrutural de edifícios da construção civil, visando a preservação das vidas humanas. Ainda, a norma condiciona o seu uso estritamente ao sistema estrutural, sem fazer abordagens relacionadas a sistemas elétricos, hidráulicos e sanitários, combate a incêndio, etc., que ficam condicionadas à normas brasileiras específicas (ABNT NBR 15421, 2006).

#### 4.3.1 Requisitos de Segurança

A ABNT NBR 15421:2006 deve ser utilizada em conjunto com as normativas já existentes para o cálculo das solicitações permanentes e acidentais, conforme visto pelo Quadro 1.

Quadro 1 – Normas utilizadas em conjunto

| Tipo de elemento estrutural               | Norma a ser utilizada em conjunto |
|-------------------------------------------|-----------------------------------|
| Elementos em concreto armado e protendido | ABNT NBR 6118:2014                |
| Elementos de aço estrutural               | ABNT NBR 8800:2008                |
| Fundações                                 | ABNT NBR 6122:6122                |
| Elementos pré-moldados                    | ABNT NBR 9062:2017                |

Fonte: Elaborada pelo autor

Os coeficientes de ponderação a serem consideradas para o cálculo são:

- $\gamma_g$  – de acordo com os valores definidos nas tabelas 1 e 2 da ABNT NBR 8681:2003 para ações permanentes na combinação última excepcional;

- $\gamma_q$  de acordo com as tabelas 4 e 5 da ABNT NBR 8681:2003 – para ações variáveis na combinação última excepcional;
- $\gamma_{exc}$  de acordo com 5.1.4.3 da ABNT NBR 8681:2003 – para ações excepcionais na combinação última excepcional.

#### 4.3.2 Valores Característicos

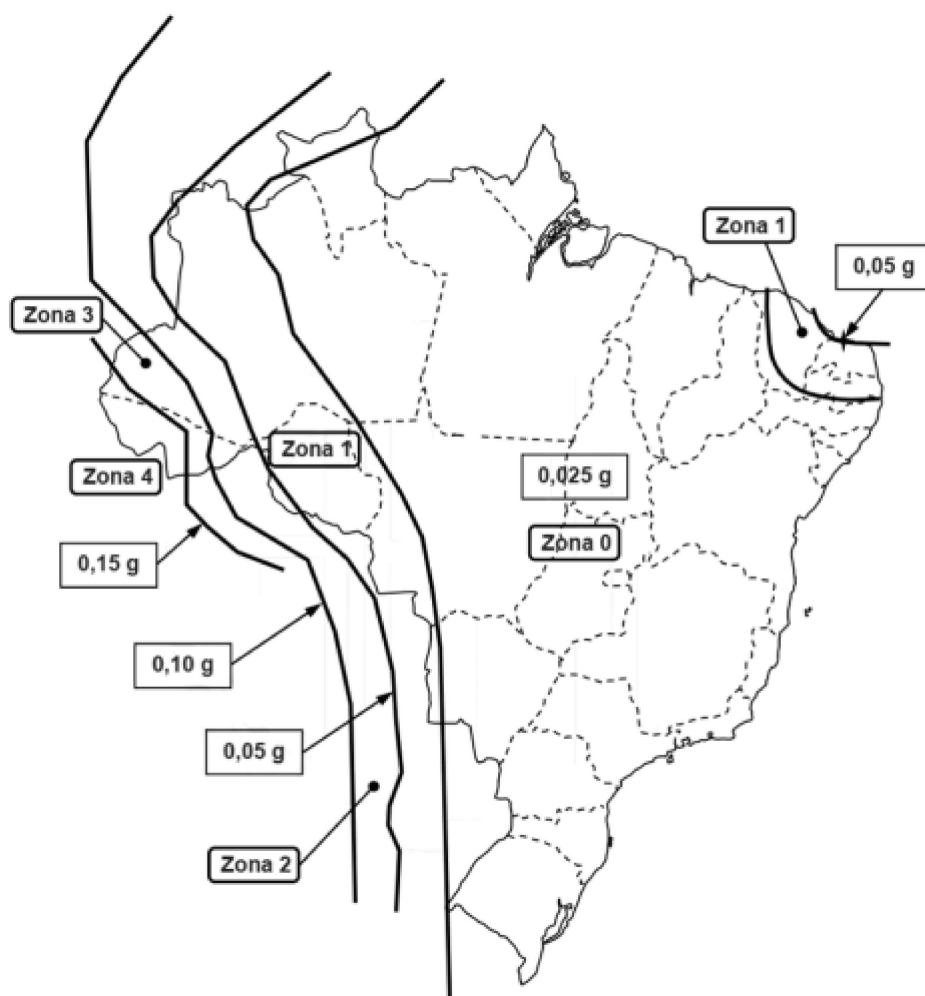
A definição das acelerações características a serem utilizadas nos projetos são consideradas a partir da Figura 11 com o auxílio da Tabela 1, onde  $a_g$  é a aceleração sísmica horizontal característica normalizada para terrenos de classe B (Rocha) e  $g$  ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) a aceleração gravitacional.

Tabela 1 – Zonas Sísmicas

| <b>Zona Sísmica</b> | <b>Valores de <math>a_g</math></b> |
|---------------------|------------------------------------|
| Zona 0              | $a_g = 0,025g$                     |
| Zona 1              | $0,025g \leq a_g \leq 0,05g$       |
| Zona 2              | $0,05 \leq a_g \leq 0,10g$         |
| Zona 3              | $0,10g \leq a_g \leq 0,15g$        |
| Zona 4              | $a_g = 0,15g$                      |

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 15421 (2006)

Figura 11 – Mapeamento da aceleração sísmica horizontal característica no Brasil para terrenos da classe B (“Rocha”)



Fonte: Adaptado, ABNT NBR 15421 (2006)

Para as estruturas localizadas entre as zonas 1 a 3 podem ser obtidos valores a partir de uma interpolação nas curvas. Ainda, pode ser utilizado um estudo sísmológico e geológico específico para a determinação de  $a_g$ .

O terreno é definido a partir das classes no Quadro 2, partindo de valores geotécnicos encontrados no 30 metros superiores. Se a velocidade de propagação das ondas  $V_s$  não for conhecida, pode-se classificar o terreno a partir do número médio de golpes do ensaio de penetração padronizado (SPT). Ainda, se houver uma camada superficial nos 3 primeiros metros, o solo não pode ser considerado A ou B.

Quadro 2 – Classe do terreno

| Classe do Terreno | Designação da classe do terreno     | Propriedades médias para os 30 m superiores do terreno                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                           |
|-------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
|                   |                                     | $\bar{V}_s$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | $\bar{N}$                 |
| A                 | Rocha Sã                            | $\bar{V}_s \geq 1500\text{m/s}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | (não aplicável)           |
| B                 | Rocha                               | $1500 \geq \bar{V}_s \geq 760\text{m/s}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | (não aplicável)           |
| C                 | Rocha alterada ou solo muito rígido | $760 \geq \bar{V}_s \geq 370\text{m/s}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | $\bar{N} \geq 50$         |
| D                 | Solo Rígido                         | $370 \geq \bar{V}_s \geq 180\text{m/s}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | $50 \geq \bar{N} \geq 15$ |
| E                 | Solo Mole                           | $\bar{V}_s \leq 180\text{m/s}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | $\bar{N} \leq 15$         |
|                   | -                                   | Qualquer perfil, incluindo camada com mais de 3 m de argila mole                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                           |
| F                 | -                                   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Solo exigindo avaliação específica, como:</li> <li>2 Solos vulneráveis à ação sísmica, como solos liquefazíveis, argilas muito sensíveis e solos colapsíveis fracamente cimentados;</li> <li>3 Turfa ou argilas muito orgânicas;</li> <li>4 Argilas muito plásticas;</li> <li>5 Estratos muito espessos (<math>\geq 35\text{ m}</math>) de argila mole ou média.</li> </ol> |                           |

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 15421 (2006)

Para a categorização das estruturas, deve ser considerado tanto a sua zona sísmica, quanto o tipo de utilização. Isto definirá o fator de importância da solicitação,  $I$ . O Quadro 3 apresenta a definição do fator  $I$  e, quando uma estrutura obtiver mais de um tipo de natureza de ocupação, a maior deve prevalecer.

Quadro 3 – Definição das categorias de utilização e dos fatores de importância de utilização (I)

| <b>Categoria de utilização</b> | <b>Natureza da ocupação</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>Fator I</b> |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| I                              | Todas as estruturas não classificadas como de categoria II ou III                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1,0            |
| II                             | <p>Estruturas de importância substancial para a preservação da vida humana no caso de ruptura, incluindo, mas não estando limitadas às seguintes:</p> <p>Estruturas em que haja reunião de mais de 300 pessoas em uma única área;</p> <p>Estruturas para educação pré-escolar com capacidade superior a 150 ocupantes;</p> <p>Estruturas para escolas primárias ou secundárias com mais de 250 ocupantes;</p> <p>Estruturas para escolas superiores ou para educação de adultos com mais de 500 ocupantes;</p> <p>Instituições de saúde para mais de 50 pacientes, mas sem instalações de tratamento de emergência ou para cirurgias;</p> <p>Instituições penitenciárias;</p> <p>Quaisquer outras estruturas com mais de 5 000 ocupantes;</p> <p>Instalações de geração de energia, de tratamento de água potável, de tratamento de esgotos e outras instalações de utilidade pública não classificadas como de categoria III;</p> <p>Instalações contendo substâncias químicas ou tóxicas cujo extravasamento possa ser perigoso para a população, não classificadas como de categoria III.</p> | 1,25           |
| III                            | <p>Estruturas definidas como essenciais, incluindo, mas não estando limitadas, às seguintes:</p> <p>Instituições de saúde com instalações de tratamento de emergência ou para cirurgias;</p> <p>Prédios de bombeiros, de instituições de salvamento e policiais e garagens para veículos de emergência;</p> <p>Centros de coordenação, comunicação e operação de emergência e outras instalações necessárias para a resposta em emergência;</p> <p>Instalações de geração de energia e outras instalações necessárias para a manutenção em funcionamento das estruturas classificadas como de categoria III;</p> <p>Torres de controle de aeroportos, centros de controle de tráfego aéreo e hangares de aviões de emergência;</p> <p>Estações de tratamento de água necessárias para a manutenção de fornecimento de água para o combate ao fogo;</p> <p>Estruturas com funções críticas para a Defesa Nacional;</p> <p>Instalações contendo substâncias químicas ou tóxicas consideradas altamente perigosas, conforme classificação de autoridade governamental designada para tal;</p>       | 1,50           |

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 15421 (2006)

O Quadro 4 elenca os tipos de categoria definida para cada estrutura, a depender

de sua zona sísmica.

Quadro 4 – Categoria sísmica

| <b>Zona Sísmica</b> | <b>Categoria Sísmica</b> |
|---------------------|--------------------------|
| Zonas 0 e 1         | A                        |
| Zona 2              | B                        |
| Zonas 3 e 4         | C                        |

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 15421 (2006)

A norma brasileira dispensa a necessidade de verificação da resistência sísmica para estruturas na Zona sísmica 0. Estruturas na zona 1 devem possuir sistemas estruturais resistentes nas duas direções ortogonais, de forma independente para cada piso, com incremento de 1% do peso do andar para cada piso, além de um mecanismo resistente a torção.

Além disso, elenca que deve ser realizado um estudo mais rigoroso para as categorias B e C, através do Método das Forças Equivalentes (MFE), Método do Espectro de Resposta (MER) ou ainda com histórico de acelerações no tempo.

A Tabela 2 representa os coeficientes de projeto para diversos sistemas básicos sismo-resistentes.

Tabela 2 – Coeficientes de projeto para os diversos sistemas básicos sismo-resistentes

| Sistema básico sismo resistente                                                                                                    | Coeficiente de modificação de resposta $R$ | Coeficiente de sobre-resistência $\Omega_0$ | Coeficiente de amplificação de deslocamentos $C_d$ |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Pilares-parede de concreto com detalhamento especial                                                                               | 5,00                                       | 2,50                                        | 5,00                                               |
| Pilares-parede de concreto com detalhamento usual                                                                                  | 4,00                                       | 2,50                                        | 4,00                                               |
| Pórticos de concreto com detalhamento especial                                                                                     | 8,00                                       | 3,00                                        | 5,50                                               |
| Pórticos de concreto com detalhamento intermediário                                                                                | 5,00                                       | 3,00                                        | 4,50                                               |
| Pórticos de concreto com detalhamento usual                                                                                        | 3,00                                       | 3,00                                        | 4,50                                               |
| Pórticos de aço momento-resistentes com detalhamento especial                                                                      | 8,00                                       | 3,00                                        | 5,50                                               |
| Pórticos de aço momento-resistentes com detalhamento intermediário                                                                 | 4,50                                       | 3,00                                        | 4,00                                               |
| Pórticos de aço momento-resistentes com detalhamento usual                                                                         | 3,50                                       | 3,00                                        | 3,00                                               |
| Pórticos de aço contraventados em treliça, com detalhamento especial                                                               | 6,00                                       | 2,00                                        | 5,00                                               |
| Pórticos de aço contraventados em treliça, com detalhamento usual                                                                  | 3,25                                       | 2,00                                        | 3,25                                               |
| Sistema dual, composto de pórticos com detalhamento especial e pilares-parede de concreto com detalhamento especial                | 7,00                                       | 2,50                                        | 5,50                                               |
| Sistema dual, composto de pórticos com detalhamento especial e pilares-parede de concreto com detalhamento usual                   | 6,00                                       | 2,50                                        | 5,00                                               |
| Sistema dual, composto de pórticos com detalhamento especial e pórticos de aço contraventados em treliça com detalhamento especial | 7,00                                       | 2,500                                       | 5,50                                               |
| Sistema dual, composto de pórticos com detalhamento intermediário e pilares-parede de concreto com detalhamento especial           | 6,50                                       | 2,50                                        | 5,00                                               |
| Sistema dual, composto de pórticos com detalhamento intermediário e pilares-parede de concreto com detalhamento usual              | 5,50                                       | 2,50                                        | 4,50                                               |
| Sistema dual, composto de pórticos com detalhamento usual e pilares-parede de concreto com detalhamento usual                      | 4,50                                       | 2,50                                        | 4,00                                               |
| Estruturas do tipo pêndulo invertido e sistemade colunas em balanço                                                                | 2,50                                       | 2,00                                        | 2,50                                               |

Fonte: ABNT NBR 15421 (2006)

#### 4.3.3 Análise Sísmica pelo Método das Forças Horizontais Equivalentes

A força horizontal na base da estrutura para uma certa direção, é dada por:

$$H = C_s W \quad (44)$$

onde:

$C_s$ : coeficiente de resposta sísmica.

$W$ : peso total da estrutura, considerando todas as cargas permanentes, incluindo o peso operacional de equipamentos fixados na estrutura. Em área de armazenamento e estacionamento 25% da carga acidental deve ser incluída

O coeficiente de resposta sísmica é dado por:

$$C_s = \frac{2,5(a_{gs0}/g)}{(R/I)} \quad (45)$$

com:

$$0,01 \leq C_s \leq \frac{2,5(a_{gs1}/g)}{T(R/I)} \quad (46)$$

onde:

$a_{gs0}$ : aceleração espectral para o período de 0,0s, já considerando o efeito da amplificação sísmica no solo;

$a_{gs1}$ : aceleração espectral para o período de 1,0 s, já considerado o efeito da amplificação sísmica no solo.

O período natural  $T$  pode ser obtido por extração modal, mas não pode ser maior do que  $C_{up} \times T_a$ , em que  $C_{up}$  é o coeficiente de limitação do período e  $T_a$  o período natural aproximado da estrutura, de tal forma que:

$$T_a = C_T \cdot h_n^x \quad (47)$$

em que:

$h_n$ : altura, em metros, da estrutura acima da base.

Os valores de  $C_T$  e  $x$  são determinados pela Tabela 3 e o  $C_{up}$  pela Tabela 4. A norma permite utilizar o período natural aproximado diretamente como maneira alternativa à determinação analítica.

Tabela 3 – Valores de  $C_T$  e  $x$ 

| Valores                     | Aplicações                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $C_T = 0,0724$ e $x = 0,8$  | para estruturas em que as forças sísmicas horizontais são 100% resistidas por pórticos de aço momento-resistentes, não sendo estes ligados a sistemas mais rígidos que impeçam sua livre deformação quando submetidos à ação sísmica; |
| $C_T = 0,0466$ e $x = 0,9$  | para estruturas em que as forças sísmicas horizontais são 100% resistidas por pórticos de concreto, não sendo estes ligados a sistemas mais rígidos que impeçam sua livre deformação quando submetidos à ação sísmica;                |
| $C_T = 0,0731$ e $x = 0,75$ | para estruturas em que as forças sísmicas horizontais são resistidas em parte por pórticos de aço contraventados com treliças;                                                                                                        |
| $C_T = 0,0488$ e $x = 0,75$ | para todas as outras estruturas.                                                                                                                                                                                                      |

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 15421 (2006)

Tabela 4 – Coeficiente de limitação do período

| Zona Sísmica | Coeficiente de limitação do período $C_{up}$ |
|--------------|----------------------------------------------|
| Zona 2       | 1,7                                          |
| Zona 3       | 1,6                                          |
| Zona 4       | 1,5                                          |

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 15421 (2006)

A distribuição vertical das forças sísmicas é feita através da Equação 48, de forma que em cada elevação  $x$ , seja aplicada uma força  $F_x$ .

$$F_x = C_{vx}H \quad (48)$$

em que:

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^z}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^z} \quad (49)$$

no qual:

$C_{vx}$ : coeficiente de distribuição vertical;

$w_i$  e  $w_x$ : parcelas do peso efetivo total que correspondem às elevações  $i$  ou  $x$ , respectivamente;

$h_i$  e  $h_x$ : alturas entre a base e as elevações  $i$  ou  $x$ , respectivamente;

$z$ : expoente de distribuição, relacionado ao período natural da estrutura  $T$ , com os seguintes valores:

- Para estruturas com período inferior a 0,5 s,  $z = 1$ ;
- Para estruturas com períodos entre 0,5 s e 2,5 s,  $z = (T + 1,5)/2$ ;
- Para estruturas com período superior a 2,5 s,  $z = 2$ .

