



TÉCNICO
LISBOA



Dimensionamento sísmico de sistemas de ascensores em estruturas com isolamento de base

Paulo António Roque Silva

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores: Professor Doutor Jorge Miguel Silveira Filipe Mascarenhas Proença
Professor Doutor Luís Manuel Coelho Guerreiro

Júri

Presidente: Professor Orlando José Barreiros D'Almeida Pereira

Orientador: Professor Luís Manuel Coelho Guerreiro

Vogal: Professor António Manuel Figueiredo Pinto da Costa

Outubro 2021

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Começo por manifestar o meu agradecimento àqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram positivamente para a construção e apresentação desta dissertação. A todos, a minha sincera gratidão.

Ao Professor Jorge Proença, pelas diretrizes sábias na construção deste trabalho, por toda a dedicação, apoio, revisão e motivação, não esquecendo a anterior oportunidade na colaboração nas ET 11/2020, de onde surgiu a ideia para esta dissertação.

Ao Professor Luís Guerreiro, pela sua dedicação, colaboração, sugestões, permanente valorização do trabalho desenvolvido e na partilha de conhecimentos sobre isolamento de base, determinante para a concretização da dissertação.

À minha Família, pelo apoio incondicional e acompanhamento da minha vida académica, incentivadora na ultrapassagem dos desafios impostos.

À minha namorada, pelo companheirismo, paciência e força constante nos momentos desafiadores.

Aos meus amigos e colegas, pelos momentos partilhados nos últimos 5 anos, pelas sessões de estudo e convívio.

Resumo

Os sistemas de ascensores apresentam uma importância vital na funcionalidade de edifícios de importância maior, para a segurança pública e da proteção civil, como sejam edifícios hospitalares, onde a operacionalidade após sismo depende da integridade dos meios de comunicação vertical, de tal forma que uma possível falha no sistema poderá impossibilitar a prestação de cuidados de saúde, tornando-se crítica após um evento sísmico.

As soluções estruturais de isolamento sísmico oferecem maiores garantias de controlo e de minimização de danos em condições sísmicas, procurando assim assegurar a operacionalidade após um sismo. No entanto, os sistemas de ascensores ainda estão sujeitos a um certo nível de aceleração sísmica.

Na atual regulamentação dá-se especial atenção à limitação de danos em elementos não estruturais, propondo uma fórmula de cálculo da força sísmica horizontal a que um elemento é sujeito. Esta fórmula proposta não contabiliza os edifícios com isolamento de base, onde o seu valor de cálculo será muito sobrestimado, o que dificulta o dimensionamento sísmico dos sistemas de ascensores que depende da variável aceleração sísmica.

O principal objetivo desta dissertação é deduzir uma fórmula de cálculo de aceleração sísmica, a que os elementos não estruturais são sujeitos, adequada a edifícios com isolamento de base. Foi concretizado pela obtenção de um conjunto de expressões que estimam a máxima aceleração de forma precisa, em função da relação entre períodos fundamentais da estrutura de base isolada e da estrutura considerando-a de base fixa, $T_{isolado}/T_{fixo}$, dependendo também da tipologia estrutural do edifício.

Palavras-chave: Ascensor, Elevador, Dimensionamento sísmico, Isolamento de base, EN 81-77:2018

Abstract

Elevator systems have a vital importance in the functionality of important buildings, for both public security and life protection. Exemplifying with hospital buildings, their functionality depends on the integrity of the vertical transport systems, in such a way that a failure of those systems can disable the medical services, which can be particularly critical in the aftermath of an earthquake event.

Base isolated solutions in buildings provide an improved performance and control of the seismic behaviour, minimising the resulting structural and non-structural damage, to an extent that these solutions may ensure the post-earthquake functionality of the building. Nevertheless, even in such buildings the elevator systems are subjected to the effects of the earthquake, thus requiring for explicit demonstration of the safety of these, considered as non-structural components.

The current structural design codes pay some attention to the damage control of the non-structural components, providing for formulas to compute the horizontal seismic forces that these components may be subjected to. However, those formulas do not consider the specific case of base isolated buildings, providing for an overly conservative calculation of the horizontal acceleration to which the non-structural components, such as those that compose the elevator system, are subjected to.

The main objective of this dissertation is to rationally derive the formulas for the computation of the horizontal seismic acceleration imposed on the non-structural components in base isolated buildings. These formulas provide for the estimation of the maximum design acceleration, as a function of the ratio between the isolated and the fixed base periods, $T_{isolated}/T_{fixed}$, also accounting for the different structural types.

Keywords: Elevator, Lift, Seismic design, Base isolation, EN 81-77:2018

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Lista de Tabelas	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de Abreviaturas e Símbolos	xv
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos do Trabalho	2
1.3 Organização do Documento	3
2 Ação Sísmica e Isolamento de Base	5
2.1 Ação Sísmica	5
2.1.1 Origem dos Sismos	5
2.1.2 Caracterização da Ação Sísmica	6
2.1.3 Espectro de Resposta da Ação Sísmica	7
2.1.4 Aceleração de Referência e Período de Retorno	8
2.1.5 Influência do Tipo de Solo	9
2.2 Isolamento Sísmico de Base	10
2.2.1 Introdução	10
2.2.2 Tipos de Sistemas de Isolamento	13
2.2.3 Modelo Linear Equivalente	19
2.2.4 Análise Modal	20
3 Sistemas de Ascensores	23
3.1 Sistemas de Ascensores	23
3.2 Dimensionamento Sísmico de Ascensores segundo a NP EN 81-77:2018	25
3.2.1 Considerações Iniciais	25
3.2.2 Categoria Sísmica do Ascensor	26
3.2.3 Aceleração de Cálculo	26
3.2.4 Coeficiente de Importância do Elemento	27
3.2.5 Coeficiente de Comportamento do Elemento	28

3.2.6	Casos de Carga	28
3.2.7	Dispositivos de Retenção	29
3.2.8	Sistema de Guias	30
3.2.9	Sistema de Detecção Sísmica	34
3.3	Sistemas de Ascensores em Edifícios Isolados	34
4	Estudo Paramétrico	37
4.1	Introdução	37
4.2	Modelo Numérico	37
4.3	Análise Modal	39
4.3.1	Cálculo das Frequências e Modos de Vibração	39
4.3.2	Matriz de Massa	39
4.3.3	Definição da Matriz de Rigidez	40
4.3.4	Cálculo da Resposta da Estrutura	44
4.4	Combinação Modal	45
4.5	Tipologias Estruturais	45
4.6	Algoritmo de Cálculo	47
4.7	Estudo de Sensibilidade	48
4.7.1	Considerações Iniciais	48
4.7.2	Amplificação Espectral (β_1)	48
4.7.3	Efeito dos Modos Superiores (β_2)	53
4.8	Amplificação Global da Aceleração	57
4.8.1	Considerações Iniciais	57
4.8.2	Resultados Globais	57
4.9	Fórmulas Propostas	60
4.10	Fórmula Simplificada	62
4.11	Considerações Finais	63
5	Conclusões	65
5.1	Conclusões	65
5.2	Trabalho Futuro	66
	Bibliografia	67
A	Códigos em Python	A.1
B	Aceleração de Cálculo, a_d (m/s^2), e Categoria Sísmica do Ascensor	B.1

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Valores de S_{\max} , retirado do EC8 [2].	10
Tabela 3.1	Categorias sísmicas dos ascensores, adaptado da NP EN 81-77:2018 [3].	26
Tabela 3.2	Cargas e forças que devem ser consideradas nos diversos cenários de carga. Adaptado de EN 81-77:2018	28
Tabela 3.3	Fatores de segurança para as guias, adaptado de [3]	31
Tabela 4.1	Tipologias Estruturais do estudo.	45
Tabela 4.2	Razão entre as somas das inércias dos pórticos e paredes, $n = \sum I_w / \sum I_p$, por forma a satisfazer cada tipologia estrutural com um dado número de pisos.	46
Tabela 4.3	Dados Modais e valor de β_1 , para a tipologia pórtico com variação número de pisos e $T_{eff}/T_f = 3$	50
Tabela 4.4	Dados Modais e valor de β_1 , para a tipologia parede com variação número de pisos e $T_{eff}/T_f = 3$	51
Tabela 4.5	Dados Modais e valor de β_1 , para N=4 com variação da tipologia estrutural e $T_{eff}/T_f = 3$	52
Tabela 4.6	Coeficientes de interpolação para as quatro tipologias, $T_{eff}=2s$	61
Tabela 4.7	Coeficientes de interpolação para as quatro tipologias, $T_{eff}=3s$	61
Tabela 4.8	Aceleração de cálculo (m/s^2) e categoria sísmica do ascensor, para os 15 mu- nicípios representativos do zonamento para as ações sísmicas Tipo 1 e 2.	63

Lista de Figuras

Figura 2.1	Acelerograma das ondas volúmicas e de superfície ao longo do tempo, adaptado de [4].	5
Figura 2.2	Espectro de resposta elástico: Sismo Tipo 1 e Sismo Tipo 2.	7
Figura 2.3	Resposta esquemática de uma estrutura de base fixa e de base isolada sujeito a ação sísmica, retirado de [7].	11
Figura 2.4	Representação do espectro de resposta de acelerações e deslocamentos, relativo a uma dada ação sísmica, para diferentes valores de coeficiente de amortecimento, retirado de [8].	12
Figura 2.5	Influência da relação de períodos na eficácia do comportamento da estrutura com isolamento, retirado de [10].	12
Figura 2.6	HDRB, retirado de [11].	14
Figura 2.7	Relação força–deslocamento linear equivalente dos apoios HDRB, retirado de [7].	14
Figura 2.8	LRB, adaptado de [11].	15
Figura 2.9	Força-Deslocamento LRBB, retirado de [7]	16
Figura 2.10	Definição do modelo bilinear de aproximação ao comportamento do apoio LRB, retirado de [7].	16
Figura 2.11	Identificação dos componentes principais de um apoio FPS e movimentação do aparelho, retirado de [7].	17
Figura 2.12	Identificação dos componentes principais de um apoio FPS e movimentação do aparelho, retirado de [7].	18
Figura 2.13	Modos de vibração de uma estrutura isolada, retirado de [10].	20
Figura 2.14	Espectro corrigido para análise por espectro de resposta de estruturas isoladas, adaptado de [14].	21
Figura 2.15	Mudança dos períodos numa estrutura isolada, adaptado de [16].	22
Figura 3.1	Componentes de um ascensor elétrico de tração, adaptado de [18].	24
Figura 3.2	Sistema de guias dentro da caixa do ascensor.	25
Figura 3.3	Dispositivos de retenção, retirado de [3].	30
Figura 3.4	Eixos de guia e forças correspondentes.	30
Figura 3.5	Posição das guias na caixa e forças de embate nas respetivas direções horizontais principais da ação sísmica.	32
Figura 3.6	Centro de massa da cabine e contrapeso, retirado de [3].	33

Figura 3.7	Plano de isolamento ao nível do fundo da cave, com o pormenor do núcleo de ascensores, adaptado de [22].	35
Figura 3.8	Plano de isolamento ao nível do piso térreo, com o pormenor do núcleo de ascensores, adaptado de [22].	35
Figura 4.1	Modelo de massas concentradas nos pisos: Base fixa e Base isolada.	38
Figura 4.2	Deslocamentos independentes para estrutura tipo pórtico: Base Fixa e Base Isolada.	41
Figura 4.3	Elemento de viga fina (Euler-Bernoulli): aproximação linear.	42
Figura 4.4	Deslocamentos independentes para estrutura tipo parede: Base Fixa e Base Isolada.	42
Figura 4.5	Modelo plano de cálculo com a associação de parede e pórtico equivalente, adaptado de [27]	44
Figura 4.6	Fluxograma do procedimento de cálculo, para obtenção da rigidez por piso. . . .	47
Figura 4.7	Modelo Amplificação Espectral (β_1)	49
Figura 4.8	Factor de amplificação β_1 em função de T_{eff}/T_f , para sistema porticado variando o número de pisos.	50
Figura 4.9	Factor de amplificação β_1 em função de T_{eff}/T_f , para sistema parede variando o número de pisos.	51
Figura 4.10	Factor de amplificação β_1 em função de T_{eff}/T_f , para edifício com 4 pisos e variando a tipologia estrutural.	52
Figura 4.11	Espectro de Resposta: Sismo Tipo 1	53
Figura 4.12	Factor de amplificação β_2 para sistema parede com $T_{eff} = 2s$ e variando o número de pisos.	55
Figura 4.13	Factor de amplificação β_2 para sistema parede com $T_{eff} = 3s$ e variando o número de pisos.	56
Figura 4.14	Factor de amplificação β_2 com $T_{eff} = 3s$ e N=4 variando a tipologia estrutural. . .	57
Figura 4.15	Factor de amplificação Global com $T_{eff} = 2s$ e N=4 variando a tipologia estrutural. .	58
Figura 4.16	Factor de amplificação Global com $T_{eff} = 3s$ e N=4 variando a tipologia estrutural. .	59
Figura 4.17	Factor de amplificação global, β_{global} , com $T_{eff} = 3s$ e N=7 variando o coeficiente de amortecimento efetivo.	60
Figura 4.18	Representação gráfica das equações propostas de cálculo do β_{global} para T_{eff} igual a 2 e 3s das quatro tipologias estruturais.	62

Lista de Abreviaturas e Símbolos

Abreviaturas

CSA Categoria sísmica do ascensor

EC8 Eurocódigo 8

ET 11/2020 Especificações técnicas para o dimensionamento de ascensores de edifícios hospitalares sujeitos a condições sísmicas, ACSS.

FPS *Friction Pendulum System*

HDRB *High Damping Rubber Bearing*

IPQ Instituto Português da Qualidade

LRB *Laminated Rubber Bearing*

Símbolos gregos

β_1 Amplificação espectral.

β_2 Amplificação devido à contabilização de todos os modos de vibração.

β_{global} Amplificação global.

β_{in} Razão entre a frequência do modo i e do modo n .

η Coeficiente de correção do amortecimento.

γ_a Coeficiente de importância do elemento.

γ_I Coeficiente de importância do edifício.

ρ_{in} Coeficiente de correlação entre os modos i e n .