As forças sísmicas horizontais  $F_x$ , correspondentes a cada elevação  $x$ , devem ser aplicadas a um modelo de distribuição destas forças entre os diversos elementos verticais sismo-resistentes, que considere a rigidez relativa dos diversos elementos verticais e dos diafragmas horizontais. Este modelo pode ser também utilizado para avaliar os efeitos de torção na estrutura (ABNT NBR 15421, 2006).

Para fazer a consideração dos efeitos de torção, o projeto deve conter um momento de torção inerente ( $M_t$ ) nos pisos, com o acréscimo de um momento torsional accidental ( $M_{ta}$ ), calculado pelo deslocamento do centro de massa em cada direção com um valor de 5% da dimensão da estrutura paralela ao eixo perpendicular à direção das forças horizontais.

Caso seja de categoria sísmica C, o momento ( $M_{ta}$ ) deve ser multiplicado por:

$$A_x = \left( \frac{\delta_{max}}{1,2\delta_{avg}} \right)^2 \quad (50)$$

de forma que:

$$A_x \leq 3,0 \quad (51)$$

em que:

$\delta_{max}$ : deslocamento horizontal máximo em uma direção, na elevação  $x$  em questão;

$\delta_{avg}$ : média dos deslocamentos na mesma direção, nos pontos extremos da estrutura em um eixo transversal a esta direção.

Os deslocamentos absolutos  $\delta_x$  devem ser determinados através da Equação

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I} \quad (52)$$

em que:

$C_d$ : coeficiente de amplificação de deslocamentos, dado na Tabela 2;

$\delta_{xe}$ : deslocamento determinado em uma análise estática;

$I$ : fator de importância de utilização dado no Quadro 3.

#### 4.3.4 Análise Sísmica pelo Método Espectral

A norma ABNT NBR 15421:2006 indica que o número de modos a serem analisados deve ser suficiente para captar pelo menos 90% da massa total em cada uma das direções ortogonais consideradas. Ainda, todas as respostas modais em termos de força, momentos e reações, devem ser multiplicados pelo fator  $I/R$  e as respostas em termos de deslocamentos absolutos multiplicados pelo fator  $C_d/R$ . As respostas finais podem ser combinadas pela regra da raiz quadrada da soma dos quadrados das respostas obtidas em cada modo de vibração, definida por:

$$E_{max} \cong \left[ \sum_{j=1}^n E_{N_{maxj}}^2 \right] \quad (53)$$

onde:

$E_{max}$ : valor máximo do efeito considerado;

$E_{Nmaxj}$ : contribuição do j-ésimo modo para o mesmo efeito.

#### 4.3.4.1 Determinação do espectro de projeto

O espectro de projeto para acelerações horizontais, corresponde a resposta elástica de um sistema com 1GDL com amortecimento de 5%, estabelecido baseado na aceleração sísmica horizontal característica,  $a_g$  e da classe do terreno de acordo com Equação 54.

$$a_{gs0} = C_a a_g$$

$$a_{gs1} = C_v a_g \quad (54)$$

em que:

$C_a$  e  $C_v$ : fatores de amplificação sísmica no solo, para os períodos de 0,0 s e 1,0 s, respectivamente, conforme Tabela 5, em função da aceleração característica de projeto  $a_g$  e da classe do terreno;

$T$ : é o período natural, em segundos, associado a cada um dos modos de vibração da estrutura;

$a_{ags0}$ : Aceleração sísmica Espectral para  $T=0,;$

$a_{ags1}$ : Aceleração sísmica Espectral para  $T=1,0s$ .

Tabela 5 – Fatores de amplificação sísmica no solo

| Classe do Terreno | $C_a$            |               | $C_v$            |               |
|-------------------|------------------|---------------|------------------|---------------|
|                   | $a_g \leq 0,10g$ | $a_g = 0,15g$ | $a_g \leq 0,10g$ | $a_g = 0,15g$ |
| A                 | 0,8              | 0,8           | 0,8              | 0,8           |
| B                 | 1,0              | 1,0           | 1,0              | 1,0           |
| C                 | 1,2              | 1,2           | 1,7              | 1,7           |
| D                 | 1,6              | 1,5           | 2,4              | 2,2           |
| E                 | 2,5              | 2,1           | 3,5              | 3,4           |

Fonte: ABNT NBR 15421 (2006)

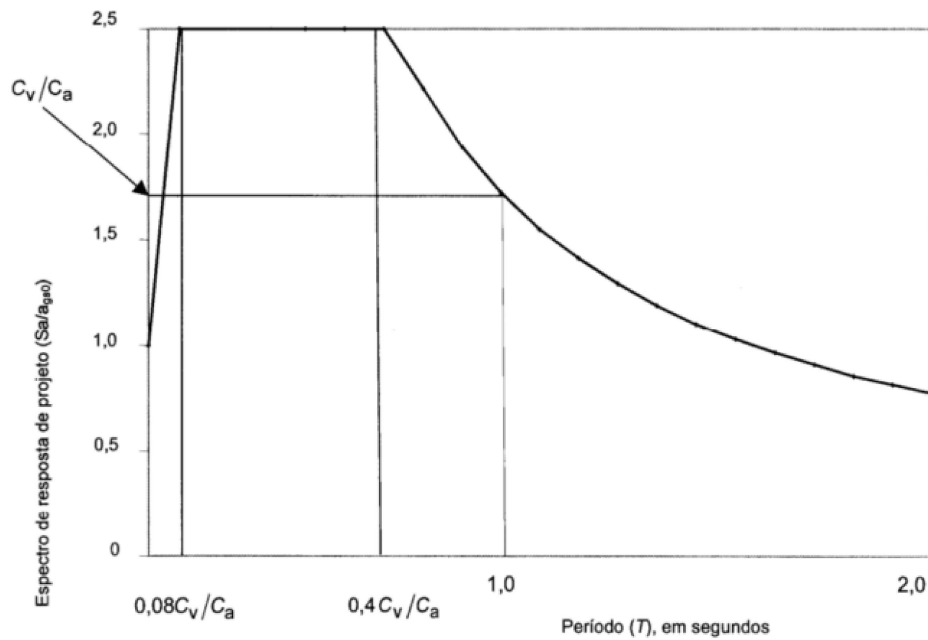
O espectro de projeto é aplicado à base da estrutura. Ao se constatar a estrutura ou parte dela amortecimento crítico diferente de 5%, pode ser aplicado um fator de correção devidamente justificado pelo projetista.

O espectro de projeto é definido na Figura 12 com as seguintes faixas:

$$\begin{aligned}
S_a(T) &= a_{gs0} \frac{18,75TC_a}{C_v + 1,0} & (\text{para } 0 \leq T \leq \frac{C_v}{C_a}0,08) \\
S_a(T) &= 2,5a_{gs0} & (\text{para } \frac{C_v}{C_a}0,08 \leq T \leq \frac{C_v}{C_a}0,04) \\
S_a(T) &= \frac{a_{gs1}}{T} & (\text{para } \frac{C_v}{C_a}0,04 \geq T)
\end{aligned}$$

Caso seja necessário definir um espectro de projeto para acelerações verticais, estes podem ser tomadas como 50% dos espectros para acelerações horizontais.

Figura 12 – Variação do espectro de resposta de projeto ( $S_a/a_{gs0}$ ) em função do período ( $T$ )



Fonte: ABNT NBR 15421 (2006)

#### 4.3.4.2 Forças elásticas máximas

De acordo com Parisenti (2011), o deslocamento máximo do sistema é definido por:

$$u_{max} = \frac{S_V}{\omega} = S_d \quad (55)$$

onde:

$S_d$ : deslocamento espectral.

$S_V$ : pseudo-velocidade,

$\omega$ : frequência fundamental do sistema.

Dessa maneira, a aceleração espectral é definida por:

$$S_a = \omega S_V = \omega^2 S_d \quad (56)$$

E por fim, as forças horizontais máximas podem ser definidas pela Equação 57.

$$f_{S_{max}} = kS_d = \omega^2 m S_d = m S_a \quad (57)$$

#### 4.3.4.3 Verificação das forças obtidas

A força horizontal na base da estrutura  $H_t$  deve ser comparada pela força horizontal  $H$  do Método das Forças Equivalentes. Caso  $H_t < 0,85H$ , todas as forças elásticas nesta direção devem ser multiplicadas pelo fator  $0,85 \frac{H}{H_t}$ , para efeito de correção.

#### 4.3.5 Requisitos para Análise de Prédios

De acordo com a ABNT NBR 15421:2006, todo prédio deve possuir um sistema estrutural capaz de fornecer adequada rigidez, resistência e capacidade de dissipação de energia, relativamente às ações sísmicas, no sentido vertical e em duas direções ortogonais horizontais, inclusive com um mecanismo de resistência a esforços de torção. As ações sísmicas horizontais aqui definidas podem atuar em qualquer direção de uma estrutura.

Um sistema contínuo de transferência de cargas deve ser projetado, com adequada rigidez e resistência, para garantir a transferência das forças sísmicas, desde os seus pontos de aplicação até as fundações da estrutura. Sistemas com descontinuidades bruscas de rigidez ou de resistência em planta ou em elevação não são recomendados. Uma distribuição uniforme e contínua de resistência e de rigidez nas estruturas é desejável (ABNT NBR 15421, 2006).

São recomendados sistemas estruturais repetidos, através de várias linhas de elementos verticais, conectados pelos diafragmas horizontais de elevada capacidade de dissipação de energia.

Diafragma é a parte horizontal do sistema estrutural sismo-resistente, composto pelas lajes de um piso, projetado de maneira a ser capaz de transferir asseguradamente as forças atuantes para os elementos verticais da estrutura (LIMA; SANTOS, 2008).

#### 4.4 COMBINAÇÃO DE AÇÕES

De acordo com a ABNT NBR 8681:2003, a combinação últimas normais e excepcionais são determinadas pelas Equações 58 e 59, respectivamente.

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} F_{Gi,k} + \gamma_q \left[ F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{0j} F_{Qj,k} \right] \quad (58)$$

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + \gamma_q \left[ F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{0j,ef} F_{Qj,k} \right] \quad (59)$$

em que:

$F_{Gi,k}$ : valor característico das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$ : valor característico da ação variável considerada como ação principal para a combinação;

$F_{Qi,k}$ : valor característico da ação variável;

$F_{Q,exc}$ : valor da ação transitória excepcional;

$\Psi_{0j}$ : fator de combinação para demais ações variáveis;

$\Psi_{0j,ef}$ : fator de combinação efetivo de cada uma das demais variáveis que podem agir concomitantemente com a ação principal  $F_{Q1}$ , durante a situação transitória.

Os coeficientes de ponderação para as ações permanentes e variáveis são definidas de acordo com os Quadros 5 e 6, respectivamente.

Quadro 5 – Coeficiente de Ponderação  $\gamma_g$

| Combinação                | Tipo de estrutura                                  | Efeito       |           |
|---------------------------|----------------------------------------------------|--------------|-----------|
|                           |                                                    | Desfavorável | Favorável |
| Normal                    | Grandes pontes <sup>1)</sup>                       | 1,30         | 1,0       |
|                           | Edificações tipo 1 e pontes em geral <sup>2)</sup> | 1,35         | 1,0       |
|                           | Edificação tipo 2 <sup>3)</sup>                    | 1,40         | 1,0       |
| Especial ou de construção | Grandes pontes <sup>1)</sup>                       | 1,20         | 1,0       |
|                           | Edificações tipo 1 e pontes em geral <sup>2)</sup> | 1,25         | 1,0       |
|                           | Edificação tipo 2 <sup>3)</sup>                    | 1,30         | 1,0       |
| Excepcional               | Grandes pontes <sup>1)</sup>                       | 1,10         | 1,0       |
|                           | Edificações tipo 1 e pontes em geral <sup>2)</sup> | 1,15         | 1,0       |
|                           | Edificação tipo 2 <sup>3)</sup>                    | 1,20         | 1,0       |

<sup>1)</sup> Grandes pontes são aquelas em que o peso próprio da estrutura supera 75% da totalidade das ações.  
<sup>2)</sup> Edificações tipo 1 são aquelas onde as cargas acidentais superam 5 kN/m<sup>2</sup>.  
<sup>3)</sup> Edificações tipo 2 são aquelas onde as cargas acidentais não superam 5 kN/m<sup>2</sup>.

Fonte: ABNT NBR 8681 (2003)

Quadro 6 – Coeficiente de Ponderação  $\gamma_q$

| Combinação                | Tipo de ação                  | Coeficiente de ponderação |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Normal                    | Ações truncadas <sup>1)</sup> | 1,2                       |
|                           | Efeito de temperatura         | 1,2                       |
|                           | Ação do vento                 | 1,4                       |
|                           | Ações variáveis em geral      | 1,5                       |
| Especial ou de construção | Ações truncadas <sup>1)</sup> | 1,1                       |
|                           | Efeito de temperatura         | 1,0                       |
|                           | Ação do vento                 | 1,2                       |
|                           | Ações variáveis em geral      | 1,3                       |
| Excepcional               | Ações variáveis em geral      | 1,0                       |

<sup>1)</sup> Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico de modo que o valor dessa ação não pode superar o limite correspondente. O coeficiente de ponderação mostrado na tabela 4 se aplica a esse valor limite.

Fonte: ABNT NBR 8681 (2003)

Os fatores de combinação podem ser definidos pelo Quadro 7.

Quadro 7 – Fator de Combinação  $\gamma_q$ 

| Ações                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2^{3), 4)}$ |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|-------------------|
| Cargas acidentais de edifícios                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |          |          |                   |
| Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas <sup>1)</sup>                                                                                                                                                                                                                                                        | 0,5      | 0,4      | 0,3               |
| Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas <sup>2)</sup>                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,7      | 0,6      | 0,4               |
| Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,8      | 0,7      | 0,6               |
| Vento                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |          |          |                   |
| Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,6      | 0,3      | 0                 |
| Temperatura                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |          |          |                   |
| Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,6      | 0,5      | 0,3               |
| Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |          |          |                   |
| Passarelas de pedestres                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 0,6      | 0,4      | 0,3               |
| Pontes rodoviárias                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,7      | 0,5      | 0,3               |
| Pontes ferroviárias não especializadas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,8      | 0,7      | 0,5               |
| Pontes ferroviárias especializadas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 1,0      | 1,0      | 0,6               |
| Vigas de rolamentos de pontes rolantes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 1,0      | 0,8      | 0,5               |
| <sup>1)</sup> Edificações residenciais, de acesso restrito.<br><sup>2)</sup> Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.<br><sup>3)</sup> Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para $\psi_2$ o valor zero.<br><sup>4)</sup> Para combinações excepcionais onde a ação principal for o fogo, o fator de redução $\psi_2$ pode ser reduzido, multiplicando-o por 0,7. |          |          |                   |

Fonte: ABNT NBR 8681 (2003)

#### 4.5 PRÉ-DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

O pré-dimensionamento de elementos estruturais é realizado para possibilitar uma análise da concepção estrutural de forma aproximada, para que se possa fazer as análises em relação a estética e viabilidade econômica da estrutura. No processo de dimensionamento de estruturas de concreto armado, as dimensões adotadas dos elementos estruturais são verificadas e, caso necessário, ajustadas. Um processo de pré-dimensionamento detalhado, torna o processo mais preciso, e diminui as chances de alteração dos valores estipulados.

A ABNT NBR 6118:2014 não faz tratativas acerca do pré-dimensionamento de estruturas, apenas estipula os valores limites mínimos para suas dimensões, para que os elementos não possuam um comportamento ineficiente. A partir disso, os elementos foram pré-dimensionados de acordo com as práticas usuais de projetos.

## 5 MÉTODOS

### 5.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Não será analisada a interação solo-estrutura. As fundações do edifício serão consideradas como engastes perfeitos no pavimento térreo. Além disso, o subsolo contido no projeto inicial será desconsiderado e o solo é não estratificado.

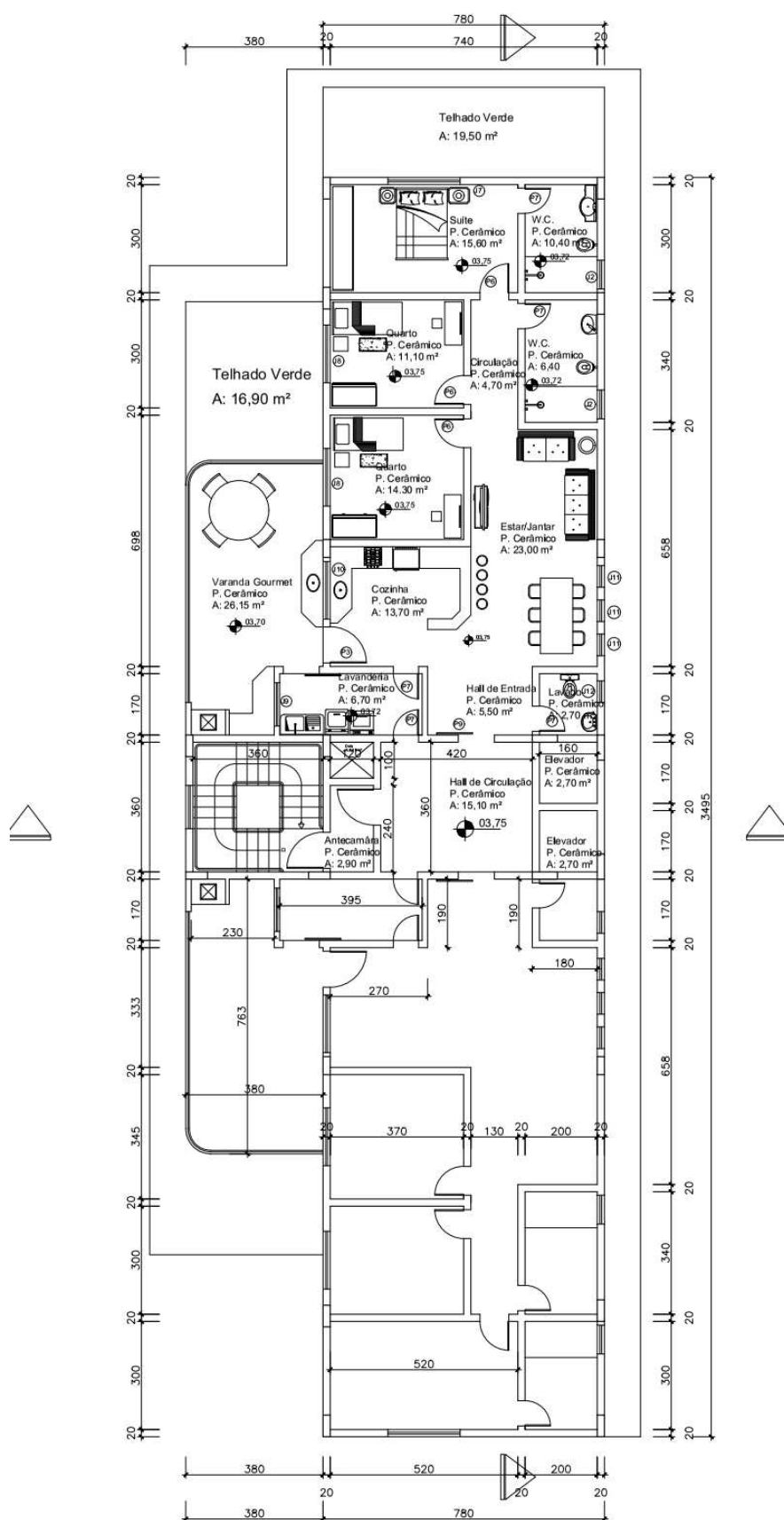
Ainda, será apenas analisada a estrutura da edificação, considerando as lajes como diafragmas rígidos. Os elementos não estruturais não entrarão na verificação deste trabalho. A estrutura será verificada considerando apenas os estados limites últimos (ELU) da edificação, nas condições normais e excepcionais.

### 5.2 EDIFÍCIO ANALISADO

O edifício a ser analisado é residencial multi-pavimentos, de autoria própria, realizado disciplina de Projeto de Edifícios (código CV32C) do curso de graduação em engenharia civil, do professor Roberto Widerski.

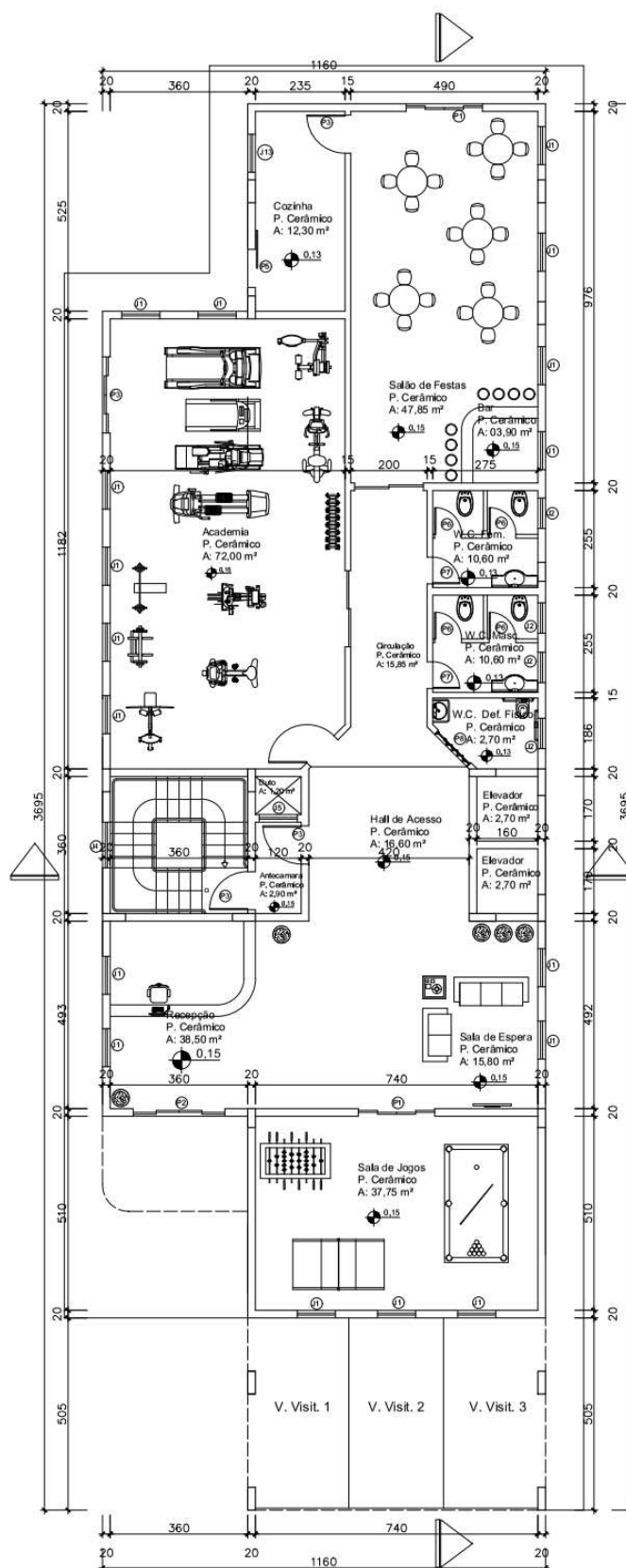
A arquitetura da edificação está disponibilizada em formato .dwg. Para a modelagem da estrutura em concreto armado, será utilizada a versão educacional do software Autodesk Revit Architecture, versão estudantil.

Figura 13 – Planta Baixa do Pavimento Tipo



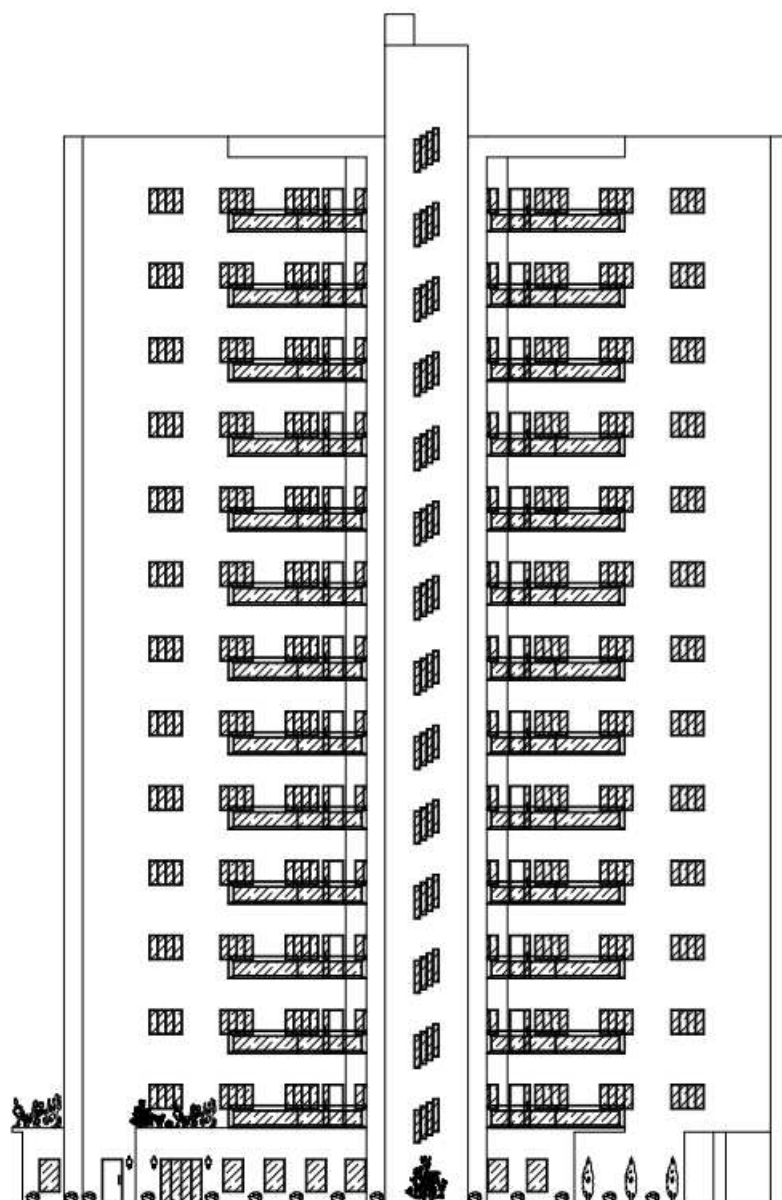
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 14 – Planta Baixa do Pavimento Térreo



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 15 – Fachada



Fonte: Elaborada pelo autor

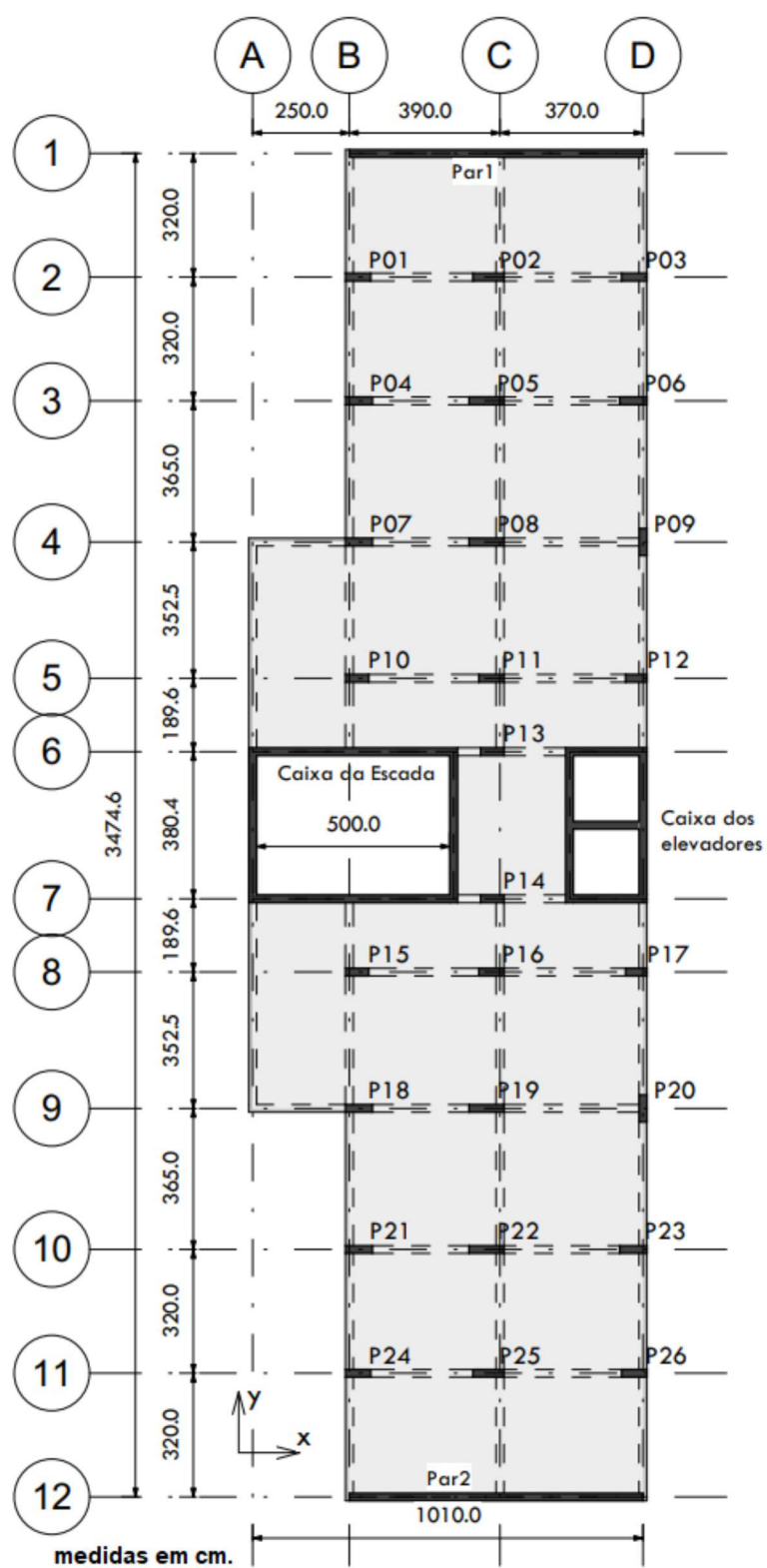
### 5.3 ANÁLISE DA ESTRUTURA E MODIFICAÇÕES PROPOSTAS

Considerando a ABNT NBR 15421:2006 e as literaturas apresentadas, a arquitetura da edificação foi analisada a fim de adequá-la às condições para edifícios sismo-resistentes.

Desta maneira, a planta da arquitetura foi ajustada conforme a Figura 16. Foi diminuído o tamanho do hall de acesso com o objetivo de aproximar a caixa da escada com o resto do edifício que, conseqüentemente, tornou a área em balanço da área externa menor. A lavanderia e o lavabo foram modificados com o intuito de possibilitar o ajuste com a planta de formas da estrutura proposta.