θ Grau de liberdade de rotação.

ξ_{eff} Coeficiente de amortecimento efetivo do sistema de isolamento de base.

Símbolos romanos

$[K]$ Matriz de rigidez.

$[M]$	Matriz de massa.
$[U]$	Matriz de deslocamentos.
E_E	Efeito da ação sísmica.
K_{eff}	Rigidez horizontal efetiva do sistema de isolamento de base.
N	Número de pisos.
n	Razão entre a soma das inércias dos elementos estruturais paredes e pilares.
p	Frequência.
T	Período.
T_{eff}	Período fundamental efetivo da superestrutura considerando-a como um corpo rígido.
u	Grau de liberdade de translação.
V	Vetor de forças transversais.
v	Matriz modal.
\ddot{q}	Vetor de acelerações.
q	Vetor de deslocamentos.

Subscritos

n	modo de vibração n.
p	Elementos estruturais pilares.
w	Elementos estruturais paredes.
x, y	Componentes cartesianos.

Sobrescritos

T	Transposta
---	------------

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

A observação dos efeitos dos sismos em edifícios permite verificar que, para além da ocorrência de danos estruturais, podem ocorrer danos importantes em elementos não estruturais. Esses danos em elementos não estruturais representam uma fração significativa dos custos de reparação, por vezes ao ponto de essa reparação passar, por esse facto, a ser economicamente inviável [1]. Danos esses que podem limitar ou mesmo impedir a desejável utilização e operacionalidade dos edifícios no período pós-sismo. No caso de edifícios de importância maior, para segurança pública e da proteção civil, como sejam edifícios hospitalares, a inoperacionalidade pós-sismo pode ser crítica, devido à interrupção da prestação regular de tratamentos de saúde, e à impossibilidade de providenciar o imediato tratamento emergente dos feridos resultantes do evento.

As soluções estruturais de isolamento sísmico têm vindo a encontrar maior receptividade em edifícios de importância diferenciada, como sejam edifícios hospitalares ou edifícios de maior valor social e económico. Em acréscimo, tratam-se de soluções estruturais que oferecem maiores garantias de controlo e de minimização de danos em condições sísmicas, procurando assim assegurar a operacionalidade após um sismo. A operacionalidade depende também da integridade dos meios de comunicação vertical, como sejam os sistemas de ascensores, que ainda estão sujeitos a um certo nível de aceleração sísmica.

Os atuais regulamentos estruturais focalizavam-se exclusivamente na prevenção do risco de colapso estrutural das construções, mas também procuram limitar os danos não estruturais. Na atual regulamentação Europeia, EN 1998-1:2010 [2], é dada especial atenção à limitação de danos em elementos não estruturais, onde é proposta uma fórmula de cálculo da força sísmica horizontal a que um elemento não estrutural é sujeito, de forma a realizar-se o respetivo dimensionamento explícito ao sismo. Esta fórmula de cálculo proposta na norma é apenas válida para edifícios de base fixa, sendo que a sua aplicação em edifícios de base isolada corresponderá a um valor muito sobrestimado e irrealista, o que dificultará o dimensionamento sísmico dos sistemas de ascensores o qual depende da variável aceleração sísmica.

O dimensionamento de sistemas de ascensores sujeitos a condições sísmicas encontra-se enquadrado pela NP EN 81-77:2018 [3], publicado pelo Instituto Português da Qualidade - IPQ, cuja aplicação se encontra articulada com a do Eurocódigo 8 [2], referente ao dimensionamento sísmico da estrutura do edifício. O dimensionamento dos sistemas de ascensores compreende um conjunto de medidas, prescritivas ou baseadas no desempenho, em cálculos, designadamente das guias da cabine e do contrapeso, e de fixação de diversos componentes. Essas medidas dependem da designada “categoria sísmica do ascensor”, que por sua vez depende da variável aceleração de cálculo, a_d , correspondente ao valor de pico de aceleração previsto na superestrutura.

O principal objetivo desta dissertação é deduzir uma fórmula de cálculo de aceleração sísmica a que os elementos não estruturais são sujeitos, semelhante à proposta pelo Eurocódigo 8 para edifícios de base fixa, mas aplicável a edifícios com isolamento de base.

1.2 Objetivos do Trabalho

É no âmbito desta temática, associada às exigências de dimensionamento sísmico de sistemas de ascensores em instalações de edifícios com isolamento de base, que surgem os seguintes objetivos:

- a descrição da ação sísmica e a sua forma de caracterização nas abordagens de cálculo de dimensionamento existentes;
- a abordagem do método de proteção sísmica pelo isolamento de base, breve introdução do seu conceito e apresentação da sua forma mais simplificada para sua consideração nos cálculos numéricos;
- uma breve exposição de sistemas de ascensores, do seu modo de funcionamento e dos seus elementos constituintes, dando especial atenção aos ascensores elétricos de tração;
- a abordagem da metodologia de dimensionamento sísmico e de instalação dos sistemas de ascensores segundo a EN 81-77:2018;
- a descrição de várias soluções técnicas de englobamento da caixa dos ascensores num edifício com isolamento de base;
- a proposta de uma série de expressões para a obtenção precisa da máxima aceleração em edifícios com isolamento base com diferentes tipologias estruturais, e uma proposta de cálculo simplificada de mais fácil uso;
- a realização do mapeamento de todo o país com a aceleração de cálculo, definida pela expressão simplificada proposta, assim como da categoria sísmica do ascensor.

1.3 Organização do Documento

A presente dissertação é composta por 5 capítulos e está organizada da seguinte forma:

- **Capítulo 1 - Introdução**

A presente introdução onde se apresenta o enquadramento geral e motivação que deram origem à realização desta dissertação, dos objetivos e da sua estrutura.

- **Capítulo 2 - Ação Sísmica e Isolamento de Base**

No capítulo 2 discrimina-se e caracteriza-se a ação sísmica, dando especial atenção à forma de caracterização por espectro de resposta. Faz-se uma explicação introdutória do método de proteção sísmica por isolamento de base, do seu conceito e dos tipos de isoladores de base, mencionando-se uma forma de modelação numérica dos aparelhos pela simplificação do seu comportamento a linear equivalente. Aborda-se o método de análise modal por espectro de resposta para um edifício com isolamento de base e as implicações que este tipo de edifício tem na adaptação da análise.

- **Capítulo 3 - Sistemas de Ascensores**

No terceiro capítulo faz-se uma breve exposição de sistemas de ascensores, do seu modo de funcionamento e dos seus elementos integrantes, dando especial atenção aos ascensores elétricos de tração. Aborda-se a metodologia de dimensionamento sísmico e de instalação de sistemas de ascensores segundo a EN 81-77:2018, discute-se a fórmula de cálculo proposta pela norma para o cálculo da aceleração sísmica a que o elemento é sujeito, do coeficiente de importância e comportamento do elemento, do dimensionamento e verificação do sistema de guias da cabine e do contrapeso, e menciona-se os dispositivos de detenção sísmica. No final deste capítulo aborda-se um conjunto de soluções técnicas, para a conciliação da caixa do elevador com o plano de isolamento de base dos edifícios.

- **Capítulo 4 - Estudo Paramétrico**

No quarto capítulo realiza-se um estudo paramétrico, com o principal objetivo de obter um conjunto de fórmulas que estima, à partida, a máxima aceleração sísmica sentida num edifício com isolamento de base. Faz-se a descrição do modelo numérico realizado, programado em *Python*, da análise modal por espectros de resposta, da definição da matriz rigidez genérica para os modelos realizados, do cálculo da resposta da estrutura, da combinação modal, das tipologias estruturais consideradas nos modelos, e do modo do funcionamento do algoritmo de cálculo utilizado no programa. Por forma a aferir-se o peso do efeito de todas as variáveis previstas, no valor final de aceleração máxima num edifício com isolamento de base, foi feito um estudo de sensibilidade, sendo dividido em duas partes, uma que avalia a designada amplificação espectral e outra que contabiliza a amplificação devido à contribuição do efeito dos modos superiores. São deduzidas um conjunto de fórmulas de cálculo da máxima aceleração num edifício com isolamento de base,

numa forma mais precisa e outra simplificada de mais fácil uso. No final elabora-se um mapeamento de todo o país com base nos valores da máxima aceleração, calculada com a fórmula simplificada, e da categoria sísmica do ascensor.

- **Capítulo 5 - Conclusões**

No último capítulo apresenta-se as principais conclusões desta dissertação e potenciais áreas a explorar em futuros trabalhos.

Capítulo 2

Ação Sísmica e Isolamento de Base

2.1 Ação Sísmica

2.1.1 Origem dos Sismos

Os sismos originam-se devido a uma colisão ou deslizamento interplacas, entre fronteiras das placas litosféricas oceânicas ou oceânica e continental, ou devido a falhas intraplacas, falhas activas no interior das placas litosféricas. Ao ponto de origem deste deslizamento súbito denomina-se de hipocentro, que encontra-se em profundidade, e a sua projeção à superfície é o epicentro. É libertada de forma súbita uma muito elevada quantidade energia devido a uma colisão desta natureza, parte desta energia é dissipada na falha pela deformação permanente do solo, e a outra parte é propagada sob a forma de ondas pela crosta terrestre. Esta propagação de ondas é a principal responsável pelos efeitos sísmicos nas estruturas, e é este o efeito que se tem em conta no dimensionamento.

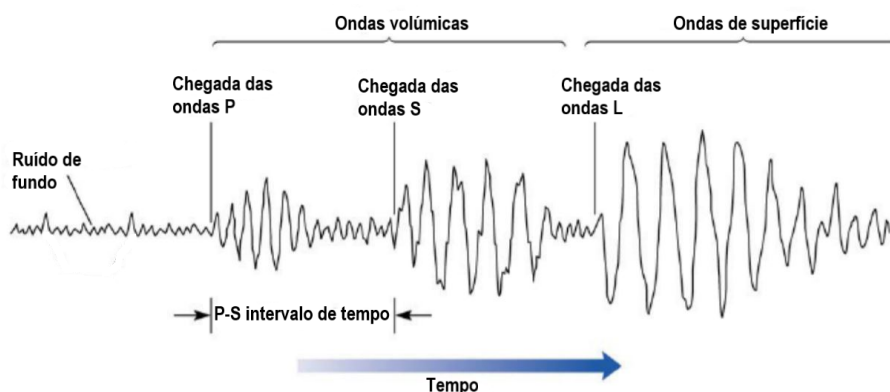


Figura 2.1: Acelerograma das ondas volúmicas e de superfície ao longo do tempo, adaptado de [4].

O efeito dinâmico do sismo e a sua propagação divide-se em dois tipos de ondas: ondas volúmicas e ondas de superfície, ilustrado na figura 2.1. São as ondas volúmicas as mais destrutivas e subdividem-se em ondas P e ondas S, as ondas P vibram o solo na direção da propagação e são as que se propagam com maior velocidade, enquanto as ondas S vibram o solo perpendicularmente à direção de propagação e propagam-se com uma velocidade de cerca de 60% das ondas P. Por se deslocarem a

uma velocidade consideravelmente superior, as ondas P, o tempo entre a sua chegada e a chegada das ondas S aumenta à medida que se afastam do epicentro do sismo. O comprimento das ondas S é maior do que das ondas P, pelo que estão associadas a baixas frequências. Há uma maior atenuação, com a distancia ao epicentro, da energia associada das ondas P em relação às ondas S. Conduzindo a que a distância ao epicentro do sismo de uma determinado zona, influencie a resposta das estruturas tendo em conta as suas frequências naturais.

2.1.2 Caracterização da Ação Sísmica

Geralmente, o sismo é classificado em função da sua intensidade ou magnitude. A intensidade mede o efeito do sismo sentido num certo sítio, esta depende da distância ao epicentro, da geologia do local e do tipo de construção, a magnitude é medida tendo em conta a quantidade de energia libertada no hipocentro. Estes parâmetros são importantes para caracterizar o fenómeno sísmico, mas não são suficientes para realizar análises de resposta das estruturas quando sujeitas a este tipo de evento. Por forma a se estudar a resposta sísmica das estruturas, esta ação deverá ser caracterizada de uma forma que possa ser integrada nas metodologias de análise estrutural que atualmente existem. Deste modo são três as formas possíveis de caracterização da ação sísmica que cumprem o requisito atrás apresentados [5]:

- Representação por série de acelerações (registo real ou gerado artificialmente);
- Representação através da Função de Densidade Espectral de Potência;
- Representação por Espectro de Resposta.

A representação sísmica através duma série de acelerações, é a forma mais direta de analisar o comportamento de uma estrutura quando sujeita a esta ação [5]. Esta consiste no registo ao longo do tempo das acelerações sísmicas num determinado local. O registo sísmico, é na verdade um conjunto de registos cujas características variam de acordo com a distância ao epicentro, ou conforme o tipo de solo onde se efetua o registo. Desta forma, a distância ao epicentro e a geologia local influenciam os valores de pico das acelerações e a duração do evento. Sendo que a verificação da segurança de uma estrutura não se pode fazer para um único registo mas para uma série deles. Devido à dificuldade de arranjar um número significativo de registo sísmicos para a simulação, recorre-se frequentemente a séries de acelerações artificiais, geradas de acordo com as características esperadas para a ação sísmica num determinado local.

A representação através da função de densidade espectral de potência, vulgarmente designada por Espectro de Potência, sendo uma forma muito completa de representação da ação sísmica, mas não é facilmente integrável na metodologia de análise existente, estando a sua utilização restringida a modelos com um pequeno número de graus de liberdade. É no entanto uma ferramenta essencial no processo de geração de séries de acelerações artificiais [5].

Por fim, a representação através por espectros de resposta constitui o exemplo mais divulgado de caracterização da ação sísmica, sendo utilizado na análise dinâmica do estudo paramétrico apresen-

tado no capítulo 4. Esta forma de representação, não reproduz a ação de forma direta, através de grandezas medidas diretamente ou através dos seus registos. É uma representação de efeitos sobre um conjunto de osciladores lineares de um grau de liberdade, com diferentes frequências próprias, com o mesmo valor de coeficiente de amortecimento. Sendo sujeitos a uma determinada ação sísmica, e determinado para cada oscilador, o valor máximo da referida grandeza para a ação sísmica determinada, como por exemplo, e mais comum, a aceleração absoluta. A representação gráfica do valor máximo da resposta de cada um destes osciladores em função da sua frequência própria, ou período, constitui o espectro de resposta elástico daquela ação sísmica para a grandeza em análise. A forma mais direta de obtenção do espectro de resposta relativo a uma determinado registo sísmico envolve o cálculo da resposta dinâmica ao longo do tempo, dum conjunto de osciladores, retendo-se, para cada um deles, o valor máximo da grandeza que se pretende representar no espectro.