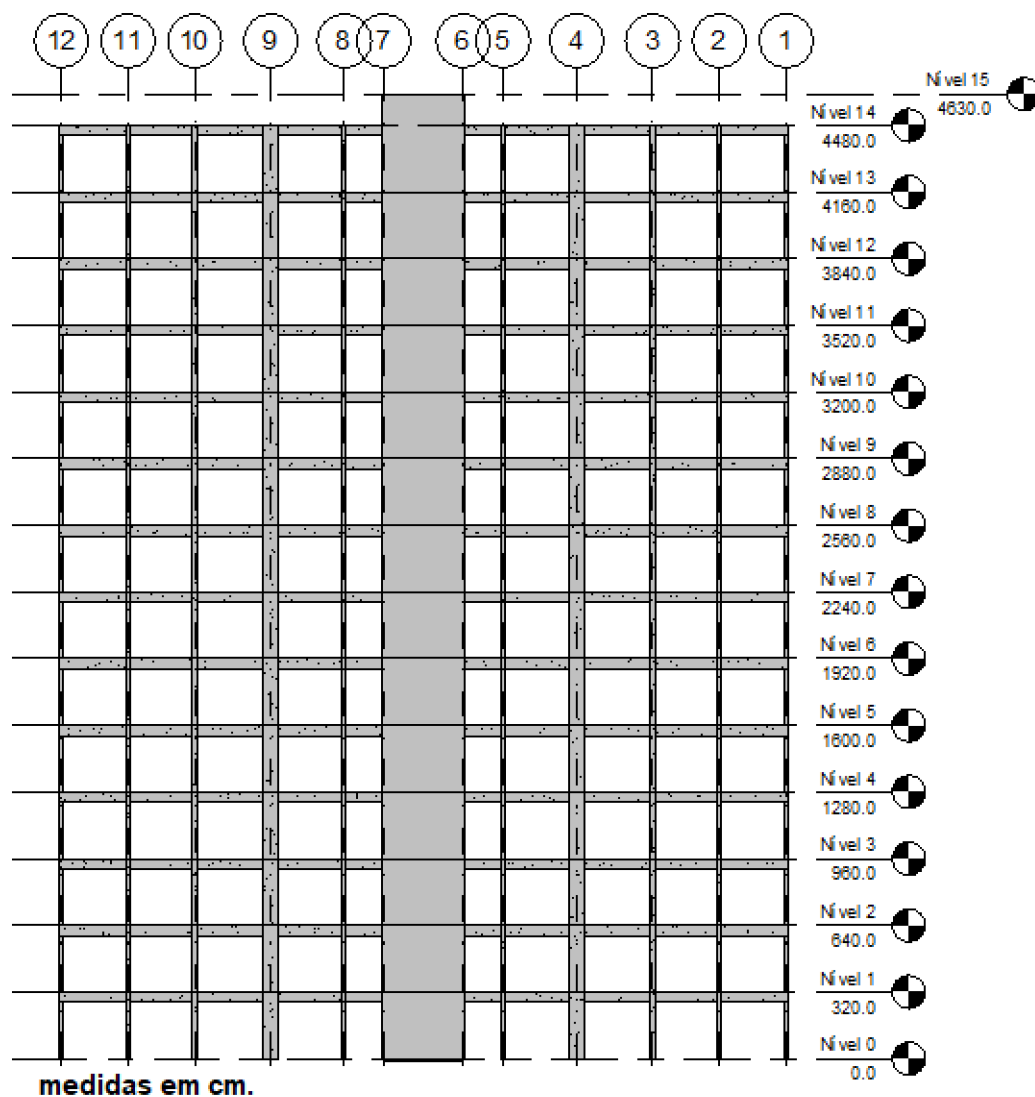


Figura 17 – Planta de Forma



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 18 – Vista Estrutural



Fonte: Elaborada pelo autor

#### 5.4 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

A partir das modificações iniciais propostas, a estrutura (pilares, vigas e lajes) passou pela fase de pré-dimensionamento, de acordo com as práticas usuais, para obter de forma estimada a geometria dos elementos estruturais. As vigas possuem seção 20x40cm, enquanto as lajes são maciças e possuem espessura de 10 centímetros. As paredes de concreto possuem espessura de 20 centímetros e as seções dos pilares são definidos conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Tabela de pilares pré-dimensionados

| <b>Pilar</b> | <b>Seção Adotada (cm)</b> | <b>Pilar</b> | <b>Seção Adotada (cm)</b> |
|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|
| P01          | 20x65                     | P14          | 20x60                     |
| P02          | 20x80                     | P15          | 20x55                     |
| P03          | 20x65                     | P16          | 20x65                     |
| P04          | 20x70                     | P17          | 20x60                     |
| P05          | 20x90                     | P18          | 20x70                     |
| P06          | 20x70                     | P19          | 20x90                     |
| P07          | 20x70                     | P20          | 20x70                     |
| P08          | 20x90                     | P21          | 20x70                     |
| P09          | 20x70                     | P22          | 20x90                     |
| P10          | 20x60                     | P23          | 20x70                     |
| P11          | 20x65                     | P24          | 20x65                     |
| P12          | 20x55                     | P25          | 20x80                     |
| P13          | 20x60                     | P26          | 20x65                     |

Fonte: Elaborada pelo autor

## 5.5 DETERMINAÇÃO DAS AÇÕES USUAIS

A estrutura do edifício analisado é toda em concreto armado, com as propriedades dos materiais adotadas de acordo com a Tabela 7, obtidos a partir da ABNT NBR 6118:2014.

Tabela 7 – Propriedade dos materiais

| <b>Material</b>                     | <b>Concreto Armado</b>  |
|-------------------------------------|-------------------------|
| Módulo de Elasticidade ( $E_{ci}$ ) | 31 GPa                  |
| Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )    | 0,2                     |
| Módulo de Cisalhamento ( $G$ )      | 11,25 GPa               |
| Peso Específico ( $\rho$ )          | 24,52 kN/m <sup>3</sup> |
| $F_{ck}$                            | 30,0 MPa                |

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Tabela 8 são apresentadas as ações solicitantes permanentes e variáveis consideradas na análise. Os valores referentes as ações de vento e sismo são apresentados mais adiante.

Tabela 8 – Tabela de Ações Variáveis e Permanentes

| <b>Tipo</b> | <b>Descrição</b>               | <b>Valor</b>            |
|-------------|--------------------------------|-------------------------|
| Permanente  | Peso Próprio da Estrutura      | 24,52 kN/m <sup>3</sup> |
| Permanente  | Revestimento do Piso (e=5cm)   | 1,00 kN/m <sup>2</sup>  |
| Permanente  | Forro                          | 0,25 kN/m <sup>2</sup>  |
| Permanente  | Paredes                        | 1,50 kN/m <sup>2</sup>  |
| Permanente  | Telhado                        | 0,40 kN/m <sup>2</sup>  |
| Variável    | Barrilete                      | 3,00 kN/m <sup>2</sup>  |
| Variável    | Casa de Máquina dos elevadores | 30,00 kN/m <sup>2</sup> |
| Variável    | Laje do Piso                   | 2,00 kN/m <sup>2</sup>  |
| Variável    | Laje da Cobertura              | 0,50 kN/m <sup>2</sup>  |

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 6120 (2019)

As cargas devidas ao vento foram consideradas seguindo os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR 6123:1988, de acordo com as direções ortogonais principais, e projetadas linearmente sobre cada pavimento de acordo com as ponderações da mesma.

Considerando a estrutura no local definido pela Figura 19, a Tabela 9 apresenta os valores calculados das ações devido ao vento, considerando uma velocidade característica ( $v_0$ ) de 30m/s, em terreno plano (Fator topográfico  $S_1=1,0$ , em área urbanizada (Categoria IV e Classe C), sendo edifício residencial (fator estatístico  $S_3=1,0$ ), o cálculo não será apresentado por não ser o foco deste trabalho.

Tabela 9 – Tabela com ações do vento distribuídos por andar

| Nível | $V_x(kN)$ | $V_y(kN)$ | $V_x(kN/m)$ | $V_y(kN/m)$ |
|-------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| 1     | 44,07     | 9,06      | 1,26        | 0,78        |
| 2     | 46,51     | 9,57      | 1,33        | 0,83        |
| 3     | 51,61     | 10,61     | 1,48        | 0,91        |
| 4     | 55,60     | 11,43     | 1,59        | 0,99        |
| 5     | 59,74     | 12,29     | 1,71        | 1,06        |
| 6     | 62,59     | 12,87     | 1,79        | 1,11        |
| 7     | 65,50     | 13,47     | 1,87        | 1,16        |
| 8     | 68,47     | 14,08     | 1,96        | 1,21        |
| 9     | 69,99     | 14,39     | 2,00        | 1,24        |
| 10    | 73,06     | 15,02     | 2,09        | 1,29        |
| 11    | 74,62     | 15,35     | 2,14        | 1,32        |
| 12    | 74,62     | 15,35     | 2,14        | 1,32        |
| 13    | 76,20     | 15,67     | 2,18        | 1,35        |
| 14    | 77,80     | 16,00     | 2,23        | 1,38        |
| 15    | 4,05      | 4,62      | 1,01        | 0,62        |

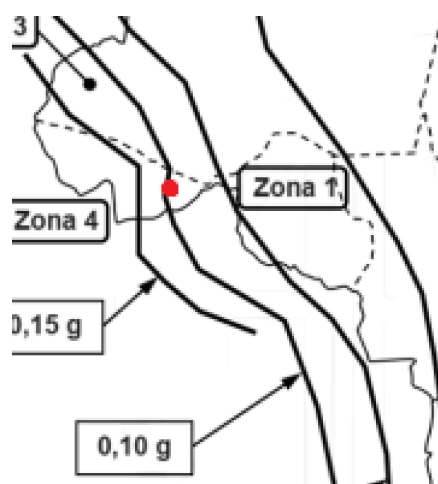
Fonte: Elaborado pelo Autor

## 5.6 DETERMINAÇÃO DA AÇÃO SÍSMICA

A ABNT NBR 15421:2006 determina que a análise sísmica pelo método espectral deve ser comparada com a MFE, de acordo com o descrito no item 4.3.4.3 e por isso o MFE também deverá ser analisado.

Para a análise, a localização do edifício é evidenciado pela Figura 19, na cidade de Rio Branco, presente na linha ente as Zonas Sísmicas 2 e 3, com  $a_g = 0,10g$  e solo mole (Classe E).

Figura 19 – Localização



Fonte: Adaptado, ABNT NBR 15421 (2006)

A Tabela 10 apresenta os coeficientes adotados para a determinação das ações sísmicas, considerando a localização, tipo de solo e edificação.

Tabela 10 – Coeficientes sísmicos adotados

| Parâmetro                                              | Símbolo    | Valor                 |
|--------------------------------------------------------|------------|-----------------------|
| Aceleração gravitacional                               | $g$        | 9,81 m/s <sup>2</sup> |
| Zona sísmica                                           | -          | 2                     |
| Aceleração sísmica horizontal                          | $a_g$      | 0,10g                 |
| Classe do Terreno                                      | -          | E                     |
| Aceleração sísmica Espectral para T=0,0s               | $a_{gs0}$  | 2,4525                |
| Aceleração sísmica Espectral para T=1,0s               | $a_{gs1}$  | 3,4335                |
| Fator de amplificação sísmica do solo de curta duração | $C_a$      | 2,5                   |
| Fator de amplificação sísmica do solo de longa duração | $C_v$      | 3,5                   |
| Fator de importância de utilização                     | $I$        | 1                     |
| Categoria sísmica                                      | -          | B                     |
| Coeficiente de Modificação de resposta X               | $R$        | 4,5                   |
| Coeficiente de Modificação de resposta Y               | $R$        | 3                     |
| Coeficiente de Sobre-Resistência X                     | $\Omega_0$ | 2,5                   |
| Coeficiente de Sobre-Resistência Y                     | $\Omega_0$ | 3                     |
| Amplificação de deslocamentos X                        | $C_d$      | 4                     |
| Amplificação de deslocamentos Y                        | $C_d$      | 2,5                   |
| Deslocamentos relativos máximos                        | $\Delta_x$ | 0,02h <sub>sx</sub>   |
| Período natural aproximado                             | $T_a$      | A calcular            |

Fonte: Elaborada pelo autor

### 5.6.1 Forças Horizontais Equivalentes

A força total na base da estrutura é obtida considerando as ações permanentes e 25% da carga acidental da casa de máquinas, conforme a ABNT NBR 15421:2006. Dessa forma, a Tabela 11 apresenta o peso total da estrutura.

Tabela 11 – Cálculo do peso total da estrutura

| Descrição      | Repetições | Peso<br>Próprio (kN) | Carga<br>Permanente (kN) | Acidental (kN) | Valor<br>Final (kN) |
|----------------|------------|----------------------|--------------------------|----------------|---------------------|
| Pavimento Tipo | 13         | 1.913,79             | 753,50                   | -              | 34.674,72           |
| Cobertura      | 1          | 1.777,45             | 178,10                   | -              | 1.955,55            |
| Barrilete      | 1          | 291,79               | 16,80                    | 264,84         | 573,43              |
| <b>W</b>       |            |                      |                          |                | <b>37.203,70</b>    |

Fonte: Elaborada pelo autor

A ABNT NBR 15421:2006 define que pode-se utilizar o período fundamental aproximado  $T_a$  como alternativa à determinação analítica de  $T$ . Entretanto, devido ao fato da utilização MER, é possível a extração do período fundamental através da análise modal feita pelo Robot. Ainda, como será realizado a comparação das forças atuantes na base entre MFE e MER, a utilização de  $T_a$  traria resultados imprecisos. Dessa maneira, de acordo com os dispostos na seção 5.7, a Tabela 12 apresenta os resultados dos períodos fundamentais da estrutura em cada um dos eixos de vibração.

Tabela 12 – Período natural da estrutura

| Eixo de Vibração | $T(s)$ |
|------------------|--------|
| Eixo X           | 1,38   |
| Eixo Y           | 1,98   |

Fonte: Elaborada pelo autor

Através do item 4.3.3 pode ser calculada a força horizontal atuante na base, definida pela Tabela 13.

Tabela 13 – Tabela força total atuante na base

| Direção | $C_s$    | $H(kN)$ |
|---------|----------|---------|
| Eixo X  | 0,138889 | 5167,18 |
| Eixo Y  | 0,147306 | 5480,34 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Posteriormente, com as Equações 48 e 49 foram calculadas as forças em cada pavimento e em cada uma das direções, como mostrado nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 – Forças Sísmicas Atuantes no Eixo X

| Nível            | $w_x(kN)$ | $h_x(m)$ | $k$  | $h_x^k(m)$ | $w_x.h_x^k(kN.m)$ | $C_{vx}$ | $F_x(kN)$ | $F_x/m(kN/m)$ |
|------------------|-----------|----------|------|------------|-------------------|----------|-----------|---------------|
| 1                | 2.667,29  | 3,20     | 1,74 | 7,57       | 20.185,08         | 0,0018   | 9,38      | 0,27          |
| 2                | 2.667,29  | 6,40     | 1,74 | 25,28      | 67.425,28         | 0,0061   | 31,34     | 0,90          |
| 3                | 2.667,29  | 9,60     | 1,74 | 51,19      | 136.527,94        | 0,0123   | 63,46     | 1,83          |
| 4                | 2.667,29  | 12,80    | 1,74 | 84,44      | 225.224,14        | 0,0203   | 104,69    | 3,01          |
| 5                | 2.667,29  | 16,00    | 1,74 | 124,50     | 332.076,66        | 0,0299   | 154,35    | 4,44          |
| 6                | 2.667,29  | 19,20    | 1,74 | 170,98     | 456.051,33        | 0,0410   | 211,98    | 6,10          |
| 7                | 2.667,29  | 22,40    | 1,74 | 223,58     | 596.349,88        | 0,0536   | 277,19    | 7,98          |
| 8                | 2.667,29  | 25,60    | 1,74 | 282,06     | 752.327,83        | 0,0677   | 349,69    | 10,07         |
| 9                | 2.667,29  | 28,80    | 1,74 | 346,21     | 923.448,15        | 0,0831   | 429,23    | 12,36         |
| 10               | 2.667,29  | 32,00    | 1,74 | 415,87     | 1.109.252,84      | 0,0998   | 515,60    | 14,84         |
| 11               | 2.667,29  | 35,20    | 1,74 | 490,89     | 1.309.344,17      | 0,1178   | 608,61    | 17,52         |
| 12               | 2.667,29  | 38,40    | 1,74 | 571,13     | 1.523.371,81      | 0,1370   | 708,09    | 20,38         |
| 13               | 2.667,29  | 41,60    | 1,74 | 656,48     | 1.751.023,52      | 0,1575   | 813,90    | 23,43         |
| 14               | 1.955,55  | 44,80    | 1,74 | 746,83     | 1.460.473,68      | 0,1314   | 678,85    | 19,54         |
| 15               | 573,43    | 46,30    | 1,74 | 790,88     | 453.515,06        | 0,0408   | 210,80    | 55,47         |
| $\sum w_i h_i^k$ |           |          |      |            | 11.116.597,37     |          |           |               |

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 15 – Forças Sísmicas Atuantes no Eixo Y