2.1.3 Espectro de Resposta da Ação Sísmica

Os espectros de resposta regulamentares são curvas idealizadas, que não representam a resposta de osciladores a qualquer ação sísmica específica. O objetivo é estabelecer valores máximo de resistência que as estruturas de uma determinada região devem apresentar de acordo com a sismicidade desse local, [5]. A influência da sismicidade do local faz-se sentir na forma do espectro. Na atual regulamentação, Eurocódigo 8 [2], são previstos dois tipos de ação sísmica, sendo uma delas, ação tipo 1, representativo de um sismo de magnitude elevada com epicentro na região Atlântica, e outro, ação tipo 2, que representa uma ação com características de um sismo de magnitude moderada com epicentro no território Continental ou no Arquipélago dos Açores. Ilustra-se na figura 2.2 a título de exemplo o espectro de resposta elástico para a zona de Lisboa para os dois tipos de ação sísmica (Solo Tipo B, classe de importância II e coeficiente de amortecimento de 5%).

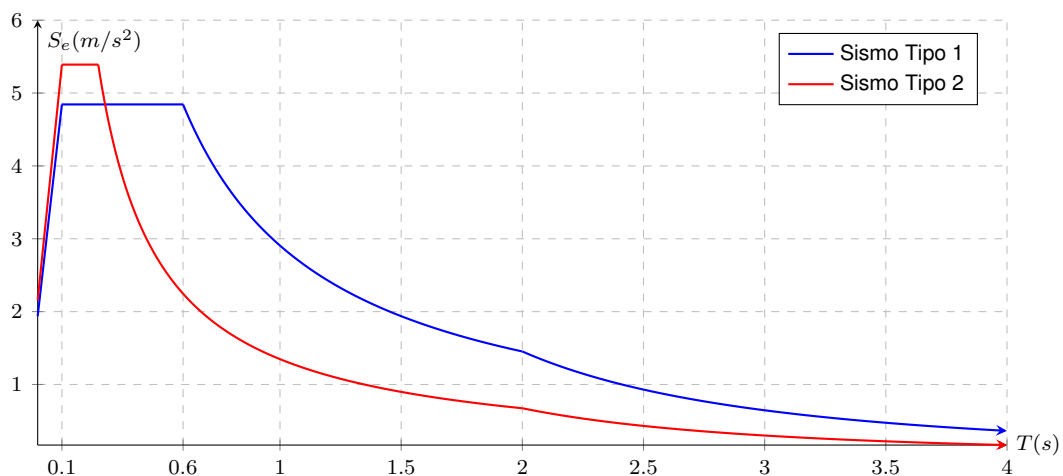


Figura 2.2: Espectro de resposta elástico: Sismo Tipo 1 e Sismo Tipo 2.

A definição do espectro de resposta elástico, é feita em função do valor de pico da aceleração de solo, valor este a definir de acordo com a sismicidade do local, e de um conjunto de valores de período de referência (T_B , T_C e T_D) que permitem adaptar a forma do espectro. Estes valores de período

permitem adaptar o modelo geral do espectro, de modo a representar o efeito de diferentes tipos de solo ou de diferentes tipos de ação sísmica. De acordo com o Eurocódigo 8, os espectros de resposta elástico são definidos pelas seguintes expressões 2.1.

$$\begin{cases} 0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right] \\ T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \\ T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \frac{T_C}{T} \\ T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = a_g \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \frac{T_C T_D}{T^2} \end{cases} \quad (2.1)$$

Em que:

- $S_e(T)$, é o espectro de resposta elástica;
- a_g , é o valor de cálculo da aceleração à superfície para um terreno do tipo A;
- S , é o coeficiente de solo;
- η , é o coeficiente de correção do amortecimento, com valor de referência $\eta = 1$ para 5% de amortecimento viscoso, calculado pela expressão 2.2.

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55 \quad (2.2)$$

Os valores dos períodos de referência são tabelados pelo EC8 de acordo com o tipo de ação sísmica e o tipo de solo, estes limitam as diferentes zonas do espectro de resposta com determinadas características específicas. Estas características impostas ao espectro de resposta correspondem a um conjunto de propriedades que se verificam, de forma aproximada, na maioria dos espectros de resposta reais [6].

2.1.4 Aceleração de Referência e Período de Retorno

Na atual regulamentação, Eurocódigo 8, os valores de aceleração máxima de referência são definidos para cada zona e para cada tipo de ação. Os valores são associados a uma probabilidade máxima de excedência, P_{NCR} , de 10% em 50 anos, valor assumido pelo regulamento para a vida útil de uma estrutura, o que equivale a um período médio de retorno, T_{NCR} , de 475 anos.

A probabilidade de um determinado valor da ação não ser excedido num período de um ano é G_{annual} . Sendo que o período de retorno define-se como o inverso da probabilidade anual de excedência, $1 - G_{annual}$, seguindo as equações 2.3, 2.4 e 2.5 chega-se que o cálculo do período médio de retorno é obtido na forma da equação 2.6 [6].

$$G_{50anos} = [G_{annual}]^{50} \quad (2.3)$$

$$P_{NCR} = 1 - G_{50anos} = 1 - [G_{annual}]^{50} \quad (2.4)$$

$$G_{annual} = \sqrt[50]{1 - P_{NCR}} \quad (2.5)$$

$$T_{NCR} = \frac{1}{1 - G_{annual}} = \frac{1}{1 - \sqrt[50]{1 - P_{NCR}}} \quad (2.6)$$

Da aqui se conclui que a definição de um período de retorno de referência está relacionada com a probabilidade de excedência associada a um determinado período de vida útil da estrutura.

Na definição da sismicidade de uma determinada zona são feitos estudos de perigosidade sísmica que permitem calcular os valores de aceleração associados a cada um dos períodos de retorno. No Eurocódigo 8 a taxa anual de excedência descreve a perigosidade sísmica em função da aceleração de pico no solo, pela expressão 2.7 [6].

$$H(a_{gR}) = k_0 a_{gR}^{-k} \quad (2.7)$$

Em que k_0 é um fator multiplicativo e o expoente k depende da sismicidade regional e do cenário sísmico considerado. Podendo descrever a expressão anterior em termos de período de retorno chegando á equação .

$$T_R = \frac{1}{H(a_{gR})} = \frac{1}{k_0} a_{gR}^k \quad (2.8)$$

De acordo com o Eurocódigo 8 o valor de cálculo da aceleração à superfície de dimensionamento é obtido através da seguinte expressão:

$$a_g = a_{gR} \gamma_I \quad (2.9)$$

Onde γ_I é o coeficiente de importância do edifício e a_{gR} é a aceleração máxima de referência. O EC8 divide os edifícios em quatro classes de importância, onde cada depende das consequências do colapso em termos de fatalidades, da importância para a segurança pública e para a proteção civil imediatamente após o sismo e das consequências sociais e económicas do colapso [6]. As classes de importância são caracterizadas por valores diferentes do coeficiente de importância. A cada classe de importância é associado um coeficiente que é implícito a um determinado período médio de retorno da ação sísmica. Como mencionado a ação sísmica de referência corresponde a um período médio de retorno de 475 anos, que tem correspondência a um edifício de classe de importância II ou seja tem um coeficiente de importância unitário. Sendo os restantes coeficientes de importância associados às classes de importância I, III e IV correspondem a períodos de retorno de 243, 821 e 1303 anos respectivamente. Um maior período de retorno implica um maior valor de aceleração de dimensionamento, garantindo assim uma maior fiabilidade estrutural a edifícios de importância maior.

2.1.5 Influência do Tipo de Solo

Para quantificar o espectro de resposta num dado local, é necessário ter em conta a influência das condições locais do terreno na ação sísmica. O Eurocódigo 8 contabiliza 5 tipos de solo na análise por espectros de resposta, A, B, C, D e E, em que cada tipo de solo é definido pelo valor da velocidade

média de propagação das ondas de corte no solo. Nesta forma de caracterizar a ação sísmica a influência do tipo de solo manifesta-se nos valores dos períodos de referência e no valor do coeficiente de solo, S . Sendo apenas o solo tipo D o que apresenta valores distintos dos restantes, em ambas as ações sísmicas, nos valores a adotar dos períodos de referência.

O parâmetro S multiplica a aceleração de cálculo à superfície de dimensionamento, o que na prática traduz a transformação da aceleração de referência, que é definida para um solo tipo rocha, tipo A, na aceleração para outros tipos de solo. Este parâmetro deve traduzir a maior ou menor amplificação dinâmica do movimento sísmico do solo, em função das características de cada tipo de solo.

Como o solo tem um comportamento dinâmico não linear a amplificação dinâmica depende não só das características elásticas do solo mas também da intensidade da ação sísmica a que está sujeita. É por este motivo que o parâmetro S , para um determinado tipo de solo varia em função do valor de aceleração a que está sujeito. De acordo com o EC8 a forma de cálculo deste coeficiente segue as seguintes expressões 2.10.

$$\begin{cases} a_g \leq 1m/s^2 : S = S_{max} \\ 1m/s^2 < a_g < 4m/s^2 : S = S_{max} - \frac{S_{max}-1}{3}(a_g - 1) \\ a_g \geq 4m/s^2 : S = 1 \end{cases} \quad (2.10)$$

Onde S_{max} é o parâmetro definido no anexo nacional do EC8, valores referidos tabela 2.1 de acordo com o tipo de terreno a considerar.

Tabela 2.1: Valores de S_{max} , retirado do EC8 [2].

Tipo de terreno	S_{max}
A	1,0
B	1,35
C	1,6
D	2,0
E	1,8

2.2 Isolamento Sísmico de Base

2.2.1 Introdução

O conceito de isolamento de base nasceu há mais de 100 anos atrás, mas só nos anos mais recentes é que se tornou numa estratégia prática como sistema de proteção sísmica. Que consiste na introdução de uma camada horizontal de baixa rigidez horizontal entre a superestrutura e a base (fundação ou subestrutura), constituída por aparelhos de isolamento de base, de onde resulta numa separação parcial do movimento da estrutura relativamente ao movimento do solo, sendo desta forma reduzida a transmissão das acelerações horizontais do solo à estrutura. Esta é uma técnica muito eficaz na redução da vulnerabilidade sísmica de edifícios de importância diferenciada, como edifícios

hospitales e de maior valor social e económico, onde se procura assegurar a operacionalidade após um sismo.

Com o intuito de se exemplificar o efeito do isolamento sísmico na reposta dinâmica das estruturas dos edifícios apresenta-se na figura 2.3, de forma esquemática, uma comparação do padrão de deformação entre um edifício de base fixa, à esquerda, e de um edifício isolado, à direita, durante a ocorrência de um sismo. Os deslocamento num edifício de base fixa são caracterizados pelo elevado grau de deformação ao nível dos pisos, que sobrecarrega os elementos estruturais de uma forma mais exigente. Numa estrutura isolada, os deslocamentos laterais concentram-se ao nível do plano isolado, nos aparelhos isoladores, sendo que a superestrutura não sofre deformações significativas, apresentando um comportamento assimilável ao de um corpo rígido.

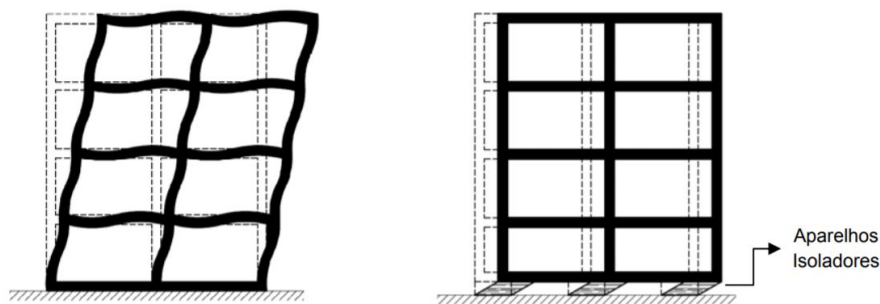


Figura 2.3: Resposta esquemática de uma estrutura de base fixa e de base isolada sujeito a ação sísmica, retirado de [7].

Apesar dos inúmeros tipos de isolamento de base, estes são baseados nos mesmos conceitos. Ao ser introduzido uma camada de baixa rigidez entre a superestrutura e a fundação, o edifício torna-se mais flexível passando a ter um período fundamental muito mais longo comparando com o seu período fundamental de base fixa. Outro aspecto, consiste no aumento considerável do nível de amortecimento devido ao comportamento de histerese dos aparelhos isoladores. Na figura 2.4, é ilustrado o espectro de resposta de acelerações e deslocamentos, para um nível de amortecimento da superestrutura, a traço contínuo, e um nível de amortecimento equivalente ao do sistema de isolamento, a tracejado, onde se observa a representação esquemática das principais mudanças provocadas pelo aumento da flexibilidade da estrutura e do seu nível de amortecimento. Isto resulta num decréscimo significativo das acelerações a que a superestrutura é sujeita, mas em contrapartida há um aumento dos deslocamentos totais da estrutura, sendo concentrados ao nível do plano de isolamento de base, com a vantagem das deformações relativas entre pisos da superestrutura reduzirem significativamente.

Como se observa na figura, os valores de aceleração para uma gama de períodos de 0.2 a 0.6 s correspondem a valores críticos, patamar do espectro de resposta. Por esse motivo, as estruturas cujo período fundamental de vibração esteja compreendido, entre 0.1 s e 1 s, são mais vulneráveis à ação sísmica, pelos valores da frequência da ação sísmica com maior amplitude serem próximos aos da frequência própria da estrutura conduzindo ao fenómeno de ressonância, sendo esta a gama de períodos fundamentais compreendidos pelas superestruturas de edifícios com isolamento de base correntes. Deste modo, conclui-se que o aumento do período fundamental da estrutura, conseguido com a introdução de um sistema de isolamento de base, irá provocar a redução da amplitude de aceleração

horizontal na estrutura. Por outro lado, o aumento do período fundamental da estrutura aumenta a amplitude dos deslocamentos entre a superestrutura e o solo, sendo necessário garantir um espaço livre que lhe possibilite esse movimento sem ocorrer o risco de embater com na sua envolvente exterior.