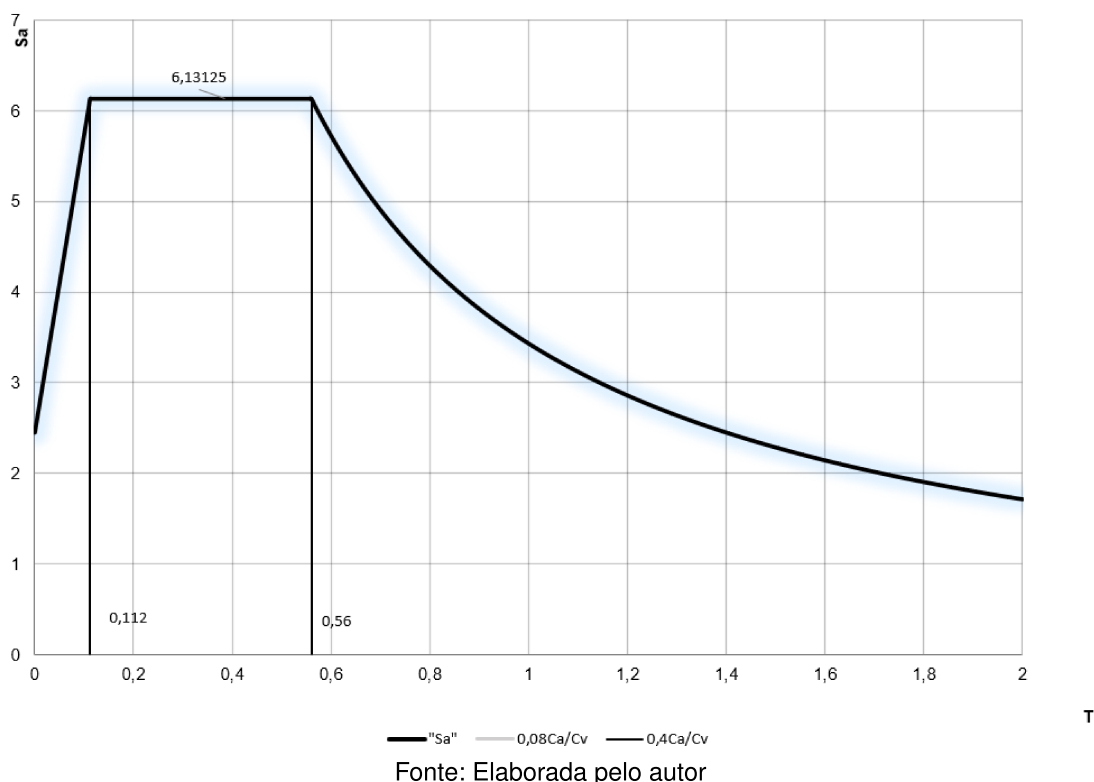
| Nível            | $w_x(kN)$ | $h_x(m)$ | $k$  | $h_x^k(m)$ | $w_x \cdot h_x^k(kN \cdot m)$ | $C_{vx}$ | $F_x(kN)$ | $F_x/m(kN/m)$ |
|------------------|-----------|----------|------|------------|-------------------------------|----------|-----------|---------------|
| 1                | 2.667,29  | 3,20     | 1,44 | 5,34       | 14.239,20                     | 0,0036   | 19,76     | 1,96          |
| 2                | 2.667,29  | 6,40     | 1,44 | 14,48      | 38.633,92                     | 0,0098   | 53,60     | 5,31          |
| 3                | 2.667,29  | 9,60     | 1,44 | 25,97      | 69.269,20                     | 0,0175   | 96,11     | 9,52          |
| 4                | 2.667,29  | 12,80    | 1,44 | 39,30      | 104.821,88                    | 0,0265   | 145,43    | 14,40         |
| 5                | 2.667,29  | 16,00    | 1,44 | 54,19      | 144.544,76                    | 0,0366   | 200,55    | 19,86         |
| 6                | 2.667,29  | 19,20    | 1,44 | 70,46      | 187.941,79                    | 0,0476   | 260,76    | 25,82         |
| 7                | 2.667,29  | 22,40    | 1,44 | 87,97      | 234.653,34                    | 0,0594   | 325,57    | 32,23         |
| 8                | 2.667,29  | 25,60    | 1,44 | 106,63     | 284.403,63                    | 0,0720   | 394,59    | 39,07         |
| 9                | 2.667,29  | 28,80    | 1,44 | 126,34     | 336.972,74                    | 0,0853   | 467,53    | 46,29         |
| 10               | 2.667,29  | 32,00    | 1,44 | 147,03     | 392.180,10                    | 0,0993   | 544,12    | 53,87         |
| 11               | 2.667,29  | 35,20    | 1,44 | 168,66     | 449.874,13                    | 0,1139   | 624,17    | 61,80         |
| 12               | 2.667,29  | 38,40    | 1,44 | 191,18     | 509.925,29                    | 0,1291   | 707,49    | 70,05         |
| 13               | 2.667,29  | 41,60    | 1,44 | 214,53     | 572.221,25                    | 0,1449   | 793,92    | 78,61         |
| 14               | 1.955,55  | 44,80    | 1,44 | 238,69     | 466.777,95                    | 0,1182   | 647,62    | 64,12         |
| 15               | 573,43    | 46,30    | 1,44 | 250,29     | 143.521,65                    | 0,0363   | 199,13    | 28,05         |
| $\sum w_i h_i^k$ |           |          |      |            | 3.949.980,82                  |          |           |               |

Fonte: Elaborada pelo autor

### 5.6.2 Definição do Espectro de Projeto

De acordo com o disposto no item 4.3.4.1, o espectro de projeto para a estrutura é calculado e pode ser visto na Figura 20. A partir disso, serão extraídos pontos do gráfico de espectro para inserção no software de análise estrutural.

Figura 20 – Gráfico de espectro de projeto

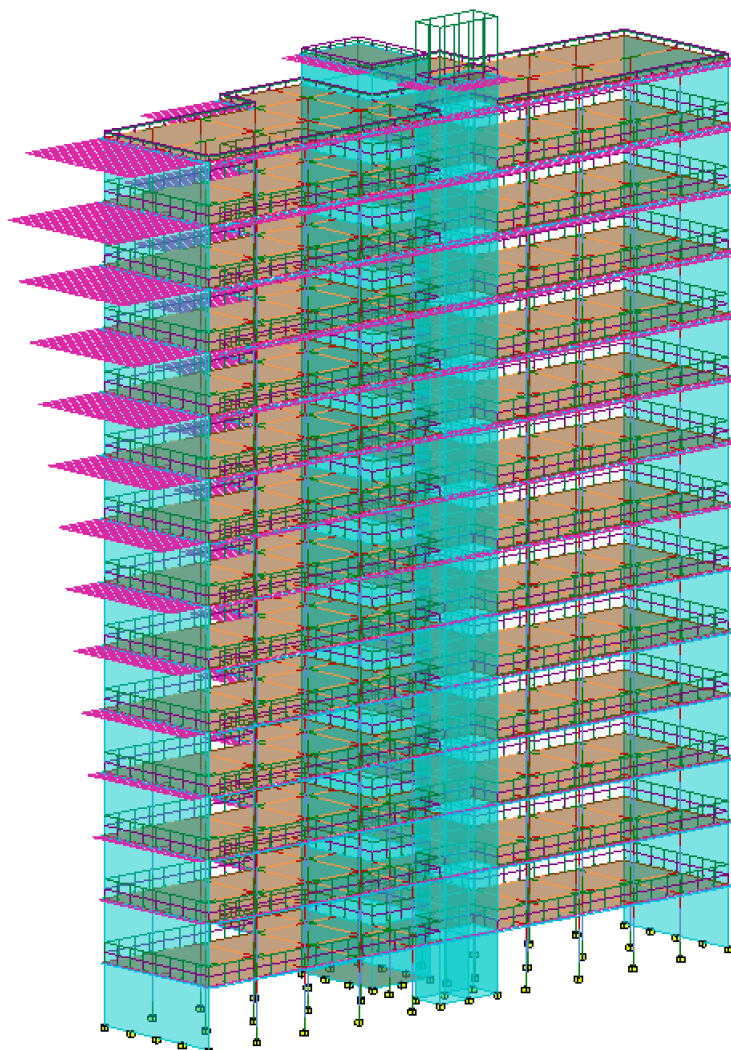


## 5.7 MODELAGEM ESTRUTURAL

A modelagem estrutural foi realizada no software Autodesk® Revit, conforme os dispostos nas seções anteriores, considerando os procedimentos apresentados na ABNT NBR 6118:2014, em que as ações são consideradas de forma agrupadas e há a penalização dos momentos de inércia, conforme os dispostos na ABNT NBR 6118:2014.

A Figura 21 mostra de forma ilustrativa o modelo espacial da estrutura lançada dentro do Revit. Dentro do software foram ajustados os materiais, seções pré-dimensionadas e combinações de cálculo. A exportação para o ROBOT é feita de forma automática, através da possibilidade de interoperabilidade entre os dois softwares, haja visto que ambos são de propriedade da Autodesk.

Figura 21 – Modelo Espacial da Estrutura



Fonte: Elaborada pelo autor

#### 5.7.1 Combinações de Análise

As combinações a serem utilizadas para a análise estrutural estão presentes no Quadro 8, em que é considerado  $\Psi_0 = 0,5$  para ações variáveis em geral e  $\Psi_0 = 0,6$  para ações de vento. As combinações considerando as ações sísmicas pelo MFE não são utilizadas pois o MFE serve apenas como verificação para o MER.

Quadro 8 – Quadro de combinações

| Descrição    | Tipo        | Direção | Valores                                          |
|--------------|-------------|---------|--------------------------------------------------|
| Combinação 1 | Normal      | Eixo X  | $1,4A_p + 1,4C_a + 1,4 \cdot 0,6V_x$             |
| Combinação 2 | Normal      | Eixo X  | $1,4A_p + 1,4V_x + 1,4 \cdot 0,5C_a$             |
| Combinação 3 | Normal      | Eixo Y  | $1,4A_p + 1,4C_a + 1,4 \cdot 0,6V_y$             |
| Combinação 4 | Normal      | Eixo Y  | $1,4A_p + 1,4V_y + 1,4 \cdot 0,5C_a$             |
| Combinação 5 | Excepcional | Eixo X  | $1,2A_p + MER_x + 0,5 \cdot C_a + 0,6 \cdot V_x$ |
| Combinação 6 | Excepcional | Eixo Y  | $1,2A_p + MER_y + 0,5 \cdot C_a + 0,6 \cdot V_y$ |

Ap: ação permanente

Ca: carga acidental

Vx: ação de vento na direção X

Vy: ação do vento na direção Y

MERx: espectro de resposta na direção X

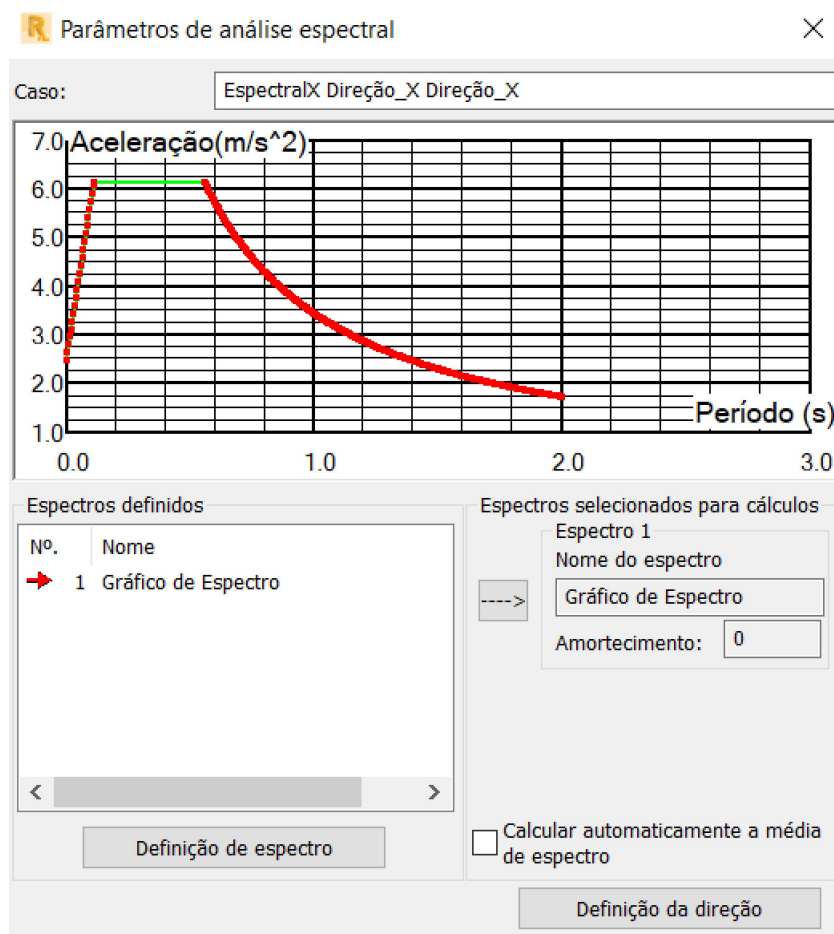
MERY: espectro de resposta na direção Y

Fonte: elaborada pelo autor

## 5.8 MÉTODO DO ESPECTRO DE RESPOSTA

O gráfico de espectro de projeto foi lançado no ROBOT, conforme Figura 23, através da inserção de pontos obtidos a partir do gráfico determinado pela Figura 12.

Figura 22 – Espectro de Projeto lançado no ROBOT

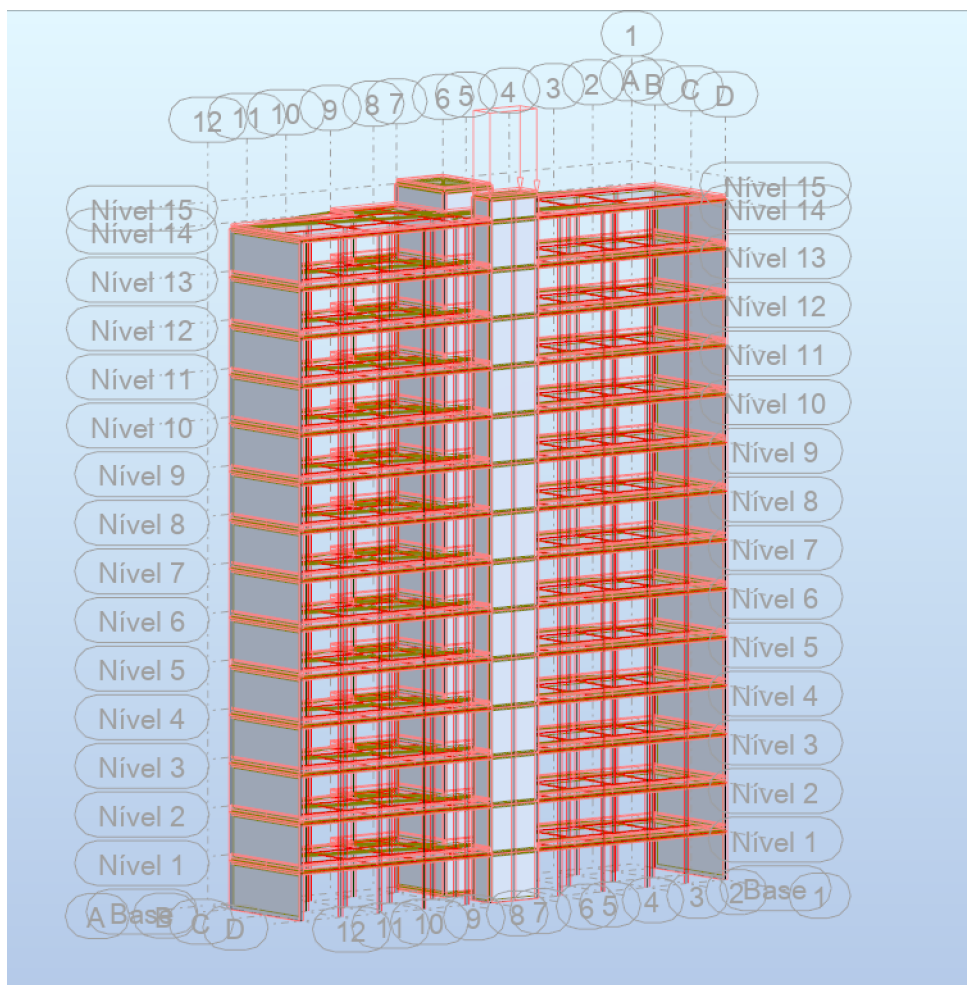


Fonte: Elaborada pelo autor

Com o modelo lançado (Figura 23), as ações e combinações inseridas e a determinação dos espectros de projeto para cada uma das direções ortogonais, x e y, conforme o disposto no item 8.5 da ABNT NBR 15421:2006, em que permite-se aplicar as forças separadamente em cada uma das direções horizontais ortogonais, sem considerar a superposição dos efeitos em duas direções.

A estrutura foi processada e seus resultados são apresentados no próximo capítulo.

Figura 23 – Modelo da Estrutura de análise inserida no Robot



Fonte: Elaborada pelo autor

## 6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A primeira análise a ser feita diz respeito em relação ao número de modos de vibração a serem considerados. A ABNT NBR 15421:2006 determina que o número de modos a ser considerado na análise espectral deve ser suficiente para capturar ao menos 90% da massa total em cada uma das direções ortogonais consideradas na análise. Dessa maneira, através da análise modal feita pelo ROBOT, as Tabelas 16 e 17 apresentam o número de modos vibração utilizados em cada uma das direções ortogonais de maneira a atender essa condição.

Tabela 16 – % da massa total capturada na direção do eixo X

| Modo | Frequência (Hz) | Período (s) | Massa X Acumulada (%) |
|------|-----------------|-------------|-----------------------|
| 1    | 0,73            | 1,38        | 66,31                 |
| 2    | 1,06            | 0,94        | 66,31                 |
| 3    | 2,27            | 0,44        | 67,21                 |
| 4    | 2,40            | 0,42        | 67,21                 |
| 5    | 2,50            | 0,40        | 72,19                 |
| 6    | 2,60            | 0,39        | 72,19                 |
| 7    | 3,23            | 0,31        | 73,97                 |
| 8    | 3,27            | 0,31        | 73,97                 |
| 9    | 3,34            | 0,30        | 81,01                 |
| 10   | 3,54            | 0,28        | 81,01                 |
| 11   | 3,77            | 0,27        | 81,01                 |
| 12   | 3,80            | 0,26        | 81,83                 |
| 13   | 4,15            | 0,24        | 81,96                 |
| 14   | 4,27            | 0,23        | 81,96                 |
| 15   | 4,30            | 0,23        | 81,96                 |
| 16   | 4,30            | 0,23        | 82,43                 |
| 17   | 4,53            | 0,22        | 87,16                 |
| 18   | 5,00            | 0,20        | 87,16                 |
| 19   | 5,00            | 0,20        | 87,17                 |
| 20   | 5,33            | 0,19        | 87,17                 |
| 21   | 5,62            | 0,18        | 87,37                 |
| 22   | 5,62            | 0,18        | 87,37                 |
| 23   | 5,96            | 0,17        | 87,61                 |
| 24   | 5,96            | 0,17        | 87,61                 |
| 25   | 7,14            | 0,14        | 87,67                 |
| 26   | 7,14            | 0,14        | 87,67                 |
| 27   | 7,18            | 0,14        | 87,75                 |
| 28   | 7,18            | 0,14        | 87,75                 |
| 29   | 8,52            | 0,12        | 91,23                 |
| 30   | 8,52            | 0,12        | 91,23                 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 17 – % da massa total capturada na direção do eixo Y

| Modo | Frequência (Hz) | Período (s) | Massa X Acumulada (%) |
|------|-----------------|-------------|-----------------------|
| 1    | 0,50            | 1,98        | 66,24                 |
| 2    | 2,21            | 0,45        | 66,59                 |
| 3    | 2,32            | 0,43        | 84,82                 |
| 4    | 5,47            | 0,18        | 91,54                 |
| 5    | 9,08            | 0,11        | 92,89                 |
| 6    | 9,14            | 0,11        | 94,85                 |
| 7    | 12,42           | 0,08        | 95,02                 |
| 8    | 12,44           | 0,08        | 95,02                 |
| 9    | 12,63           | 0,08        | 95,74                 |
| 10   | 12,70           | 0,08        | 95,74                 |
| 11   | 12,78           | 0,08        | 96,52                 |
| 12   | 13,19           | 0,08        | 96,52                 |
| 13   | 13,22           | 0,08        | 96,61                 |
| 14   | 13,88           | 0,07        | 96,63                 |
| 15   | 13,88           | 0,07        | 96,63                 |
| 16   | 13,88           | 0,07        | 96,63                 |
| 17   | 13,90           | 0,07        | 96,63                 |
| 18   | 14,11           | 0,07        | 96,63                 |
| 19   | 14,11           | 0,07        | 96,63                 |
| 20   | 14,55           | 0,07        | 96,63                 |
| 21   | 14,55           | 0,07        | 96,63                 |
| 22   | 14,74           | 0,07        | 96,64                 |
| 23   | 14,78           | 0,07        | 96,64                 |
| 24   | 15,18           | 0,07        | 96,64                 |
| 25   | 15,19           | 0,07        | 96,64                 |
| 26   | 15,52           | 0,06        | 97,09                 |
| 27   | 15,82           | 0,06        | 97,09                 |
| 28   | 15,95           | 0,06        | 97,48                 |
| 29   | 15,99           | 0,06        | 97,48                 |
| 30   | 15,99           | 0,06        | 97,49                 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Ainda, deve ser verificado o disposto no item 4.3.4.3, de maneira a determinar se é necessário fazer uma correção das forças horizontais obtidas pelo MER. A Tabela 18 apresenta essa etapa de verificação.

Tabela 18 – Verificação das forças obtidas

| Direção | $H_t$   | $H$     | $\frac{H_t}{H}$ | Necessário correção? | Coefficiente de correção |
|---------|---------|---------|-----------------|----------------------|--------------------------|
| Eixo X  | 2682,63 | 5167,18 | 0,519           | Sim                  | 1,6372                   |
| Eixo Y  | 3707,84 | 5480,34 | 0,677           | Sim                  | 1,2563                   |

Fonte: Elaborada pelo autor

Desta maneira, a Tabela 19 apresente a variação percentual das forças horizontais

na base em cada uma das direções pelos métodos das Forças Horizontais Equivalentes e Espectro de Resposta.

Tabela 19 – Variação percentual dos valores de forças horizontais na base

| <b>Direção</b> | <b>MFE (<i>kN</i>)</b> | <b>MER (<i>kN</i>)</b> | <b>Variação Percentual</b> |
|----------------|------------------------|------------------------|----------------------------|
| Eixo X         | 5167,18                | 4392,00                | -17,64%                    |
| Eixo Y         | 5480,34                | 4658,15                | -17,65%                    |

Fonte: Elaborada pelo autor

## 6.1 COMPARAÇÃO DAS COMBINAÇÕES NORMAIS E EXCEPCIONAIS

No Quadro 8, apresentado anteriormente, são mostradas as combinações normais e excepcionais a serem consideradas na análise. Foram relacionadas as combinações de acordo com a Tabela 20, para evidenciar a influência das ações sísmicas para o dimensionamento de edifícios.

Tabela 20 – Tabela de comparação das combinações

| <b>Descrição</b> | <b>Combinações relacionadas</b> |
|------------------|---------------------------------|
| Comparação 1     | Combinação 1 e Combinação 5     |
| Comparação 2     | Combinação 2 e Combinação 5     |
| Comparação 3     | Combinação 3 e Combinação 6     |
| Comparação 4     | Combinação 4 e Combinação 6     |

Fonte: Elaborada pelo autor

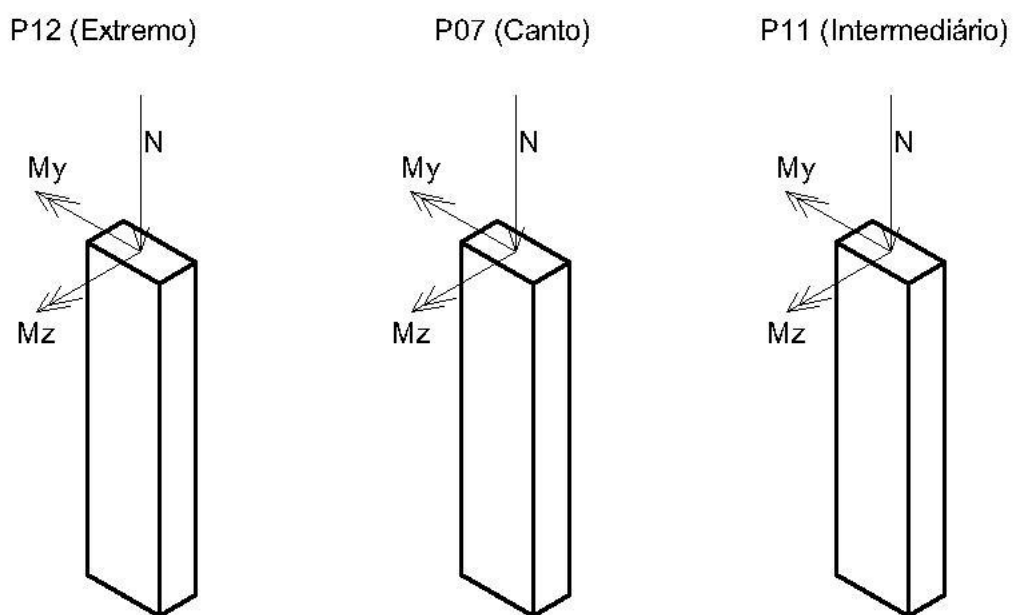
## 6.2 AVALIAÇÃO DO INCREMENTO DE ESFORÇOS INTERNOS NOS PILARES DA ESTRUTURA

A partir das comparações definidas, determina-se o incremento dos esforços internos na base dos pilares da estrutura, considerando pilares de canto, extremos e intermediários. As tabelas que compõem as comparações são apresentadas do último pavimento para o primeiro com as comparações definidas.

A Figura 24 apresenta os pilares analisados e as respectivas orientações dos esforços, sendo eles:

- Pilar de extremidade: P12;
- Pilar de canto: P07;
- Pilar intermediário: P26.

Figura 24 – Pilares analisados e orientação dos esforços



Fonte: Elaborada pelo autor

Serão apresentados somente os valores de variação relativa em relação a cada uma das combinações. Os valores absolutos podem ser encontrados no Apêndice A. O Quadro 9 apresenta as comparações dos pilares de canto.

Quadro 9 – Comparações relativas de pilar de extremidade

| Nível    | Comparação 1 |         |         | Comparação 2 |        |        |
|----------|--------------|---------|---------|--------------|--------|--------|
|          | N            | Mz      | My      | N            | Mz     | My     |
| Nível 1  | 7,24%        | 99,33%  | -10,27% | 31,57%       | 97,48% | 82,73% |
| Nível 2  | 9,14%        | 57,79%  | -11,92% | 33,80%       | 23,65% | 76,43% |
| Nível 3  | 10,56%       | 56,70%  | -12,21% | 35,14%       | 27,62% | 75,81% |
| Nível 4  | 11,58%       | 54,58%  | -12,97% | 35,94%       | 25,68% | 74,82% |
| Nível 5  | 12,24%       | 53,81%  | -13,90% | 36,38%       | 23,91% | 73,74% |
| Nível 6  | 12,56%       | 52,59%  | -14,89% | 36,60%       | 21,07% | 72,68% |
| Nível 7  | 12,56%       | 51,68%  | -15,94% | 36,68%       | 17,89% | 71,66% |
| Nível 8  | 12,24%       | 51,23%  | -16,94% | 36,65%       | 14,59% | 70,72% |
| Nível 9  | 11,60%       | 51,23%  | -17,83% | 36,54%       | 11,43% | 69,84% |
| Nível 10 | 10,66%       | 50,22%  | -18,59% | 36,37%       | 8,75%  | 69,02% |
| Nível 11 | 9,49%        | 47,61%  | -19,38% | 36,29%       | 6,22%  | 68,23% |
| Nível 12 | 8,38%        | 43,21%  | -20,02% | 36,72%       | 3,52%  | 67,45% |
| Nível 13 | 8,45%        | 36,04%  | -20,49% | 38,83%       | 0,06%  | 66,75% |
| Nível 14 | 19,95%       | 20,30%  | -20,21% | 51,98%       | -3,52% | 66,42% |
| Nível    | Comparação 3 |         |         | Comparação 4 |        |        |
|          | N            | Mz      | My      | N            | Mz     | My     |
| Nível 1  | 23,12%       | 5,58%   | 90,99%  | 27,07%       | 19,42% | 97,53% |
| Nível 2  | 25,16%       | 0,25%   | 84,04%  | 28,79%       | 14,39% | 91,15% |
| Nível 3  | 26,42%       | 8,12%   | 83,41%  | 29,89%       | 21,52% | 90,57% |
| Nível 4  | 27,23%       | 7,46%   | 82,35%  | 30,63%       | 20,88% | 89,56% |
| Nível 5  | 27,78%       | 5,68%   | 81,17%  | 31,19%       | 19,13% | 88,43% |
| Nível 6  | 28,18%       | 2,73%   | 79,95%  | 31,65%       | 16,41% | 87,24% |
| Nível 7  | 28,52%       | -0,61%  | 78,74%  | 32,07%       | 13,26% | 86,04% |
| Nível 8  | 28,81%       | -3,94%  | 77,58%  | 32,46%       | 10,10% | 84,85% |
| Nível 9  | 29,05%       | -6,94%  | 76,43%  | 32,77%       | 7,21%  | 83,61% |
| Nível 10 | 29,24%       | -9,39%  | 75,37%  | 32,99%       | 4,72%  | 82,50% |
| Nível 11 | 29,50%       | -11,38% | 74,37%  | 33,16%       | 2,76%  | 81,43% |
| Nível 12 | 30,26%       | -13,11% | 73,44%  | 33,53%       | 0,98%  | 80,45% |
| Nível 13 | 32,66%       | -15,02% | 72,63%  | 34,78%       | -0,75% | 79,64% |
| Nível 14 | 45,72%       | -13,96% | 72,27%  | 42,33%       | -1,25% | 79,21% |

Fonte: Elaborada pelo autor

O Quadro 10 apresenta as comparações dos pilares de canto.

Quadro 10 – Comparações relativas de pilar de canto

| Nível    | Comparação 1 |         |          | Comparação 2 |         |        |
|----------|--------------|---------|----------|--------------|---------|--------|
|          | N            | Mz      | My       | N            | Mz      | My     |
| Nível 1  | -17,23%      | 63,29%  | -57,14%  | -26,50%      | 15,59%  | 88,87% |
| Nível 2  | -16,48%      | 12,21%  | -53,15%  | -25,99%      | -12,05% | 82,40% |
| Nível 3  | -15,87%      | 23,66%  | -64,71%  | -25,46%      | -1,11%  | 89,46% |
| Nível 4  | -15,40%      | 24,31%  | -84,38%  | -24,91%      | 2,89%   | 92,51% |
| Nível 5  | -15,06%      | 25,81%  | -117,14% | -24,36%      | 6,74%   | 94,54% |
| Nível 6  | -14,81%      | 26,21%  | -195,24% | -23,80%      | 9,40%   | 96,04% |
| Nível 7  | -14,65%      | 26,07%  | -578,57% | -23,23%      | 11,38%  | 97,22% |
| Nível 8  | -14,53%      | 25,31%  | -340,00% | -22,65%      | 12,76%  | 98,19% |
| Nível 9  | -14,43%      | 24,11%  | 9,52%    | -22,03%      | 13,67%  | 99,00% |
| Nível 10 | -14,29%      | 22,49%  | 82,35%   | -21,35%      | 14,21%  | 99,70% |
| Nível 11 | -14,00%      | 20,59%  | 85,56%   | -20,52%      | 14,42%  | 99,68% |
| Nível 12 | -13,30%      | 18,83%  | 69,72%   | -19,33%      | 14,61%  | 99,19% |
| Nível 13 | -11,33%      | 15,79%  | 61,11%   | -17,09%      | 12,91%  | 98,79% |
| Nível 14 | -2,90%       | 22,37%  | 48,70%   | -8,74%       | 20,57%  | 98,09% |
| Nível    | Comparação 3 |         |          | Comparação 4 |         |        |
|          | N            | Mz      | My       | N            | Mz      | My     |
| Nível 1  | -24,54%      | -22,20% | 79,77%   | -12,27%      | -10,34% | 75,58% |
| Nível 2  | -23,95%      | -21,70% | 73,07%   | -11,80%      | -10,19% | 69,53% |
| Nível 3  | -23,38%      | -14,08% | 80,37%   | -11,35%      | -3,87%  | 76,12% |
| Nível 4  | -22,83%      | -9,93%  | 83,62%   | -10,92%      | -0,47%  | 79,09% |
| Nível 5  | -22,29%      | -6,23%  | 85,80%   | -10,51%      | 2,59%   | 81,13% |
| Nível 6  | -21,76%      | -3,36%  | 87,44%   | -10,12%      | 4,95%   | 82,71% |
| Nível 7  | -21,24%      | -1,04%  | 88,80%   | -9,76%       | 6,89%   | 84,03% |
| Nível 8  | -20,72%      | 0,80%   | 89,95%   | -9,42%       | 8,43%   | 85,19% |
| Nível 9  | -20,17%      | 2,23%   | 90,99%   | -9,10%       | 9,65%   | 86,29% |
| Nível 10 | -19,56%      | 3,36%   | 91,83%   | -8,77%       | 10,62%  | 87,16% |
| Nível 11 | -18,78%      | 4,09%   | 92,54%   | -8,43%       | 11,26%  | 87,89% |
| Nível 12 | -17,64%      | 4,75%   | 93,09%   | -7,99%       | 11,76%  | 88,46% |
| Nível 13 | -15,37%      | 3,54%   | 93,52%   | -7,26%       | 11,15%  | 88,88% |
| Nível 14 | -6,82%       | 10,36%  | 94,18%   | -4,71%       | 14,87%  | 89,36% |

Fonte: Elaborada pelo autor

O Quadro 11 apresenta as comparações dos pilares intermediários.

Quadro 11 – Comparações relativas de pilar intermediário

| Nível    | Comparação 1 |          |         | Comparação 2 |           |        |
|----------|--------------|----------|---------|--------------|-----------|--------|
|          | N            | Mz       | My      | N            | Mz        | My     |
| Nível 1  | -18,23%      | 70,64%   | -16,22% | 14,77%       | -298,13%  | 73,94% |
| Nível 2  | -16,93%      | 55,88%   | -14,83% | 17,47%       | -2271,05% | 62,69% |
| Nível 3  | -15,87%      | 74,84%   | -11,30% | 19,59%       | -54,96%   | 63,09% |
| Nível 4  | -15,06%      | 84,38%   | -9,90%  | 21,24%       | 34,82%    | 62,41% |
| Nível 5  | -14,47%      | 92,01%   | -9,48%  | 22,50%       | 72,64%    | 61,48% |
| Nível 6  | -14,06%      | 97,59%   | -9,58%  | 23,46%       | 92,68%    | 60,44% |
| Nível 7  | -13,79%      | 97,91%   | -9,91%  | 24,16%       | 94,05%    | 59,40% |
| Nível 8  | -13,61%      | 94,32%   | -10,43% | 24,67%       | 84,15%    | 58,40% |
| Nível 9  | -13,44%      | 91,63%   | -11,07% | 25,01%       | 76,34%    | 57,44% |
| Nível 10 | -13,18%      | 89,36%   | -11,69% | 25,24%       | 70,32%    | 56,54% |
| Nível 11 | -12,64%      | 86,86%   | -12,39% | 25,43%       | 65,40%    | 55,63% |
| Nível 12 | -11,42%      | 84,28%   | -12,93% | 25,75%       | 62,36%    | 54,75% |
| Nível 13 | -8,43%       | 82,21%   | -13,28% | 26,74%       | 63,20%    | 53,91% |
| Nível 14 | 3,61%        | 77,62%   | -13,46% | 31,49%       | 67,70%    | 53,71% |
| Nível    | Comparação 3 |          |         | Comparação 4 |           |        |
|          | N            | Mz       | My      | N            | Mz        | My     |
| Nível 1  | 10,15%       | 99,53%   | 81,21%  | 16,75%       | 91,12%    | 88,79% |
| Nível 2  | 12,59%       | -852,63% | 69,75%  | 18,77%       | -807,89%  | 78,18% |
| Nível 3  | 14,55%       | 76,41%   | 70,43%  | 20,38%       | 69,71%    | 78,77% |
| Nível 4  | 16,11%       | 83,78%   | 69,83%  | 21,68%       | 92,53%    | 78,19% |
| Nível 5  | 17,35%       | 64,73%   | 68,86%  | 22,71%       | 74,39%    | 77,25% |
| Nível 6  | 18,34%       | 53,95%   | 67,73%  | 23,54%       | 64,26%    | 76,16% |
| Nível 7  | 19,12%       | 46,34%   | 66,55%  | 24,19%       | 57,06%    | 74,98% |
| Nível 8  | 19,74%       | 40,59%   | 65,36%  | 24,70%       | 51,52%    | 73,78% |
| Nível 9  | 20,22%       | 36,04%   | 64,17%  | 25,04%       | 47,16%    | 72,54% |
| Nível 10 | 20,58%       | 32,53%   | 63,03%  | 25,22%       | 43,70%    | 71,39% |
| Nível 11 | 20,90%       | 30,16%   | 61,95%  | 25,24%       | 41,31%    | 70,29% |
| Nível 12 | 21,33%       | 29,42%   | 60,91%  | 25,07%       | 40,57%    | 69,25% |
| Nível 13 | 22,43%       | 33,25%   | 59,97%  | 24,69%       | 43,65%    | 68,32% |
| Nível 14 | 27,56%       | 46,68%   | 59,73%  | 22,94%       | 57,30%    | 68,00% |

Fonte: Elaborada pelo autor

É possível verificar que os maiores acréscimos de momentos fletores ocorrem, em geral, no térreo, enquanto para o esforço normal os acréscimos ocorrem, em geral, no último pavimento. Ainda, é possível verificar diferenças relativas altas em alguns níveis, ocorrido devido ao fato dos valores absolutos serem pequenos e qualquer pequena variação absoluta trazer valores altos de variação relativa.