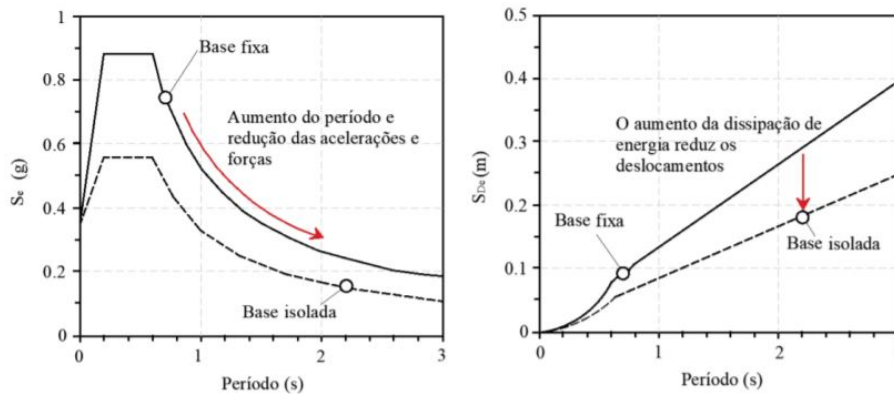


Figura 2.4: Representação do espectro de resposta de acelerações e deslocamentos, relativo a uma dada ação sísmica, para diferentes valores de coeficiente de amortecimento, retirado de [8].

A mudança no valor do período próprio da estrutura pela introdução do sistema de isolamento de base é uma das principais medidas de eficácia do sistema, ou seja, a razão entre o período isolado e o período de base fixa ($T_{isolado}/T_{fixo}$). No geral é de esperar que esta razão se encontre compreendida entres valores de 3 a 4, e quanto maior for este quociente maior será a eficácia do sistema de isolamento. No que toca ao período isolado, este é considerado como óptimo em valores de cerca de 2s [9], sendo que geralmente este esteja compreendido no intervalo entre 2 a 3s.

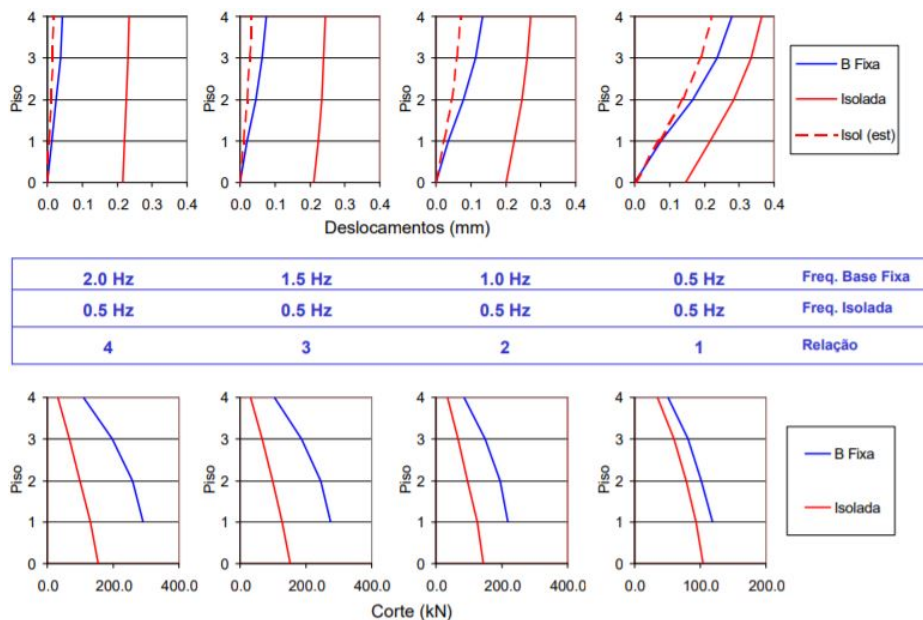


Figura 2.5: Influência da relação de períodos na eficácia do comportamento da estrutura com isolamento, retirado de [10].

Ilustra-se na figura 2.5 para várias razões entre períodos de base isolada e de base fixa, a comparação dos deslocamentos absolutos e força de corte entre estruturas com isolamento de base e a respetiva estrutura considerando-a de base fixa, e a tracejado representa os deslocamentos da solução isolada,

deduzidos da deformação dos isoladores.

Como exemplificado na figura 2.5, em edifícios de base isolada para valores da relação entre o período da estrutura isolada e o período da estrutura com base fixa superiores a 3, a estrutura isolada comporta-se identicamente a um corpo rígido, que conduz a uma redução significativa dos esforços na superestrutura. Já para valores inferiores da relação a deformação da estrutura isolada tem uma configuração semelhante à da deformação da estrutura sem isolamento e os esforços permanecem quase inalterados.

2.2.2 Tipos de Sistemas de Isolamento

O efeito de isolamento sísmico depende primeiramente da escolha do tipo de isoladores a usar. Sendo que o conhecimento das suas características é essencial para uma escolha fundamentada. Atualmente existem várias tipologias de isoladores de base, sendo que se destacam os apoios elastoméricos e os apoios deslizantes. Dos apoios elastoméricos salienta-se os apoios de borracha de alto amortecimento (*High Damping Rubber Bearings* - HDRB) e os apoios de borracha com núcleo de chumbo (*Laminated Rubber Bearing* - LRB). Dos apoios deslizantes distingue-se o apoio pendular com atrito (*Friction Pendulum System* - FPS). Os apoios de borracha tipo HDRB são os que tem vindo a ser mais utilizados, mas o uso dos pendulares com atrito tem aumentado nos últimos tempos.

Uma das vantagens dos apoios elastoméricos é que apresentam requisitos mínimos de manutenção, em relação a outras alternativas, por não possuírem componentes expostas a condições propícias à corrosão nem serem constituídos por partes moveis, que necessitam de trabalhos de manutenção significativos durante toda a vida útil do edifício.

Um sistema de isolamento de base deve ter as seguintes características [10]:

- Capacidade de suporte;
- Baixa rigidez horizontal;
- Capacidade de dissipação de energia;
- Capacidade de restituição à posição inicial.

O sistema de isolamento de base tem a função primária de conferir suporte à superestrutura, e em simultâneo, promove uma elevada flexibilidade horizontal. O nível de amortecimento é importante, pois um maior amortecimento induz a menores deslocamentos, onde os isoladores e as ligações flexíveis ao exterior terão de acomodar um deslocamento menor e o mesmo para o espaço livre, as juntas, entre a superestrutura e a envolvente exterior.

Apoios de Borracha de Alto Amortecimento (HDRB)

Os apoios de borracha de alto amortecimento são constituídos por camadas finas de borracha, elastómeros, intercaladas por chapas de aço dispostas horizontalmente, onde a ligação é feita por vulcanização [7]. As chapas de aço reduzem a expansão lateral das camadas de borracha, aumentando

a sua rigidez vertical, sem aumentar significativamente a rigidez de corte, ou seja, a sua flexibilidade a deformações laterais.

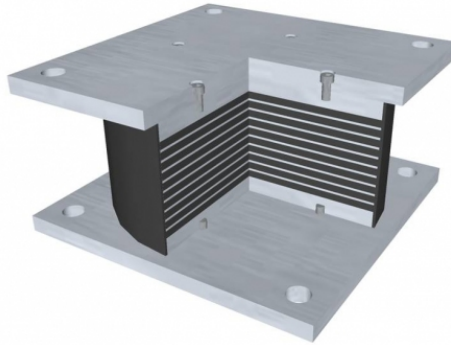


Figura 2.6: HDRB, retirado de [11].

Estes apoios são caracterizados por terem uma baixa rigidez horizontal, e uma elevada rigidez vertical, o que proporciona uma boa capacidade de suporte, boa capacidade de dissipação de energia e de acomodar deformações horizontais de até duas vezes a sua altura em borracha, distorções na ordem dos 200%. São normalmente de secção circular, exemplo figura 2.6, mas também poder ser fabricados com secção quadrangular ou retangular.

O módulo de distorção e o amortecimento são propriedades da borracha de alto amortecimento que variam consoante o grau de deformação e a temperatura a que o material está sujeito. Dependendo da mistura utilizada, os aparelhos podem apresentar valores do módulo de distorção entre os 0,4 e 1,4 MPa e o coeficiente de amortecimento valores entre os 10 e 15% [12].

Estes apoios apresentam um comportamento não-linear, ilustrado na figura 2.7, tendendo a sua rigidez a aumentar quando sujeitos a grandes deformações, onde se identificam três patamares de rigidez distintos. Este apresenta um valor inicial elevado de rigidez horizontal que diminui bruscamente com o aumento da deformação, atingindo um patamar de variação aproximadamente constante, até que volta novamente a aumentar, de forma suave, para distorções da ordem dos 200% [7]. Para a gama de distorções entre os 50 e 150%, onde se enquadra usualmente a deformação máxima de projeto dos isoladores, a rigidez de forma aproximada mantém-se constante [7].

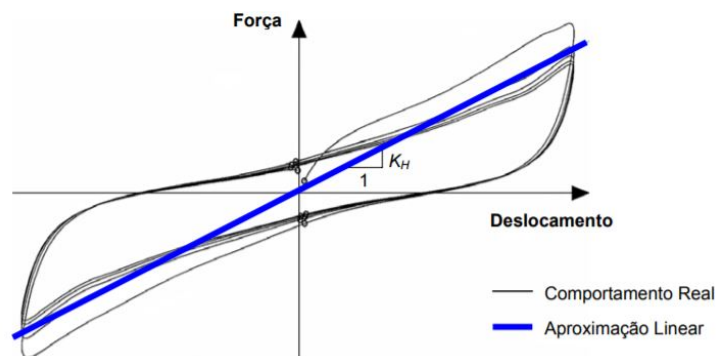


Figura 2.7: Relação força–deslocamento linear equivalente dos apoios HDRB, retirado de [7].

O mecanismo de dissipação de energia mantém-se constante, para pequenas e grandes deformações,

e é caracterizado por ciclos suaves de histerese, que são derivados do facto da borracha de alto amortecimento apresentar um comportamento diferente na fase de carregamento e descarregamento, observado na figura 2.7. E a quantidade de energia dissipada histereticamente é definida pela área interior dos ciclos característicos da relação força-deslocamento.

A aproximação da relação entre a força e deslocamento presente nos apoios HDRB, quando sujeitos a ações cíclicas de corte, aproxima-se ao modelo linear representado na figura 2.7, que depende somente da definição da rigidez horizontal equivalente dos aparelhos. A deformação total de um apoio de borracha é definido pelo somatório das deformações de corte que ocorrem em todas as camadas de elastómero. Sendo a aproximação linear da rigidez horizontal do apoio dada pela equação 2.11 [13].

$$K_H = \frac{G \cdot A}{h_{el}} \quad (2.11)$$

- G , é o módulo de distorção;
- A , é a área em planta do bloco;
- h_{el} , é a soma das espessuras das várias camadas de elastómero.

Apoios de Borracha com Núcleo de Chumbo (LRB)

Os apoios de borracha com núcleo de chumbo, LRB, são muito semelhantes aos HDRB com a diferença de ser inserido um cilindro de chumbo no centro do bloco de borracha e serem compostos por um elastómero de baixo amortecimento, exemplo figura 2.8. A adição do núcleo de chumbo serve para fornecer um meio adicional de dissipação de energia que permite alcançar um coeficiente de amortecimento de cerca de 30%. Devido ao elevado coeficiente de amortecimento, é possível reduzir o deslocamento horizontal, em comparação com um sistema de isolamento com a mesma rigidez horizontal equivalente.

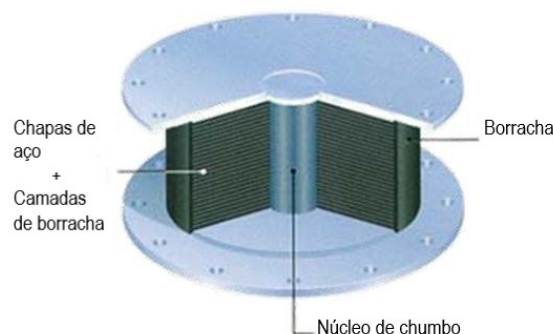


Figura 2.8: LRB, adaptado de [11].

Os elastómetros normalmente utilizados na produção de LRB são caracterizados por um módulo de distorção, G , entre 0,4 a 0,6 MPa mas também podem ser compostos por elastómetros com valores mais elevados de G de até 1,4 MPa [12].

O comportamento destes aparelhos resulta da união do elastômero de baixo amortecimento, elemento com comportamento linear, com o chumbo, elemento com comportamento elasto-plástico quando submetido ao corte. Simplificadamente, as camadas de borracha de elastômero têm como função suportar as cargas verticais, conferir a flexibilidade horizontal e auferir a capacidade de restituição à posição inicial, enquanto o núcleo de chumbo é responsável pela dissipação da energia de vibração.

A dissipação de energia deve-se exclusivamente ao comportamento histerético dos aparelhos. A relação força–deslocamento típica desses aparelhos, exemplificada na figura 2.9, onde é possível verificar a não linearidade característica destes dispositivos. Contudo, a aproximação do seu comportamento a um modelo de comportamento bilinear, mostra-se bastante adequada dado que permite, de forma simplificada, descrever o funcionamento destes apoios sem incorrer em erros significativos [7].

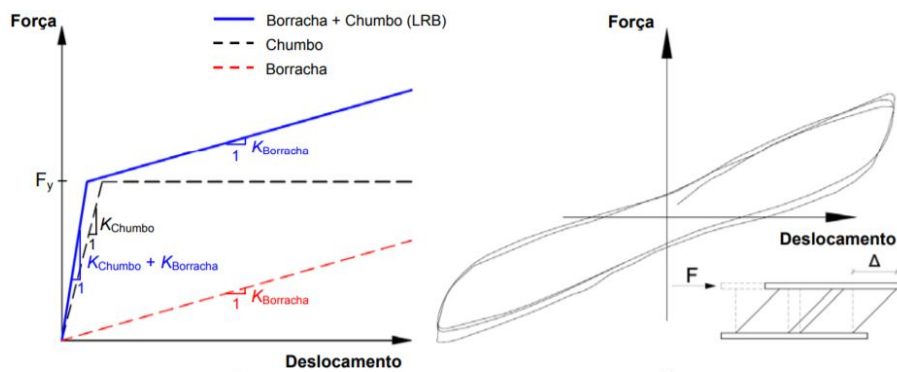


Figura 2.9: Força-Deslocamento LRBB, retirado de [7]

Estes aparelhos são caracterizados por uma rigidez inicial (pré-plastificação) bastante elevada, para pequenas deformações, que se deve principalmente ao comportamento elástico do núcleo de chumbo. O segundo patamar de rigidez ocorre após a plastificação do núcleo de chumbo, levando o apoio a apresentar uma rigidez bastante mais reduzida, conferida exclusivamente pela rigidez lateral das camadas de borracha de baixo amortecimento. O comportamento mecânico de um apoio elastomérico com núcleo de chumbo, submetido a carregamentos de corte, é dado por dois patamares de rigidez horizontal completamente distintos, ver figura 2.10.

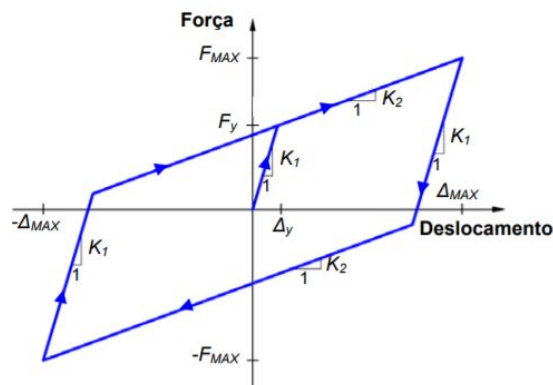


Figura 2.10: Definição do modelo bilinear de aproximação ao comportamento do apoio LRB, retirado de [7].

O comportamento não linear característico dos apoios LRB pode-se distinguir entre uma fase elástica e uma fase plástica, ou seja, entre a fase em que o núcleo de chumbo responde elasticamente ou plasticamente. A rigidez horizontal de pré-plastificação do apoio, K_1 , também denominada por rigidez inicial ou rigidez elástica, é conseguida essencialmente pelo núcleo de chumbo existindo, no entanto, uma pequena contribuição por parte do elastómero. Esta rigidez pode ser determinada através da seguinte expressão 2.12 [7].

$$K_1 = K_{chumbo} + K_{Elastómero} = \frac{G_{chumbo} \cdot A_{chumbo}}{h_{chumbo}} + \frac{G_{Elastómero} \cdot A_{Elastómero}}{h_{Elastómero}} \quad (2.12)$$

- G_{chumbo} , módulo de distorção do chumbo;
- A_{chumbo} ; área transversal do núcleo de chumbo;
- h_{chumbo} , altura do núcleo de chumbo;
- $h_{Elastómero}$, é a soma das espessuras das várias camadas de elastómero.

Como se pode verificar através da figura 2.10, a participação do núcleo de chumbo é sentida principalmente nos troços de carga e descarga do apoio, sendo que nos restantes troços a rigidez horizontal do dispositivo é igual à rigidez do elastómero de baixo amortecimento. Deste modo, a rigidez pós-plastificação do apoio LRB, K_2 , é definida pela equação 2.11.

Apoios Pendulares com Atrito (FPS)

Os apoios pendulares com atrito são compostos por dois elementos de aço sobrepostos, ilustrado na figura 2.11. Um dos elementos apresenta no seu interior uma superfície polida côncava, sobre esta superfície desliza a outra peça contendo uma ponta de aço com a extremidade articulada e revestida por teflon ou por outro material compósito com baixo coeficiente de atrito e elevada capacidade de suporte, fazendo-o descrever movimentos pendulares de pequena amplitude [7].

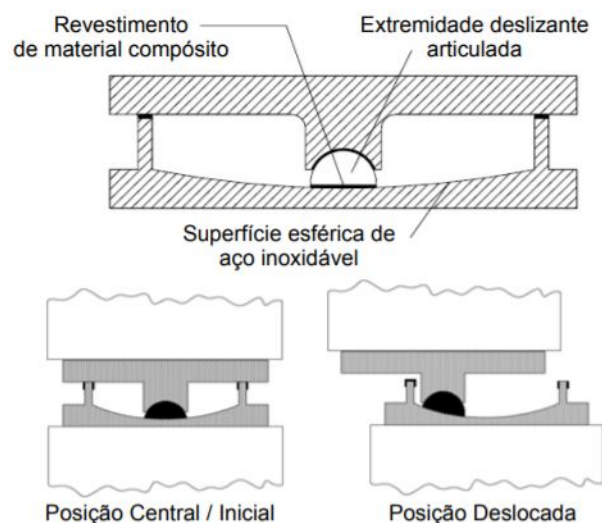


Figura 2.11: Identificação dos componentes principais de um apoio FPS e movimentação do aparelho, retirado de [7].

A dissipação de energia é proporcionada pelo atrito existente entre as superfícies deslizantes, e a capacidade de restituição é proporcionada pela curvatura da superfície deslizante.

O valor da rigidez lateral dos apoios FPS é directamente proporcional ao peso que suportam, o que resulta numa vantagem importante para os sistemas de isolamento constituídos por estes dispositivos, que consiste na minimização dos efeitos de torção da estrutura isolada.

Tal como a maioria dos apoios utilizados para isolar sismicamente as estruturas de edifícios, os apoios FPS demonstram um comportamento não linear relativamente a carregamentos horizontais.

Este comportamento pode ser compreendido, através da figura 2.12, como o resultado da sobreposição do funcionamento linear de um pêndulo simples com o comportamento de atrito de um bloco actuado lateralmente sobre uma superfície planar.

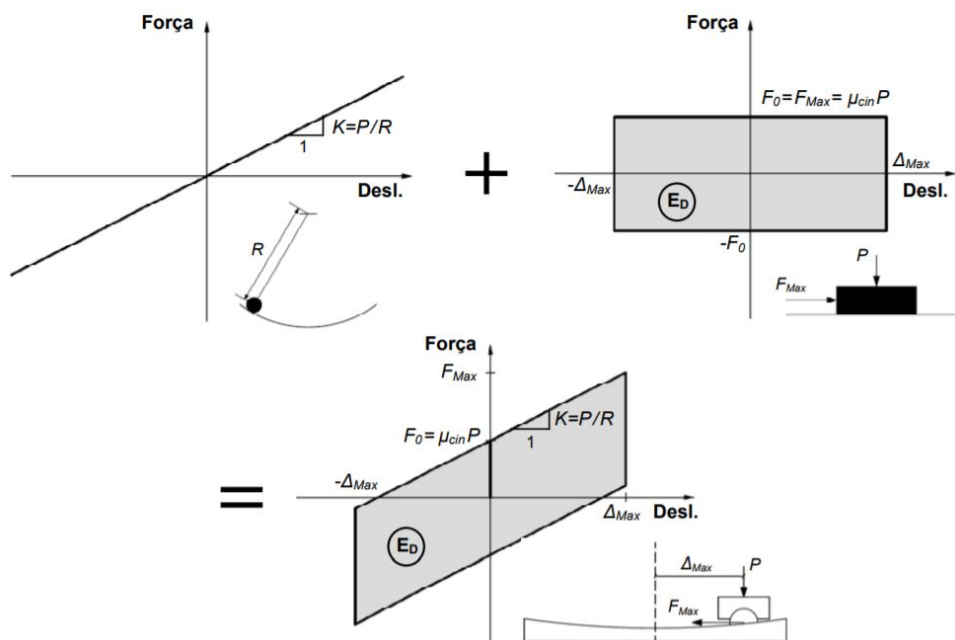


Figura 2.12: Identificação dos componentes principais de um apoio FPS e movimentação do aparelho, retirado de [7].

O funcionamento de um apoio FPS subdivide-se entre a fase estática e a fase dinâmica. A primeira compreende o momento em que a força desenvolvida no apoio não é suficiente para vencer o atrito estático e despoletar o movimento pendular do apoio. A partir do momento em que a força de atrito estática é excedida, o apoio atinge a fase dinâmica ou de deslizamento, onde se promove a sobreposição do efeito de geração da força de atrito e do desenvolvimento da força de restituição. A rigidez lateral do apoio FPS, que promove a geração da força de restituição do sistema de isolamento, é traduzida por:

$$K = \frac{P}{R} \quad (2.13)$$

- P , é a carga vertical suportada pelo apoio;
- R , é o raio de curvatura da superfície esférica.

Após se atingir uma força lateral superior à força de atrito estática, o movimento do apoio é iniciado

e a rigidez lateral passa a corresponder à rigidez definida na equação 2.13.

2.2.3 Modelo Linear Equivalente

Modelos lineares equivalentes de sistemas com comportamento não linear é uma simplificação comum em engenharia sísmica, e em particular na modelação de sistemas de isolamento [14]. Os aparelhos de apoio de borracha de alto amortecimento (HDRB) podem ser simulados através de modelos elásticos lineares, enquanto que os sistemas com núcleo de chumbo (LRB) tendo um comportamento bilinear também o podem ser de forma aproximada. Para sistemas de isolamento como os do tipo pendular com atrito (FPS), é necessário recorrer à análise no domínio do tempo [10], sendo possível, de forma aproximada, considerar um modelo linear equivalente.

O objetivo da linearização é obter uma aproximação próxima, ou pelo menos conservativa, do comportamento não-linear do sistema de isolamento, ao passo que se usa uma análise simplificada [14]. Esta forma de abordagem é enquadrado no capítulo 10 do EC8-1 [2].

Em geral, o modelo do sistema de isolamento linear equivalente é especificado tendo em conta duas propriedades: a rigidez horizontal efetiva, K_{eff} , e o amortecimento viscoso equivalente, amortecimento efetivo ξ_{eff} . A rigidez efetiva toma o valor secante da rigidez relativa ao deslocamento de cálculo total d_{db} , e o valor do sistema é a soma das rigidezes efetivas dos isoladores. O amortecimento efetivo traduz a dissipação de energia do sistema de isolamento, e é expressa a partir da energia dissipada ciclicamente com uma frequência no intervalo das frequências próprias dos modos considerados, sendo que para os modos mais elevados fora desse domínio, o coeficiente de amortecimento modal da estrutura deverá ser o de uma superestrutura de base fixa [8]. O cálculo de ξ_{eff} pode ser obtido pela expressão 2.14, [14] e [15].

$$\xi_{eff} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{So}} \quad (2.14)$$

- E_D , é a energia dissipada num ciclo histerético;
- E_{So} , é a energia de deformação correspondente ao deslocamento máximo, d_{db} , e à rigidez efetiva, obtido pela equação 2.15.

$$E_{So} = \frac{K_{eff} d_{db}^2}{2} \quad (2.15)$$

Este método de análise estrutural linear, descrito pelo EC8, considera duas translações dinâmicas horizontais, às quais sobrepõe os efeitos estáticos de torção. Considera que a superestrutura é um sólido rígido em translação acima do sistema de isolamento, considerando que o movimento de torção em torno do eixo vertical poderá ser desprezado na avaliação da rigidez horizontal efetiva e na análise linear se, em cada umas das duas duas direções horizontais principais, a excentricidade total entre o centro de rigidez do sistema de isolamento a projeção vertical do centro de massa da superestrutura, não for superior a 7,5% do comprimento da superestrutura transversalmente à direção horizontal considerada. Sendo definido um período de translação efetivo pela equação 2.16, que depende da massa total da superestrutura, incluindo a massa da base, e da rigidez efetiva horizontal.

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{eff}}} \quad (2.16)$$

Refere-se também, que o uso deste tipo de análise tem que obedecer às seguintes condições:

- a distância entre o local e a falha potencialmente ativa mais próxima para uma magnitude $M_s \geq 6,5$, é superior a 15km;
- a maior dimensão em planta da superestrutura não é superior a 50m;
- a subestrutura é suficientemente rígida para minimizar os efeitos dos deslocamentos diferenciais do terreno;
- todos os dispositivos estão localizados acima dos elementos da subestrutura que suportam as cargas verticais;
- o período efetivo satisfaz a expressão 2.17.

$$3T_f \leq T_{eff} \leq 3s \quad (2.17)$$

O regulamento estipula mais uma série de condições a satisfazer para o uso da análise simplificada que se encontrando mencionado no parágrafo (4) do ponto 10.9.3 do EC8-1 [2], omitindo-se no presente texto por serem de relevância reduzida para o trabalho desenvolvido no capítulo 4.

2.2.4 Análise Modal

A simplificação do sistema de isolamento como linear equivalente conduz à possibilidade da adoção de uma análise modal. A utilização desta análise para o cálculo da resposta sísmica de estruturas com isolamento de base levanta um problema devido à discrepância entre os níveis de amortecimento para os diferentes elementos estruturais.

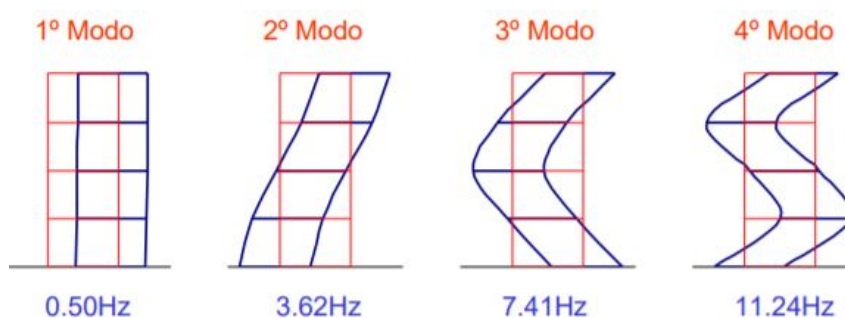


Figura 2.13: Modos de vibração de uma estrutura isolada, retirado de [10].