### 6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Através dos valores apresentados é possível observar que os esforços internos sofrem acréscimos de acordo com as direções de forças sísmicas aplicadas em cada uma

das combinações. As comparações 1 e 2 apresentam maiores acréscimos em  $F_x$  e  $M_y$ , visto que as forças no eixo X são responsáveis pelo acréscimo de valores de momento em torno do eixo Y. O mesmo ocorre ao analisar os valores das comparações 3 e 4.

Ainda, é possível observar que os pilares de extremidades são os elementos que possuem maior variação em seus esforços internos de acordo com a direção da comparação analisada. Há casos em que os valores dos esforços internos chegam próximos a dobrar em seu valor, como pode ser analisado na esforço  $M_z$  do Nível 1 do Quadro 9.

Entretanto, somente os valores obtidos em cada uma das comparações realizadas não é capaz de evidenciar o acréscimo de esforços internos nos pilares da edificação devido a sismos. Desta maneira, para ficar mais evidente, as Tabelas 21, 22 e 23 apresentam uma envoltória das combinações de análise, realizadas, considerando a relação dos valores absolutos presentes no Apêndice A. Ainda, o Apêndice B apresenta os valores absolutos das envoltórias, considerando as condições normais e excepcionais.

Tabela 21 – Envoltória de acréscimos relativos de esforços devidos a sismos no pilar de extremidade

| Nível    | N      | Mz     | My     |
|----------|--------|--------|--------|
| Nível 1  | 23,12% | 74,86% | 82,73% |
| Nível 2  | 25,16% | 44,86% | 76,43% |
| Nível 3  | 26,42% | 45,03% | 75,81% |
| Nível 4  | 27,23% | 43,44% | 74,82% |
| Nível 5  | 27,78% | 42,74% | 73,74% |
| Nível 6  | 28,18% | 41,58% | 72,68% |
| Nível 7  | 28,52% | 40,80% | 71,66% |
| Nível 8  | 28,81% | 40,65% | 70,72% |
| Nível 9  | 29,05% | 41,12% | 69,84% |
| Nível 10 | 29,24% | 40,32% | 69,02% |
| Nível 11 | 29,50% | 37,78% | 68,23% |
| Nível 12 | 30,26% | 33,42% | 67,45% |
| Nível 13 | 32,66% | 26,39% | 66,75% |
| Nível 14 | 42,33% | 12,26% | 66,42% |

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 22 – Envoltória de acréscimos relativos de esforços devidos a sismos no pilar de canto

| Nível    | N       | Mz     | My     |
|----------|---------|--------|--------|
| Nível 1  | -17,23% | 46,85% | 75,58% |
| Nível 2  | -16,48% | 4,65%  | 69,53% |
| Nível 3  | -15,87% | 13,87% | 76,12% |
| Nível 4  | -15,40% | 14,32% | 79,09% |
| Nível 5  | -15,06% | 15,49% | 81,13% |
| Nível 6  | -14,81% | 15,82% | 82,71% |
| Nível 7  | -14,65% | 15,71% | 84,03% |
| Nível 8  | -14,53% | 15,06% | 85,19% |
| Nível 9  | -14,43% | 14,05% | 86,29% |
| Nível 10 | -14,29% | 12,68% | 87,16% |
| Nível 11 | -14,00% | 11,01% | 87,89% |
| Nível 12 | -13,30% | 9,46%  | 88,46% |
| Nível 13 | -11,33% | 6,73%  | 88,88% |
| Nível 14 | -2,90%  | 12,40% | 89,36% |

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 23 – Envoltória de acréscimos relativos de esforços devidos a sismos no pilar intermediário

| Nível    | N      | Mz     | My     |
|----------|--------|--------|--------|
| Nível 1  | 10,15% | 50,48% | 73,94% |
| Nível 2  | 12,59% | 39,08% | 62,69% |
| Nível 3  | 14,55% | 59,60% | 63,09% |
| Nível 4  | 16,11% | 69,37% | 62,41% |
| Nível 5  | 17,35% | 76,97% | 61,48% |
| Nível 6  | 18,34% | 82,51% | 60,44% |
| Nível 7  | 19,12% | 81,19% | 59,40% |
| Nível 8  | 19,74% | 78,71% | 58,40% |
| Nível 9  | 20,22% | 77,37% | 57,44% |
| Nível 10 | 20,58% | 75,81% | 56,54% |
| Nível 11 | 20,90% | 73,49% | 55,63% |
| Nível 12 | 21,33% | 70,53% | 54,75% |
| Nível 13 | 22,43% | 67,73% | 53,91% |
| Nível 14 | 22,94% | 63,07% | 53,71% |

Fonte: Elaborada pelo autor

É possível verificar que os esforços  $M_z$  e  $M_y$  e  $N$  da estrutura possuem acréscimos significativos. O acréscimo dos valores ocorrem devido ao momento de tombamento global da estrutura combinando com os efeitos das forças inerciais calculados pelo MER. Os pilares de extremidade tendem a exibir maiores incrementos pelo fato de estarem mais afastados dos eixos principais da estrutura.

Não foi observado um padrão em relação a qual pavimento ocorrem maiores acréscimos nos momentos fletores e no esforço normal. Ocorre que os esforços originados pela ação sísmica correspondem a superposição dos efeitos dos 30 modos analisados e,

desta forma, a resposta de um modo específico pode sobressair em relação aos demais modos a depender da posição do pilar tanto em planta quanto ao nível analisado.

Em relação a comparação entre os dois métodos presentes na ABNT NBR 15421:2006, é possível verificar com Parisenti (2011) que o FHE apresenta valores mais conservadores do que o MER, ao comparar a força horizontal na base da estrutura.

De um modo geral, com os esforços possuindo acréscimos da ordem de 70% nos momentos fletores e 30% na força normal, negligenciar sua análise em locais com possibilidade de eventos sísmicos podem levar a um dimensionamento equivocado dos edifícios, tendo como consequência o colapso da estrutura.

## 7 CONCLUSÃO

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de compreender como aplicar o MER e o MFE definidos na ABNT NBR 15421:2006 para o cálculo das ações sísmicas e para isso, foi feito um estudo de caso de um edifício hipotético situado no Acre. A modelagem estrutural foi realizada considerando dois cenários: o primeiro é aquele em que os sismos foram ignorados e no segundo, as ações sísmicas foram calculadas de acordo com a ABNT NBR 15421:2006. Assim, pode-se observar os acréscimos significativos das ações sísmicas nos esforços internos da estrutura.

O MER traz a análise dinâmica para o cálculo das forças inerciais sísmicas, enquanto o MFE apresenta uma maneira de calcular forças estáticas equivalentes devido a sismos, sendo possível verificar um conservadorismo do MFE em relação ao MER. Nas zonas sísmicas 2, 3 e 4 da ABNT NBR 15421:2006, utilizar o método das forças horizontais equivalentes não comprometerá a segurança estrutural dos edifícios. Entretanto, com o MER é possível obter resultados mais precisos, trazendo desta maneira maior precisão e, conseqüentemente, uma estrutura mais econômica.

As maiores dificuldades apresentadas durante o trabalho foram devido a área de estudo, por não ser um conteúdo tratado nas disciplinas das grades dos cursos de engenharia civil durante a graduação. Para o desenvolvimento deste trabalho foi necessário cursar a disciplina optativa de dinâmica das estruturas e estudar as normas brasileiras e as literaturas apresentadas.

Ainda, os pilares estudados apresentaram uma majoração nos momentos fletores e mesmo que não seja verificado um padrão, em geral, as maiores variações ocorrem nos pilares do térreo.

Por isso, a não consideração dos efeitos sísmicos na zona de estudo considerada pode levar ao comprometimento da segurança estrutural dos edifícios em concreto armado.

### 7.1 TRABALHOS FUTUROS

De maneira a obter comportamentos e respostas mais próximas de uma estrutura real, podem ser feitas algumas implementações no estudo. Sendo elas:

- Considerar a interação do solo com a estrutura;
- Aprofundar a análise com históricos de acelerações no tempo;
- Comparar a ABNT NBR 15421:2006 com normas estrangeiras (americana, japonesa, etc).

Ainda, indica-se a realização do dimensionamento dos pilares do edifício, a fim de verificar a necessidade de considerar uma estrutura mais robusta ou não.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988. 69 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – procedimento. Rio de Janeiro, 2003. 22 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15421**: Projeto de estruturas resistentes a sismos – procedimento. Rio de Janeiro, 2006. 26 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 256 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019. 67 p.
- BANGASH, M. Y. H. **EARTHQUAKE RESISTANT BUILDINGS**: Dynamics analyses, numerical computations, codified methods, case studies and examples. 1. ed. London - UK: Springer, 2011.
- CARREIRA, M. R. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos. Não publicado**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão – PR, 2020.
- CHOPRA, A. K. **DYNAMIC OF STRUCTURES**: Theory and applications to earthquake engineering. 4. ed. University of California at Berkeley: Pearson Education Inc., 2012.
- CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. **DYNAMIC OF STRUCTURES**. 3. ed. California: Computer Structures, Inc., 1995.
- DEFILTRO, V. F. **DIMENSIONAMENTO DE UM EDIFÍCIO SISMO RESISTENTE**. Florianópolis, 2018. 83 p.
- HUMAR, J. L. **DYNAMIC OF STRUCTURES**. 2. ed. Canada: Macmillan India, 2001.
- LIMA, S. S.; SANTOS, S. H. C. **ANÁLISE DINÂMICA DAS ESTRUTURAS**. 1. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.
- PARISENTI, R. **ESTUDO DE ANÁLISE DINÂMICA E MÉTODOS DA NBR 15421 PARA PROJETO DE EDIFÍCIOS SUBMETIDOS A SISMOS**. 219 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- PAZ, M. **STRUCTURAL DYNAMICS**: Theory and computation. 2. ed. India: CBS Publishers and Distributors, 1985.
- THOMSON, W. T. **TEORIA DA VIBRAÇÃO com aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 1978.
- TORRAO, A. C. M. V. **PROPAGAÇÃO DAS ONDAS P,S E L**. 2013. Disponível em: <<https://alemdasaulas.wordpress.com/2013/01/28/3108/>>. Acesso em: 10 de novembro de 2020.

**APÊNDICE A** - Quadros de valores absolutos das combinações normais e excepcionais

Os valores apresentados estão no Sistema Internacional, com  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  em  $kN$  e  $M_x$  e  $M_y$  em  $kN.m$ .

Quadro 12 – Valores absolutos das combinações normais dos esforços internos no pilar de extremidade

| Nível    | Combinação 1 |       |       | Combinação 2 |       |       |
|----------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
|          | N            | Mz    | My    | N            | Mz    | My    |
| Nível 1  | 664,33       | 0,14  | 1,61  | 571,36       | 4,05  | 1,51  |
| Nível 2  | 595,25       | 9,07  | 5,54  | 510,77       | 5,55  | 5,06  |
| Nível 3  | 533,06       | 9,72  | 8,18  | 456,75       | 6,17  | 7,47  |
| Nível 4  | 476,15       | 11,46 | 10,54 | 407,69       | 7,53  | 9,62  |
| Nível 5  | 423,38       | 12,73 | 12,62 | 362,49       | 8,43  | 11,50 |
| Nível 6  | 373,78       | 13,90 | 14,43 | 320,25       | 9,34  | 13,14 |
| Nível 7  | 326,58       | 14,92 | 16,00 | 280,22       | 10,16 | 14,54 |
| Nível 8  | 281,13       | 15,81 | 17,33 | 241,76       | 10,93 | 15,74 |
| Nível 9  | 236,88       | 16,59 | 18,44 | 204,33       | 11,65 | 16,73 |
| Nível 10 | 193,37       | 17,20 | 19,33 | 167,51       | 12,24 | 17,53 |
| Nível 11 | 150,21       | 17,64 | 20,02 | 130,92       | 12,78 | 18,15 |
| Nível 12 | 107,07       | 17,81 | 20,50 | 94,24        | 13,16 | 18,59 |
| Nível 13 | 63,84        | 17,23 | 20,76 | 57,34        | 13,05 | 18,83 |
| Nível 14 | 20,26        | 17,35 | 21,47 | 19,92        | 14,05 | 19,53 |
| Nível    | Combinação 3 |       |       | Combinação 4 |       |       |
|          | N            | Mz    | My    | N            | Mz    | My    |
| Nível 1  | 746,35       | 5,25  | 0,84  | 708,06       | 4,48  | 0,23  |
| Nível 2  | 672,96       | 11,85 | 3,75  | 640,29       | 10,17 | 2,08  |
| Nível 3  | 604,73       | 12,34 | 5,61  | 576,20       | 10,54 | 3,19  |
| Nível 4  | 540,89       | 14,27 | 7,39  | 515,57       | 12,20 | 4,37  |
| Nível 5  | 480,66       | 15,78 | 9,05  | 457,96       | 13,53 | 5,56  |
| Nível 6  | 423,43       | 17,13 | 10,59 | 403,00       | 14,72 | 6,74  |
| Nível 7  | 368,66       | 18,28 | 12,00 | 350,35       | 15,76 | 7,88  |
| Nível 8  | 315,92       | 19,24 | 13,27 | 299,74       | 16,64 | 8,97  |
| Nível 9  | 264,84       | 20,03 | 14,41 | 250,94       | 17,38 | 10,02 |
| Nível 10 | 215,06       | 20,62 | 15,37 | 203,65       | 17,96 | 10,92 |
| Nível 11 | 166,22       | 20,95 | 16,15 | 157,59       | 18,29 | 11,70 |
| Nível 12 | 118,00       | 20,88 | 16,73 | 112,46       | 18,28 | 12,31 |
| Nível 13 | 70,28        | 19,83 | 17,09 | 68,07        | 17,37 | 12,71 |
| Nível 14 | 22,90        | 19,10 | 17,73 | 24,33        | 16,97 | 13,29 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Quadro 13 – Valores absolutos das combinações excepcionais dos esforços internos no pilar de extremidade

| Nível    | Combinação 5 |       |       | Combinação 6 |       |       |
|----------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
|          | N            | Mz    | My    | N            | Mz    | My    |
| Nível 1  | 716,17       | 20,88 | 1,46  | 970,84       | 5,56  | 9,32  |
| Nível 2  | 655,16       | 21,49 | 4,95  | 899,21       | 11,88 | 23,50 |
| Nível 3  | 595,98       | 22,45 | 7,29  | 821,83       | 13,43 | 33,82 |
| Nível 4  | 538,53       | 25,23 | 9,33  | 743,26       | 15,42 | 41,86 |
| Nível 5  | 482,44       | 27,56 | 11,08 | 665,51       | 16,73 | 48,05 |
| Nível 6  | 427,48       | 29,32 | 12,56 | 589,60       | 17,61 | 52,82 |
| Nível 7  | 373,48       | 30,88 | 13,80 | 515,78       | 18,17 | 56,45 |
| Nível 8  | 320,34       | 32,42 | 14,82 | 443,80       | 18,51 | 59,19 |
| Nível 9  | 267,97       | 34,02 | 15,65 | 373,27       | 18,73 | 61,14 |
| Nível 10 | 216,44       | 34,55 | 16,30 | 303,92       | 18,85 | 62,40 |
| Nível 11 | 165,96       | 33,67 | 16,77 | 235,76       | 18,81 | 63,01 |
| Nível 12 | 116,86       | 31,36 | 17,08 | 169,19       | 18,46 | 62,98 |
| Nível 13 | 69,73        | 26,94 | 17,23 | 104,37       | 17,24 | 62,43 |
| Nível 14 | 25,31        | 21,77 | 17,86 | 42,19        | 16,76 | 63,93 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Quadro 14 – Valores absolutos das combinações normais dos esforços internos no pilar de canto