Na figura 2.13 onde se exemplifica a configuração modal dos primeiros 4 modos de um edifício com isolamento de base com 4 pisos, é possível observar que o primeiro modo deforma-se essencialmente pela deformação da base, e os restantes pela deformação da superestrutura e também é associada alguma deformação no sistema de isolamento. Assim, admite-se que no modo fundamental

de vibração onde a deformação do isolamento de base é predominante, e a deformação da estrutura é insignificante, associa-se o amortecimento efetivo do sistema de isolamento. Nos restantes modos, conseguidos essencialmente pela deformação dos pisos, associa-se o amortecimento da estrutura. Contudo, caso a deformação da estrutura no modo fundamental seja considerável, a resposta da estrutura não está representada de forma adequada. Note-se que, para os modos superiores, a opção de considerar o amortecimento relativo à estrutura é conservativo, pois assume-se uma dissipação de energia mais baixa do que aquela que a deformação do sistema de isolamento de base garante.

Para se conseguir considerar, simultaneamente, a estrutura de betão e os dispositivos de isolamento com alto amortecimento a solução é utilizar-se um espectro de resposta modificado equivalente. Este espectro deve reunir valores espectrais correspondentes ao amortecimento do isolamento e valores espectrais relativos ao amortecimento estrutural. Ilustra-se na figura 2.14 um exemplo da adaptação do espectro de resposta, com um espectro calculado tendo em conta o amortecimento da estrutura e outro reduzido considerando o amortecimento efetivo do sistema de isolamento.

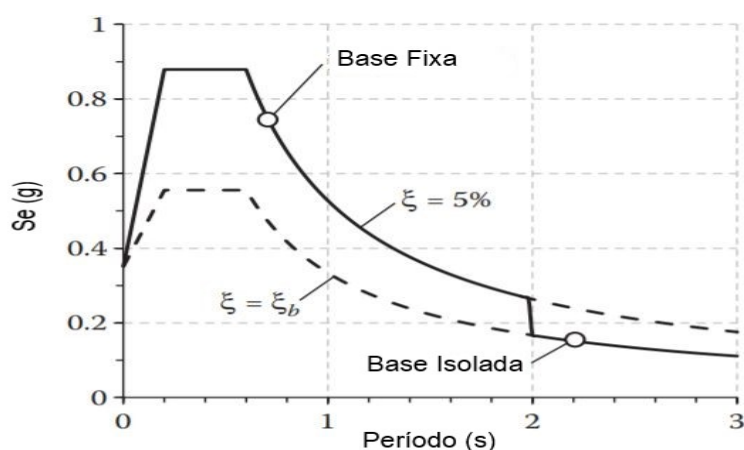


Figura 2.14: Espectro corrigido para análise por espectro de resposta de estruturas isoladas, adaptado de [14].

Geralmente, para a análise de estruturas isoladas não é dada grande relevância aos modos superiores, por estes terem um fator de participação modal muito inferior ao do primeiro modo. A não contabilização destes, mesmo na avaliação de elementos não estruturais, leva a uma avaliação imprecisa dos riscos associados a componentes caracterizados por períodos baixos [16]. O comportamento não linear, resultante do sistema de isolamento, tem uma maior eficácia na redução do período de vibração do primeiro modo, sendo que os modos superiores são muito menos afetados pelo efeito do sistema de isolamento.

Na figura 2.15, ilustra-se um exemplo de 3 estruturas isoladas, com 4, 8 e 12 pisos, onde é medida o valor da razão entre período de base isolada e o período correspondente a ter base fixa, para cada modo [16].

Pode-se observar, que na prática o modo fundamental, nos 3 casos expostos, é o único que sofre uma mudança considerável desta razão em análise, enquanto que os modos superiores permanecem na prática estacionados numa relação praticamente unitária.

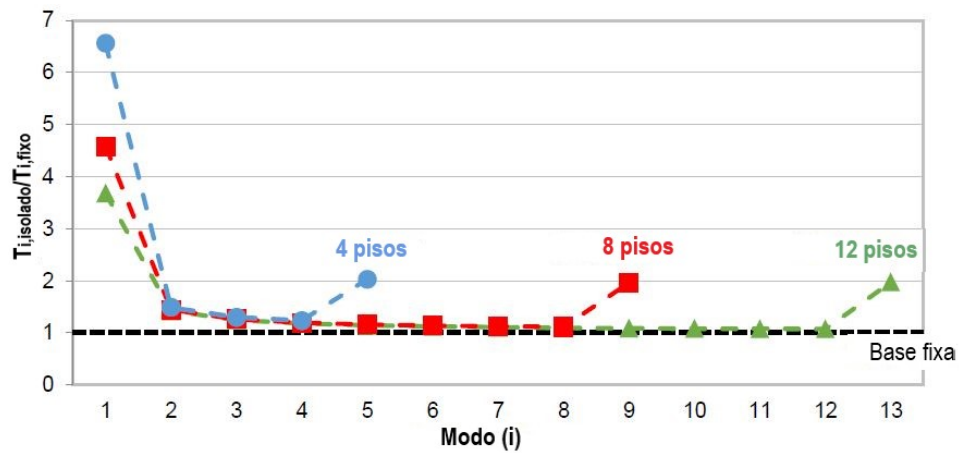


Figura 2.15: Mudança dos períodos numa estrutura isolada, adaptado de [16].

A par dos aspectos acima referidos, os modos superiores são associados a valores de participação modal inferiores em comparação com o modo fundamental, mas como concluído, a principal medida da eficácia do sistema de isolamento, razão entre períodos isolado e de base fixa ($T_{isolado}/T_{fixo}$), é próxima da unidade, ou seja, não beneficiam da redução do valor espectral da aceleração. Posto isto, a sua contabilização é relevante, de forma a obter valores mais próximos da realidade, e do lado da segurança. Fazendo referência que na fórmula proposta pelo EC8 para o cálculo da aceleração num elemento não estrutural não são contabilizados o efeito de todos os modos [16], sendo apenas função do modo fundamental. Neste documento é abordado novamente este assunto, no capítulo 4, na formulação de uma proposta de cálculo da aceleração em elementos não estruturais em edifícios de base isolada.

Capítulo 3

Sistemas de Ascensores

3.1 Sistemas de Ascensores

Um ascensor é um equipamento que estabelece comunicação vertical entre dois planos, sendo utilizado como veículo de transporte de pessoas ou cargas entre pisos de um edifício. É constituído por uma estrutura complexa, com unidades mecânicas e eléctricas. São classificados de acordo com o modo de motorização, podendo ser eléctricos, hidráulicos e a vácuo. Este documento pretende dedicar unicamente atenção aos ascensores eléctricos, por serem os mais utilizados. Compreende-se que os ascensores hidráulicos e a vácuo são apenas utilizados em edifícios baixa a média altura, e julgando-se que pela sua estrutura são desadequados para instalações em edifícios de base isolada. Por o seu modo de elevação ser instalado na base do núcleo do ascensor, por um êmbolo hidráulico, com a possibilidade de atravessar a base deste, e num edifício com isolamento de base a caixa do ascensor encontra-se suspensa e/ou apoiada em aparelhos isoladores. Para uma melhor compreensão de como um sismo pode afectar um destes sistemas, é necessário ter o conhecimento básico dos seus componentes e de como operam, ilustrando-se na figura 3.1 os principais componentes de um ascensor eléctrico de tração típico.

A cabine encontra-se colocada no interior da arcada da cabine, que confere a sua respetiva estrutura de suporte. Múltiplos cabos de tração conectam às polias fixas à viga no topo da arcada, ligando-a à máquina de tração, localizada na casa de máquinas acima da caixa do ascensor. A energia necessária para mover o ascensor é gerada por um motor eléctrico, gerido por um painel de controlo. De forma a compensar o peso da cabine, um contrapeso, que consiste numa armação metálica que agrega um conjunto de pesos, com massa igual à da cabine, com um acréscimo de cerca de 40% a 50% da sua capacidade de carga, é conectado também aos cabos de tração. Um ascensor eléctrico de tração também pode ser instalado sem uma casa de máquinas, onde o sistema de tração é conectado e suportado por uma viga metálica no topo da caixa, com a vantagem de reduzir custos e tempo de construção (*Machine-Roomless*) [17]. É comum incluir na instalação alguns mecanismos de segurança, como por exemplo um limitador de velocidade, que é capaz de parar de imediato a cabine em caso de aumento anormal da velocidade ou de rotura dos cabos, accionando o componente mecânico pára-

quedas instalado na arcada da cabine, ou ainda, amortecedores no fundo do poço, com a função de diminuir a intensidade do impacto na parte inferior da caixa do ascensor.

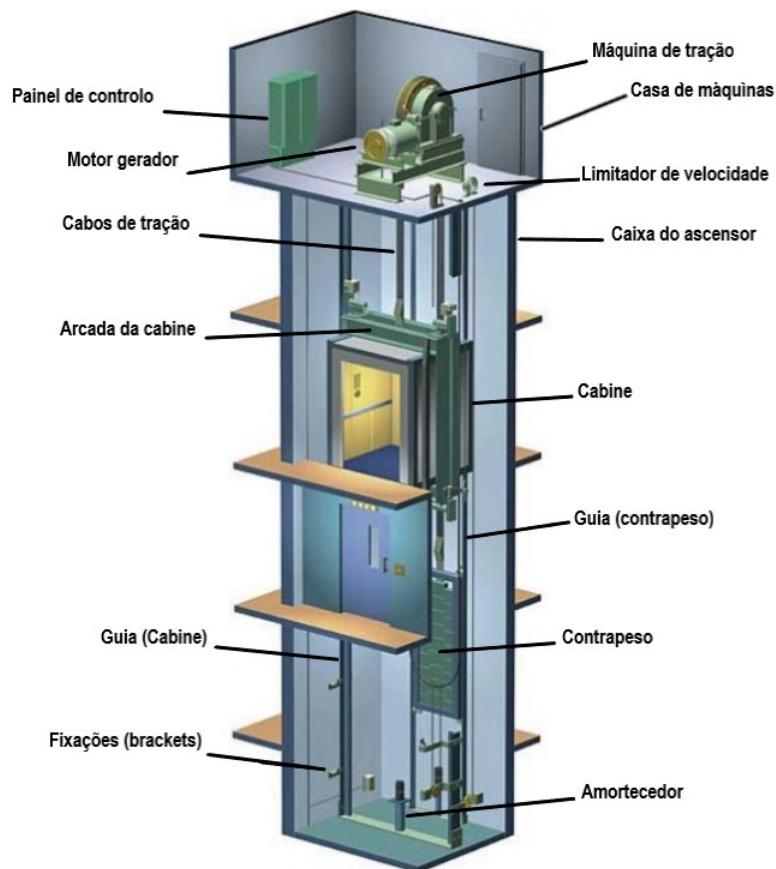


Figura 3.1: Componentes de um ascensor elétrico de tração, adaptado de [18].

Um dos principais componentes do sistema e um dos mais afetados por um evento sísmico, é o sistema de guias da cabine e do contrapeso. Estes permitem a linearização da trajetória destes componentes, estando fixados ou conectados por *brackets* à estrutura da caixa. Feita a análise sísmica do sistema de elevadores, são realizadas verificações às guias como forma a garantir que estas permanecem sem deformações permanentes num possível evento destes e, portanto o sistema continuará à partida operacional. As guias são tipicamente de secção em “T” em aço estrutural e devem cumprir com os requisitos da ISO 7465 [19]. A figura 3.2 mostra um exemplo de como o sistema de guias pode ser instalado na caixa do ascensor.

O elevador também é constituído por dispositivos de deslizamento, rodadeiras ou roçadeiras, que permitem o movimento da cabina e do contrapeso ao longo do seu percurso, atenuam o atrito e o ruído gerado entre a estrutura da cabina e as guias. Sendo possível, e obrigatório em certos casos, adotar dispositivos de retenção junto aos dispositivos de deslizamento, por forma a assegurar que os mesmos não desconectem do sistema de guias, aquando de um evento sísmico.

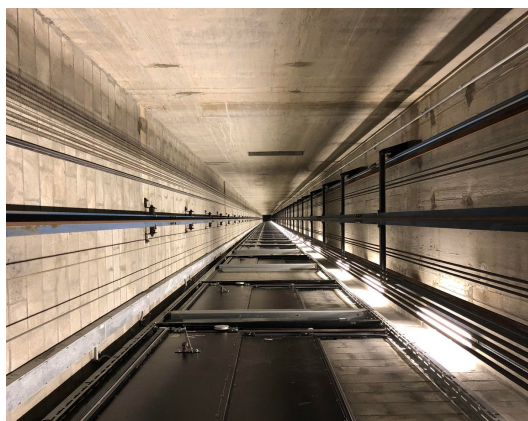


Figura 3.2: Sistema de guias dentro da caixa do ascensor.

3.2 Dimensionamento Sísmico de Ascensores segundo a NP EN 81-77:2018

3.2.1 Considerações Iniciais

O dimensionamento de sistemas de ascensores, sujeitos a condições sísmicas, encontra-se enquadrado pela NP EN 81-77:2018 [3], norma harmonizada específica ao dimensionamento sísmico de ascensores, publicada pelo Instituto Português da Qualidade em 2018, cuja aplicação se encontra articulada com a do Eurocódigo 8 [2], referente ao dimensionamento sísmico da estrutura do edifício. Esta norma é complementar à EN 81-20 [20] e EN 81-50 [21], sendo que estas definem o ascensor em termos gerais.

O objectivo desta norma é definir regras de segurança adicionais, relacionadas com ascensores de passageiros, e de passageiros e cargas, com o intuito de proteger as pessoas e os bens, evitar o encarceramento de utilizadores e reduzir o número de ascensores fora de serviço, contabilizando os riscos que se descrevem de seguida, relacionados com a utilização, a manutenção, a inspecção e as operações de emergência em ascensores sujeitos a condições sísmicas.

Os principais riscos que têm por base as medidas indicadas na NP EN 81-77:2018 que passam por: enganche/engate (*snagging*) dos cabos (de suspensão, do limitador ou de manobra) e de cabos ou de correntes de compensação em elementos salientes no interior da caixa do ascensor; descarrilamento da cabine e/ou do contrapeso; saída de blocos do contrapeso da respetiva arcada e subsequente queda; deformação excessiva das guias, da cabine ou do contrapeso; falha na fixação de equipamentos fixos; danos nos dispositivos de deteção de patamar (*landing switch*) ou de fim de curso (*limit switch*); perda de energia elétrica; abertura inadvertida de portas.