| Nível    | Combinação 1 |       |      | Combinação 2 |       |      |
|----------|--------------|-------|------|--------------|-------|------|
|          | N            | Mz    | My   | N            | Mz    | My   |
| Nível 1  | 1939,60      | 10,61 | 0,77 | 1771,52      | 5,95  | 0,65 |
| Nível 2  | 1782,58      | 37,38 | 2,19 | 1629,79      | 31,38 | 1,85 |
| Nível 3  | 1628,96      | 30,87 | 1,96 | 1490,65      | 25,11 | 1,63 |
| Nível 4  | 1478,07      | 31,29 | 1,77 | 1353,58      | 25,49 | 1,43 |
| Nível 5  | 1329,82      | 30,56 | 1,52 | 1218,63      | 24,85 | 1,19 |
| Nível 6  | 1184,03      | 30,18 | 1,24 | 1085,72      | 24,57 | 0,93 |
| Nível 7  | 1040,50      | 29,84 | 0,95 | 954,76       | 24,38 | 0,65 |
| Nível 8  | 899,03       | 29,60 | 0,66 | 825,63       | 24,30 | 0,38 |
| Nível 9  | 759,40       | 29,43 | 0,38 | 698,20       | 24,31 | 0,12 |
| Nível 10 | 621,38       | 29,33 | 0,12 | 572,29       | 24,37 | 0,12 |
| Nível 11 | 484,73       | 29,27 | 0,13 | 447,72       | 24,47 | 0,34 |
| Nível 12 | 349,19       | 29,27 | 0,33 | 324,27       | 24,61 | 0,52 |
| Nível 13 | 214,47       | 29,28 | 0,49 | 201,69       | 24,63 | 0,67 |
| Nível 14 | 80,49        | 29,43 | 0,79 | 79,88        | 25,24 | 0,92 |
| Nível    | Combinação 3 |       |      | Combinação 4 |       |      |
|          | N            | Mz    | My   | N            | Mz    | My   |
| Nível 1  | 1909,49      | 15,36 | 1,40 | 1721,34      | 13,87 | 1,69 |
| Nível 2  | 1753,79      | 40,60 | 3,35 | 1581,80      | 36,76 | 3,79 |
| Nível 3  | 1602,01      | 34,83 | 3,65 | 1445,73      | 31,71 | 4,44 |
| Nível 4  | 1453,39      | 35,42 | 3,87 | 1312,45      | 32,37 | 4,94 |
| Nível 5  | 1307,67      | 34,81 | 3,95 | 1181,72      | 31,92 | 5,25 |
| Nível 6  | 1164,55      | 34,43 | 3,93 | 1053,25      | 31,66 | 5,41 |
| Nível 7  | 1023,72      | 34,02 | 3,82 | 926,80       | 31,35 | 5,45 |
| Nível 8  | 884,91       | 33,66 | 3,66 | 802,09       | 31,07 | 5,39 |
| Nível 9  | 747,82       | 33,33 | 3,44 | 678,90       | 30,80 | 5,23 |
| Nível 10 | 612,19       | 33,04 | 3,22 | 556,98       | 30,56 | 5,06 |
| Nível 11 | 477,75       | 32,80 | 3,00 | 436,09       | 30,35 | 4,87 |
| Nível 12 | 344,24       | 32,65 | 2,80 | 316,01       | 30,25 | 4,68 |
| Nível 13 | 211,33       | 32,43 | 2,62 | 196,46       | 29,87 | 4,50 |
| Nível 14 | 79,07        | 33,21 | 2,41 | 77,51        | 31,54 | 4,41 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Quadro 15 – Valores absolutos das combinações excepcionais dos esforços internos no pilar de canto

| Nível    | Combinação 5 |       |      | Combinação 6 |       |       |
|----------|--------------|-------|------|--------------|-------|-------|
|          | N            | Mz    | My   | N            | Mz    | My    |
| Nível 1  | 1654,52      | 28,90 | 0,49 | 1533,26      | 12,57 | 6,92  |
| Nível 2  | 1530,42      | 42,58 | 1,43 | 1414,87      | 33,36 | 12,44 |
| Nível 3  | 1405,86      | 40,44 | 1,19 | 1298,39      | 30,53 | 18,59 |
| Nível 4  | 1280,77      | 41,34 | 0,96 | 1183,27      | 32,22 | 23,63 |
| Nível 5  | 1155,78      | 41,19 | 0,70 | 1069,35      | 32,77 | 27,82 |
| Nível 6  | 1031,27      | 40,90 | 0,42 | 956,43       | 33,31 | 31,29 |
| Nível 7  | 907,58       | 40,36 | 0,14 | 844,37       | 33,67 | 34,12 |
| Nível 8  | 784,97       | 39,63 | 0,15 | 733,03       | 33,93 | 36,40 |
| Nível 9  | 663,63       | 38,78 | 0,42 | 622,30       | 34,09 | 38,16 |
| Nível 10 | 543,68       | 37,84 | 0,68 | 512,05       | 34,19 | 39,42 |
| Nível 11 | 425,21       | 36,86 | 0,90 | 402,20       | 34,20 | 40,21 |
| Nível 12 | 308,20       | 36,06 | 1,09 | 292,63       | 34,28 | 40,55 |
| Nível 13 | 192,64       | 34,77 | 1,26 | 183,17       | 33,62 | 40,46 |
| Nível 14 | 78,22        | 37,91 | 1,54 | 74,02        | 37,05 | 41,43 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Quadro 16 – Valores absolutos das combinações normais dos esforços internos no pilar intermediário

| Nível    | Combinação 1 |      |       | Combinação 2 |       |       |
|----------|--------------|------|-------|--------------|-------|-------|
|          | N            | Mz   | My    | N            | Mz    | My    |
| Nível 1  | 1161,77      | 8,52 | 2,58  | 1029,68      | 14,37 | 2,32  |
| Nível 2  | 1036,26      | 9,01 | 8,67  | 917,99       | 12,44 | 7,81  |
| Nível 3  | 922,47       | 5,78 | 12,31 | 817,06       | 9,28  | 11,16 |
| Nível 4  | 818,19       | 4,10 | 15,65 | 724,89       | 8,04  | 14,23 |
| Nível 5  | 721,86       | 2,35 | 18,59 | 639,97       | 6,77  | 16,92 |
| Nível 6  | 632,08       | 0,76 | 21,17 | 560,99       | 5,52  | 19,26 |
| Nível 7  | 547,65       | 0,70 | 23,40 | 486,79       | 4,30  | 21,28 |
| Nível 8  | 467,52       | 2,03 | 25,30 | 416,41       | 3,11  | 22,99 |
| Nível 9  | 390,81       | 3,21 | 26,89 | 349,01       | 1,95  | 24,42 |
| Nível 10 | 316,74       | 4,17 | 28,18 | 283,90       | 0,95  | 25,58 |
| Nível 11 | 244,66       | 4,90 | 29,21 | 220,50       | 0,02  | 26,49 |
| Nível 12 | 173,99       | 5,13 | 29,96 | 158,30       | 0,63  | 27,16 |
| Nível 13 | 104,16       | 4,35 | 30,45 | 96,85        | 0,75  | 27,60 |
| Nível 14 | 35,50        | 2,92 | 31,10 | 36,55        | 0,69  | 28,23 |
| Nível    | Combinação 3 |      |       | Combinação 4 |       |       |
|          | N            | Mz   | My    | N            | Mz    | My    |
| Nível 1  | 1224,79      | 0,01 | 1,86  | 1134,73      | 0,19  | 1,11  |
| Nível 2  | 1097,44      | 3,62 | 7,03  | 1019,95      | 3,45  | 5,07  |
| Nível 3  | 980,29       | 0,88 | 9,86  | 913,42       | 1,13  | 7,08  |
| Nível 4  | 871,48       | 1,02 | 12,56 | 813,70       | 0,47  | 9,08  |
| Nível 5  | 769,85       | 3,03 | 15,03 | 719,95       | 2,20  | 10,98 |
| Nível 6  | 674,33       | 4,78 | 17,27 | 631,41       | 3,71  | 12,76 |
| Nível 7  | 584,01       | 6,31 | 19,28 | 547,40       | 5,05  | 14,42 |
| Nível 8  | 498,07       | 7,61 | 21,07 | 467,33       | 6,21  | 15,95 |
| Nível 9  | 415,78       | 8,68 | 22,64 | 390,63       | 7,17  | 17,35 |
| Nível 10 | 336,48       | 9,48 | 23,97 | 316,80       | 7,91  | 18,55 |
| Nível 11 | 259,53       | 9,89 | 25,05 | 245,28       | 8,31  | 19,56 |
| Nível 12 | 184,35       | 9,62 | 25,88 | 175,58       | 8,10  | 20,36 |
| Nível 13 | 110,28       | 7,89 | 26,45 | 107,07       | 6,66  | 20,93 |
| Nível 14 | 37,54        | 4,82 | 27,06 | 39,93        | 3,86  | 21,50 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Quadro 17 – Valores absolutos das combinações excepcionais dos esforços internos no pilar intermediário

| Nível    | Combinação 5 |       |       | Combinação 6 |       |       |
|----------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
|          | N            | Mz    | My    | N            | Mz    | My    |
| Nível 1  | 982,60       | 29,02 | 2,22  | 1363,11      | 2,14  | 9,90  |
| Nível 2  | 886,20       | 20,42 | 7,55  | 1255,57      | 0,38  | 23,24 |
| Nível 3  | 796,12       | 22,97 | 11,06 | 1147,25      | 3,73  | 33,35 |
| Nível 4  | 711,11       | 26,25 | 14,24 | 1038,88      | 6,29  | 41,63 |
| Nível 5  | 630,63       | 29,40 | 16,98 | 931,49       | 8,59  | 48,26 |
| Nível 6  | 554,17       | 31,56 | 19,32 | 825,78       | 10,38 | 53,52 |
| Nível 7  | 481,27       | 33,55 | 21,29 | 722,11       | 11,76 | 57,64 |
| Nível 8  | 411,52       | 35,75 | 22,91 | 620,59       | 12,81 | 60,82 |
| Nível 9  | 344,51       | 38,36 | 24,21 | 521,14       | 13,57 | 63,18 |
| Nível 10 | 279,86       | 39,19 | 25,23 | 423,67       | 14,05 | 64,84 |
| Nível 11 | 217,21       | 37,30 | 25,99 | 328,09       | 14,16 | 65,83 |
| Nível 12 | 156,16       | 32,64 | 26,53 | 234,34       | 13,63 | 66,21 |
| Nível 13 | 96,06        | 24,45 | 26,88 | 142,17       | 11,82 | 66,07 |
| Nível 14 | 36,83        | 13,05 | 27,41 | 51,82        | 9,04  | 67,19 |

Fonte: Elaborada pelo autor

**APÊNDICE B** - Tabelas de valores absolutos das envoltórias das combinações normais e excepcionais

Os valores apresentados estão no Sistema Internacional, com  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  em  $kN$  e  $M_x$  e  $M_y$  em  $kN.m$ .

Tabela 24 – Valores absolutos da envoltória dos esforços internos nos pilares de extremidade

| Nível    | Combinações Normais |       |       | Combinações Excepcionais |       |       |
|----------|---------------------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|
|          | N                   | Mz    | My    | N                        | Mz    | My    |
| Nível 1  | 746,35              | 5,25  | 1,61  | 970,84                   | 20,88 | 9,32  |
| Nível 2  | 672,96              | 11,85 | 5,54  | 899,21                   | 21,49 | 23,50 |
| Nível 3  | 604,73              | 12,34 | 8,18  | 821,83                   | 22,45 | 33,82 |
| Nível 4  | 540,89              | 14,27 | 10,54 | 743,26                   | 25,23 | 41,86 |
| Nível 5  | 480,66              | 15,78 | 12,62 | 665,51                   | 27,56 | 48,05 |
| Nível 6  | 423,43              | 17,13 | 14,43 | 589,60                   | 29,32 | 52,82 |
| Nível 7  | 368,66              | 18,28 | 16,00 | 515,78                   | 30,88 | 56,45 |
| Nível 8  | 315,92              | 19,24 | 17,33 | 443,80                   | 32,42 | 59,19 |
| Nível 9  | 264,84              | 20,03 | 18,44 | 373,27                   | 34,02 | 61,14 |
| Nível 10 | 215,06              | 20,62 | 19,33 | 303,92                   | 34,55 | 62,40 |
| Nível 11 | 166,22              | 20,95 | 20,02 | 235,76                   | 33,67 | 63,01 |
| Nível 12 | 118,00              | 20,88 | 20,50 | 169,19                   | 31,36 | 62,98 |
| Nível 13 | 70,28               | 19,83 | 20,76 | 104,37                   | 26,94 | 62,43 |
| Nível 14 | 24,33               | 19,10 | 21,47 | 42,19                    | 21,77 | 63,93 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 25 – Valores absolutos da envoltória dos esforços internos nos pilares de canto

| Nível    | Combinações Normais |       |      | Combinações Excepcionais |       |       |
|----------|---------------------|-------|------|--------------------------|-------|-------|
|          | N                   | Mz    | My   | N                        | Mz    | My    |
| Nível 1  | 1939,60             | 15,36 | 1,69 | 1654,52                  | 28,90 | 6,92  |
| Nível 2  | 1782,58             | 40,60 | 3,79 | 1530,42                  | 42,58 | 12,44 |
| Nível 3  | 1628,96             | 34,83 | 4,44 | 1405,86                  | 40,44 | 18,59 |
| Nível 4  | 1478,07             | 35,42 | 4,94 | 1280,77                  | 41,34 | 23,63 |
| Nível 5  | 1329,82             | 34,81 | 5,25 | 1155,78                  | 41,19 | 27,82 |
| Nível 6  | 1184,03             | 34,43 | 5,41 | 1031,27                  | 40,90 | 31,29 |
| Nível 7  | 1040,50             | 34,02 | 5,45 | 907,58                   | 40,36 | 34,12 |
| Nível 8  | 899,03              | 33,66 | 5,39 | 784,97                   | 39,63 | 36,40 |
| Nível 9  | 759,40              | 33,33 | 5,23 | 663,63                   | 38,78 | 38,16 |
| Nível 10 | 621,38              | 33,04 | 5,06 | 543,68                   | 37,84 | 39,42 |
| Nível 11 | 484,73              | 32,80 | 4,87 | 425,21                   | 36,86 | 40,21 |
| Nível 12 | 349,19              | 32,65 | 4,68 | 308,20                   | 36,06 | 40,55 |
| Nível 13 | 214,47              | 32,43 | 4,50 | 192,64                   | 34,77 | 40,46 |
| Nível 14 | 80,49               | 33,21 | 4,41 | 78,22                    | 37,91 | 41,43 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 26 – Valores absolutos da envoltória dos esforços internos nos pilares de intermediários

| <b>Nível</b>    | <b>Combinações Normais</b> |           |           | <b>Combinações Excepcionais</b> |           |           |
|-----------------|----------------------------|-----------|-----------|---------------------------------|-----------|-----------|
|                 | <b>N</b>                   | <b>Mz</b> | <b>My</b> | <b>N</b>                        | <b>Mz</b> | <b>My</b> |
| <b>Nível 1</b>  | 1224,79                    | 14,37     | 2,58      | 1363,11                         | 29,02     | 9,90      |
| <b>Nível 2</b>  | 1097,44                    | 12,44     | 8,67      | 1255,57                         | 20,42     | 23,24     |
| <b>Nível 3</b>  | 980,29                     | 9,28      | 12,31     | 1147,25                         | 22,97     | 33,35     |
| <b>Nível 4</b>  | 871,48                     | 8,04      | 15,65     | 1038,88                         | 26,25     | 41,63     |
| <b>Nível 5</b>  | 769,85                     | 6,77      | 18,59     | 931,49                          | 29,40     | 48,26     |
| <b>Nível 6</b>  | 674,33                     | 5,52      | 21,17     | 825,78                          | 31,56     | 53,52     |
| <b>Nível 7</b>  | 584,01                     | 6,31      | 23,40     | 722,11                          | 33,55     | 57,64     |
| <b>Nível 8</b>  | 498,07                     | 7,61      | 25,30     | 620,59                          | 35,75     | 60,82     |
| <b>Nível 9</b>  | 415,78                     | 8,68      | 26,89     | 521,14                          | 38,36     | 63,18     |
| <b>Nível 10</b> | 336,48                     | 9,48      | 28,18     | 423,67                          | 39,19     | 64,84     |
| <b>Nível 11</b> | 259,53                     | 9,89      | 29,21     | 328,09                          | 37,30     | 65,83     |
| <b>Nível 12</b> | 184,35                     | 9,62      | 29,96     | 234,34                          | 32,64     | 66,21     |
| <b>Nível 13</b> | 110,28                     | 7,89      | 30,45     | 142,17                          | 24,45     | 66,07     |
| <b>Nível 14</b> | 39,93                      | 4,82      | 31,10     | 51,82                           | 13,05     | 67,19     |

Fonte: Elaborada pelo autor