Para mitigar estes riscos a NP EN 81-77:2018 obriga ao cumprimento de uma série de medidas do género prescritivas e baseadas no desempenho, em cálculos, em que algumas delas compreendem em simultâneo ambos os tipos de medidas, onde a sua prescrição depende da categoria sísmica do ascensor, introduzida de seguida.

3.2.2 Categoria Sísmica do Ascensor

O conjunto de medidas visadas pela NP EN 81:77:2018 [3] dependem da designada categoria sísmica do ascensor, num total de quatro categorias, definidas com base na aceleração de cálculo do elemento não estrutural, a_d . Na tabela 3.1 apresenta-se o intervalo entre valores de aceleração em que é prescrita cada categoria, e é mencionado de forma qualitativa o nível das ações corretivas a serem tomadas.

Tabela 3.1: Categorias sísmicas dos ascensores, adaptado da NP EN 81-77:2018 [3].

Aceleração de cálculo (m/s^2)	Categoria sísmica do ascensor	Comentário
$a_d \leq 1$	0	Os requisitos da EN 81-20 e da EN 81-50 são adequados e portanto não se requerem ações adicionais.
$1 < a_d \leq 2,5$	1	São necessárias ações correctivas menores.
$2,5 < a_d \leq 4$	2	São necessárias ações correctivas médias.
$a_d > 4$	3	São necessárias ações correctivas relevantes.

Como se constata apenas são necessários medidas específicas de proteção sísmica para as categorias 1, 2 e 3. Sendo a categoria 0 referente a uma zona de nula ou de muito baixa sismicidade, não havendo medidas adicionais ao dimensionamento do sistema de ascensores, sendo os requisitos das EN 81-20 e EN 81-50 suficientes. Dentro das categorias que requerem ações corretivas, constata-se que a aceleração mínima de cálculo é superior a $1m/s^2$ e as ações corretivas necessárias são proporcionais ao aumento desta variável. A categoria sísmica 1 obriga a medidas corretivas de menor expressão, já na categoria sísmica 2 tornam-se necessárias medidas de médio efeito e a categoria sísmica 3 obriga a adoção de medidas corretivas relevantes.

3.2.3 Aceleração de Cálculo

A força de inércia gerada num ascensor durante um evento sísmico, resulta do produto entre a sua massa e a respectiva aceleração, traduzindo um requisito de dimensionamento sísmico exigido para cada elemento integrante, dependente de uma gama específica de parâmetros. Assim, é necessário seguir uma forma para obtenção da aceleração de cálculo, a_d , que tem por base reproduzir a ação sísmica gerada nos equipamentos, com o intuito de dimensionar as suas ligações à estrutura ou verificar a sua estabilidade. Na norma EN 81-77:2018 é proposta um modo detalhado da determinação deste parâmetro, no anexo B informativo, pelas seguintes expressões 3.1 e 3.2.

$$a_d = S_a \cdot \frac{\gamma_a}{q_a} \cdot g \quad (3.1)$$

$$S_a = \alpha S \left\{ \frac{3 \cdot \left(1 + \frac{z}{H}\right)}{1 + \left(1 - \frac{T_a}{T_1}\right)^2} - 0,5 \right\} \quad (3.2)$$

Retira-se que S_a é o coeficiente sísmico aplicável aos elementos não estruturais; γ_a o coeficiente de importância do elemento; q_a é o coeficiente de comportamento do elemento; α a relação entre a aceleração do solo, para um terreno de Tipo A, e a aceleração da gravidade ($\alpha = a_g/g$); S é o coeficiente de solo conforme o EC8; T_a é o período de vibração fundamental dos elementos não estruturais; T_1 o período de vibração fundamental do edifício, na direcção considerada; z é a altura dos elementos não estruturais localizados acima do nível de aplicação da ação sísmica medida em relação ao piso 0; H a altura do edifício, medida desde o topo do sistema de fundação, considerando o terreno no piso 0. Num edifício com isolamento de base os valores de z e H deverão ser medidos em relação ao nível do isolamento de base. A equação 3.1 tem correspondência com a equação incluída na clausula 4.3.5.2 do Eurocódigo 8 [2].

O fator entre chavetas da equação 3.2 traduz em que medida a aceleração na base do edifício é amplificada em altura. Admitindo que $z = H$ e $T_a = 0$ para um edifício de base fixa, este fator toma um valor de 2,5. Esta amplificação não se deve verificar, pelo menos de forma tão acentuada, num edifício de base isolada, que por meio do efeito dos isoladores, fará com que exista uma redução significativa da severidade da ação transmitida à estrutura acima dos mesmos, tendo um valor muito mais reduzido. Nas Especificações Técnicas ACSS 11/2020 [1], onde é abordado este problema, tendo em conta algumas hipóteses considera-se que para um edifício de base isolada não existe amplificação das acelerações em altura e o factor toma um valor unitário. Um dos objetivos desta dissertação é aferir uma forma de cálculo da amplificação das acelerações em altura proporcionando um conjunto de expressões de cálculo mais precisas, assunto em foco no capítulo 4.

3.2.4 Coeficiente de Importância do Elemento

Relativamente ao valor a considerar para o coeficiente de importância do elemento, γ_a , constata-se existir uma certa controvérsia no valor adotar. Na EN 81-77:2018 admite-se que esse coeficiente poderá ser de valor superior a 1 para ascensores utilizados para objetivos especiais de segurança, exemplificando os ascensores instalados em hospitais e serviços de emergência. Salienta-se que esse coeficiente de importância surge em simultâneo com o coeficiente de importância do edifício, γ_I , no cálculo da variável a_g , produzindo um efeito análogo em termos da alteração do período médio de retorno para a ação sísmica quantificada para o efeito de dimensionamento.

Por outro lado, nas especificações técnicas para o dimensionamento de ascensores de edifícios hospitalares sujeitos a condições sísmicas, ET 11/2020 [1], é apontada a seguinte incongruência, de acordo com o documento que a seguir se expõe. No caso dos edifícios correntes, com respetiva classe de importância II, para os quais a ação sísmica de referência, de modo a cumprir o requisito de não ocorrência de colapso, tem um período médio de retorno, T_{NCR} , de 475 anos e no caso concreto dos hospitais, com a classe de importância IV, no EC8 [2] é indicado o coeficiente de importância de 1,4 que corresponde a um aumento do período de retorno de 475 para os 1303 anos. A multiplicação da ação assim determinada para edifícios de importância maior por um segundo coeficiente de importância, γ_a de 1,5, conduz a uma ação sísmica cujo período médio de retorno passaria para cerca de 4400 anos,

valor que não encontra correspondência com as ações sísmicas consideradas no Eurocódigo 8 em nenhum outro tipo de circunstância.

Considerando o exposto anteriormente, e seguindo as ET 11/2020 [1], conclui-se que o coeficiente de importância γ_a não deverá ser interpretado como pretendendo proceder a uma alteração do período médio de retorno da ação a considerar para o dimensionamento específico de ascensores, até porque se entraria em contradição com o nível da ação para o qual a estrutura do edifício é dimensionada, igual-se-ia a afirmar que o sistema de ascensores seria dimensionado para uma ação para a qual o edifício já teria colapsado. Aponta-se que esse coeficiente de importância traduz um fator adicional de segurança, para prevenir a propagação de efeitos em cascata do ponto de vista de fatalidades e de danos, na existência dessa possibilidade. Entende-se assim na ET 11/2020 que este coeficiente deverá tomar um valor unitário, à exceção dos casos de ascensores cuja queda ou inoperacionalidade imediata possam resultar efeitos em cascata, propagando e amplificando as consequências humanas e materiais do sismo, devendo então adotar-se um valor de 1,5 [1].

3.2.5 Coeficiente de Comportamento do Elemento

Na NP EN 81-77:2018 é proposto usar, para a obtenção da aceleração de cálculo, um coeficiente de comportamento do elemento igual a 2, valor que seria apenas adequado a edifícios de base fixa.

Para edifícios com isolamento de base, na atuação de um sismo o seu comportamento mantém-se dentro do regime elástico, por isso não se considera prudente considerar um coeficiente de importância do elemento igual a 2, portanto este coeficiente deverá tomar o valor de 1, no que resultará no cálculo elástico da aceleração.

3.2.6 Casos de Carga

O dimensionamento do sistema de ascensores é realizado para vários cenários de carga. São apresentados na tabela 3.2, adaptada do anexo D da EN 81-77:2018, todos os casos de carga a considerar no dimensionamento deste sistema, entre eles, o cenário de carga em condição sísmica.

Tabela 3.2: Cargas e forças que devem ser consideradas nos diversos cenários de carga. Adaptado de EN 81-77:2018

Cenários de Carga	Cargas e forças	P	P_{EC}	Q	M_{cut}/M_{bwt}	F_S	F_p	M_g	M_{aux}	WL	F_{SE}
Utilização Normal	em funcionamento	x		x	x		x^a	x	x	x	
	carga + descarga	x				x	x^a	x	x	x	
Funcionamento do dispositivo de segurança	dispositivo de segurança ou similar	x		x	x		x^a	x	x		
	válvula de rutura	x		x			x^a	x	x		
Condição Sísmica	em funcionamento		x	x^b	x		x^a	x	x	x	x

^a ver EN 81-20:2014, 5.7.3.2.5.
^b carga a ser considera é $Q_{SE} = K_{SE} \cdot Q$.

Proceda-se agora à discriminação das variáveis de massas e forças, a considerar no cenário de carga em condição sísmica da EN 81-77:2018 :

- P_{EC} , é a massa em quilogramas, da cabina vazia;

- Q_{SE} , é a carga nominal do ascensor, em quilogramas, que no caso de carga sísmico é multiplicada pelo factor sísmico de carga, K_{SE} ;
- M_{cwt}/M_{bwt} , representa respetivamente as forças de guiamento de um contrapeso e de uma massa de equilíbrio;
- F_P , força nas fixações de uma guia, em resultado do assentamento normal (não sísmico) do edifício ou da retração do betão;
- M_g , massa de uma guia;
- M_{aux} , é força (e/ou momento) eventualmente exercidos numa guia devido ao equipamento auxiliar, salientando que não devem considerar o efeito dos limitadores de velocidade (e componentes associadas), interruptores ou dispositivos de posicionamento;
- WL , cargas devidas ao vento, apenas consideradas em ascensores localizados no exterior de um edifício com caixa parcialmente fechada;
- F_{SE} , força sísmica gerada pelas massas da cabine submetidas à aceleração de cálculo.

Na concretização das medidas baseadas no desempenho, é imperativo contabilizar as inúmeras variáveis de cálculo referidas no cenário de carga em condição sísmica, por forma a calcular as forças de massa, e proceder ao dimensionamento e às respetivas verificações de segurança dos elementos estruturais do sistema.

3.2.7 Dispositivos de Retenção

Para ascensores de respetiva categoria sísmica 2 ou 3, a arcada de cabina deve no mínimo ser equipada com dispositivos de retenção na parte superior e inferior da mesma, capazes de manter a arcada da cabina centrada nas suas guias. Os dispositivos de retenção devem colocar-se de maneira que distribuam as cargas de uma forma similar à das roçadeiras, e devem ser integrados ou instalados na proximidade da fixação das mesmas.

Quando a cabina está centrada com as guias, as distâncias d_1 , d_2 e d_3 , ver figura 3.3 a), entre o dispositivo de retenção e as guias não devem ser superiores a 5 mm, e as dimensões utilizadas não devem provocar o disparo acidental do para-quedas durante um sismo.

A profundidade do dispositivo de retenção, z_1 , deve ser limitada para evitar a colisão com as fixações das guias ou com outros dispositivos fixos, mas deve ser suficientemente longa, para certificar o comprimento mínimo de sobreposição, necessário entre os dispositivos de retenção e o nariz das guias durante um sismo. A profundidade necessária para estes dispositivos também se correlaciona com o tipo de guia através da flecha admissível da mesma, descrito na cláusula 5.8.2 da norma. Durante um sismo, a distância mínima de sobreposição entre os dispositivos de retenção e o nariz da guia deve ser de pelo menos 5 mm, ver figura 3.3 b).

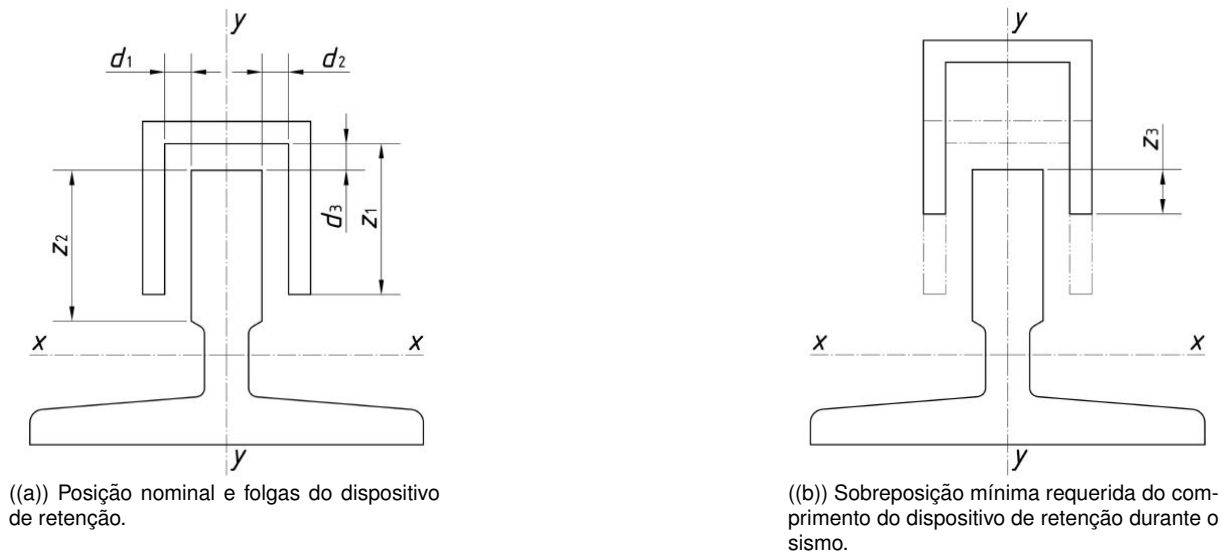


Figura 3.3: Dispositivos de retenção, retirado de [3].

A estrutura da cabina e dos dispositivos de retenção deve ser suficiente para suportar sem deformação permanente, as cargas e as forças a que estão submetidos, incluindo as forças geradas pela aceleração de cálculo, a_d .

3.2.8 Sistema de Guias

De acordo com a NP EN 81-77:2018 [3], as guias, as suas uniões e fixações devem cumprir com os requisitos da EN 81-20 [20] e, equitativamente suportar as cargas e forças geradas pela aceleração de cálculo (a_d). Também se refere que no caso da existência de dispositivos de retenção, impostos pela norma para as categorias sísmicas de ascensor 2 e 3, devem ser considerados como pontos de apoio da arcada para o cálculo das guias.

Relativamente ao dimensionamento do sistema de guias, as forças de embate são determinadas em duas direções, normal ao eixo x e normal ao eixo y . Isto é ilustrado na figura 3.4, onde as forças a atuar na guia são geradas pelo movimento da massa da cabina em cada direção, considerando uma carga pontual, referente ao ponto de contacto entre o dispositivo de retenção e a guia.

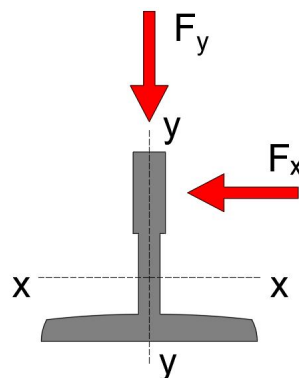


Figura 3.4: Eixos de guia e forças correspondentes.

É indicado que a tensão máxima admissível nas guias deve ser calculada dividindo a máxima resistência à tração por um fator de segurança, dependente da extensão do material, indicado no quadro 3.3. A flecha máxima admissível para as guias da cabine ou contrapeso na direção y , deve ser tal que o comprimento de sobreposição entre o nariz da guia e o dispositivo de retenção, z_3 , seja superior a 5 mm, ver figura 3.3 b). A flecha máxima permissível para as guias da cabine e contrapeso na direção x é igual à da direção y . Salientando que, a flecha máxima admissível inclui a guia, a sua fixação e a viga de separação, caso esta exista.

Tabela 3.3: Fatores de segurança para as guias, adaptado de [3]

Extensão ϵ	Fator de Segurança
$\epsilon \geq 12\%$	1,8
$8\% \leq \epsilon < 12\%$	3,0

Para guias de perfil “T” as flechas máximas concordantes em milímetros é dada pela expressão 3.3, com as dimensões referentes à figura 3.3.

$$\delta_{perm} = z_1 - 2d_3 - 5 \leq 40mm \quad (3.3)$$

Na ausência de dispositivos de retenção, categorias sísmicas do ascensor 0 e 1, as flechas máximas admissíveis do sistema de guias de cabina devem cumprir com os requisitos da EN 81-20 [20], tendo em conta as cargas e forças motivadas pelo ascensor, incluindo as forças geradas pela aceleração de cálculo, a_d .

Sob condições sísmicas, o modo de determinação da força de flexão das guias da cabine faz-se com recurso às expressões 3.4 e 3.5, retiradas do anexo D.8 da norma, discriminando-se abaixo o significado de cada variável.

$$F_x = \frac{k_2 g_n [Q_{SE}(x_Q - x_S) + P_{EC}(x_P - x_S)]}{nh} + \frac{a_x (P_{EC} + Q_{SE}) X_{SE}}{n} \quad (3.4)$$

$$F_y = \frac{k_2 g_n [Q_{SE}(y_Q - y_S) + P_{EC}(y_P - y_S)]}{\frac{n}{2}h} + \frac{a_y (P_{EC} + Q_{SE}) X_{SE}}{\frac{n}{2}} \quad (3.5)$$

- Q_{SE} e P_{EC} descritas em 3.2.6;
- k_2 é o factor de impacto da cabine em movimento, toma um valor de 1,2;
- g_n , é a aceleração da gravidade (m/s^2);
- x_Q e y_Q , excentricidade do ponto de aplicação da massa, relativamente ao eixo y e x da secção transversal das guias respectivamente (mm);
- x_P e y_P , excentricidade do ponto de aplicação da massa relativamente ao eixo y e x da secção transversal das guias respectivamente (mm);

- x_S e y_S , excentricidade do ponto de aplicação da massa relativamente ao eixo y e x da secção transversal das guias respectivamente (mm);
- h , distância entre guias ou limitadores de posição (mm);
- X_{SE} , é a razão de carga das roçadeiras ou dos dispositivos de retenção, tomando o valor máximo de $\frac{Z_{ZE}}{h}$ e $\frac{h-Z_{ZE}}{h}$;
- Z_{ZE} , é a distância na direção Z , medida desde os dispositivos de retenção inferiores ao centro de gravidade da cabina, do contrapeso ou da massa de equilíbrio incluindo a carga Q_{SE} , que é o ponto de aplicação na direção Z onde a força sísmica F_{SE} é aplicada (m), como exemplificado na figura 3.6;
- a_x e a_y , é aceleração de cálculo respetivamente segundo a direção x e direção y ;
- n , é o número de guias em que a cabine embate, sendo na direção x igual a n e na direção y igual a $n/2$, como ilustrado na figura 3.5.

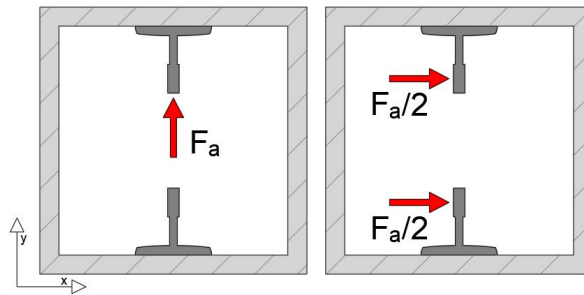


Figura 3.5: Posição das guias na caixa e forças de embate nas respetivas direções horizontais principais da ação sísmica.

De modo semelhante, a força de flexão sobre as guias do contrapeso é retratada nas expressões 3.6 e 3.7, retiradas do anexo D.9 da norma, sendo particularizado posteriormente as variáveis destas equações que não foram referidas anteriormente.

$$F_x = \frac{k_2 g_n (P_{EC} + qQ) e_x D_x}{nh} + \frac{a_x (P_{EC} + qQ) X_{SE}}{n} \quad (3.6)$$

$$F_y = \frac{k_2 g_n (P_{EC} + qQ) e_y D_y}{\frac{n}{2} h} + \frac{a_y (P_{EC} + qQ) X_{SE}}{\frac{n}{2}} \quad (3.7)$$

- q , é o fator de equilíbrio que representa a parte da carga nominal que é equilibrada pelo contrapeso, ou a parte da massa da cabina que é equilibrada pela massa de equilíbrio;
- e_x , é uma excentricidade de 10% entre o ponto de atuação da massa e o centro de gravidade na direção de x ;
- e_y , é uma excentricidade de 5% entre o ponto de atuação da massa e o centro de gravidade na direção de y ;

- D_x , é a dimensão do contrapeso ou da massa de equilíbrio na direção de x;
- D_y , é a dimensão do contrapeso ou da massa de equilíbrio na direção de y.

Explicita-se na figura 3.6 alguns parâmetros necessários para a realização dos cálculos exprimidos anteriormente.

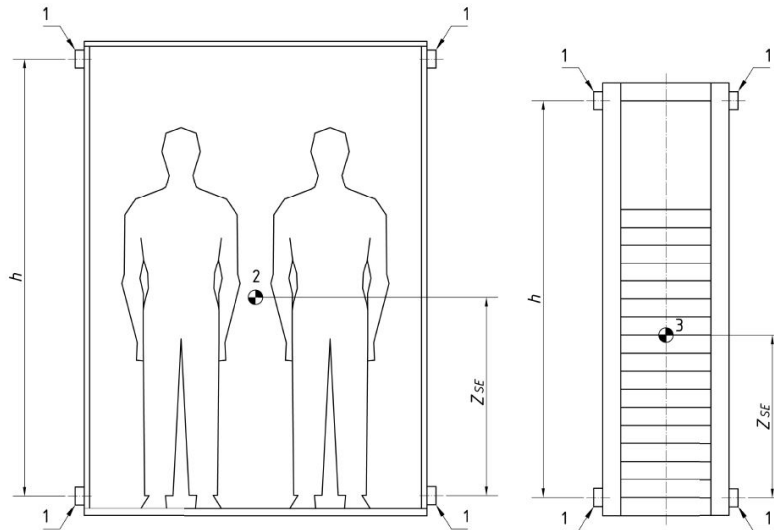


Figura 3.6: Centro de massa da cabine e contrapeso, retirado de [3].

Legenda:

- 1 - roçadeira ou dispositivo de retenção;
- 2 - centro de gravidade da cabine (calculado considerando a massa Q_{SE});
- 3 - centro de gravidade do contrapeso ou massa de equilíbrio;
- h - distância entre roçadeiras ou dispositivos de retenção;
- Z_{SE} - distância dos dispositivos de retenção inferiores ao centro de gravidade.

Obtidas assim as forças de flexão em cada direção, para as guias da cabine e do contrapeso, procede-se em seguida, ao cálculo dos momentos de flexão e por último, para as tensões resultantes. Retratado no anexo C informativo da EN 81-50:2014 [21], intitulado de exemplo de cálculo dos sistemas de guias. Considera-se o modelo e cálculo das guias por uma viga encastrada-apoiada. Inferem-se as expressões de cálculo dos momentos de flexão e da tensão resultante em cada direção, 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11.

$$M_x = \frac{3 \cdot F_x \cdot l}{16} \quad (3.8)$$

$$\sigma_x = \frac{M_x}{W_x} \quad (3.9)$$

$$M_y = \frac{3 \cdot F_y \cdot l}{16} \quad (3.10)$$

$$\sigma_y = \frac{M_y}{W_y} \quad (3.11)$$

- W_x e W_y , é o módulo de flexão das guias segundo os eixos principais de inércia;
- l , é a distância entre fixações/brackets das guias.

No mesmo anexo são demonstradas as verificações de cálculo a seguir, impondo o limite da tensão admissível como mencionado anteriormente, realizando o cálculo da verificação das tensões combinadas nas duas direções, verificação à encurvadura das guias, ao empenamento e à flexão do banzo. Impondo cumprir a deformação máxima admissível, referida no início da subsecção dada pela equação 3.3.

3.2.9 Sistema de Detecção Sísmica

Para a categoria sísmica do ascensor 3, é imposta a instalação de um sistema de deteção sísmica. Por meio de um interruptor sísmico, que deteta e mede a aceleração segundo três eixos, e é capaz de detetar as ondas sísmicas P e S. Ao captar as ondas P de amplitude suficiente, as que se fazem sentir primeiro no edifício, comunica ao painel de controlo do ascensor para o enviar ao piso disponível mais próximo e assim permitir a saída dos passageiros antes da chegada das ondas S. Deixando o ascensor fora de serviço até que um técnico especializado o inspecione, e se concluir que o sistema esteja na sua integra operacional, volta a reiniciá-lo. A norma refere que este dispositivo poderá ser colocado no fundo do poço do ascensor, desta forma será permitindo detetar mais rapidamente as acelerações sísmicas, embora não contabilize o efeito da amplificação associada à própria superestrutura do edifício.

3.3 Sistemas de Ascensores em Edifícios Isolados

Numa estrutura sísmicamente isolada, os deslocamentos horizontais concentram-se ao nível do isolamento de base. A localização dos aparelhos de apoio é um fator importante no dimensionamento sísmico do sistema de ascensores, podendo o plano de isolamento estar no fundo da cave, ao nível da base do piso térreo ou acima deste, aspeto relevante no dimensionamento e pormenorização do núcleo, que agrega o sistema de elevação e das componentes do ascensor. Medidas de proteção devem ser tomadas, nomeadamente em relação às juntas de separação dos núcleos, e na disposição e dimensionamento das guias da cabina e do contrapeso.

Pretende-se apresentar distintas soluções técnicas, em termos da conciliação entre a separação horizontal, introduzida pelos isoladores, e a continuidade vertical do sistema de ascensor e guias. Originalmente apresenta-se o caso de o plano de isolamento estar no fundo da cave ou ao nível do piso térreo, e não existir pisos enterrados, exemplo na figura 3.7. Nesta solução, a caixa dos ascensores percorre todo o edifício, mas com o pormenor de a base do poço estar suspensa, não havendo conexão de forma fixa ao piso térreo.

Edifícios cujo o plano de isolamento se encontra entre pisos, é de extrema dificuldade haver continuidade do sistema de elevadores abaixo do isolamento de base, pelo que o sistema estaria sujeito a uma enorme deformação ao nível do plano de isolamento de base, o que levaria a medidas acrescidas de proteção sísmica, nomeadamente das guias da cabina e do contrapeso.

No entanto, uma das soluções de recurso face ao plano de isolamento atravessar o núcleo que agrega

o sistema de elevação é a suspensão do poço do ascensor na superestrutura. Como ilustrado na figura 3.8, a caixa do ascensor continua conectada à superestrutura e percorre os pisos enterrados. Ao estar desconectado destes, o núcleo encontra-se isolado, tendo os mesmos deslocamentos da superestrutura e não há interrupção na horizontal do sistema de elevação. Esta medida apenas funciona na hipótese da contabilização de juntas à volta do poço, que assegurem que os deslocamentos que se farão sentir num evento sísmico sejam acomodados, impedindo a conexão de uma parte isolada da estrutura a outra parte fixa, o que é de todo indesejável. Por forma a aliviar o peso suspenso do núcleo na superestrutura, é possível colocar aparelhos de apoio deslizantes com rigidez horizontal nula na base do núcleo do ascensor, conferindo suporte à estrutura da caixa. Permitindo acompanhar os deslocamentos da superestrutura sem a necessidade de o núcleo ter uma elevada rigidez.

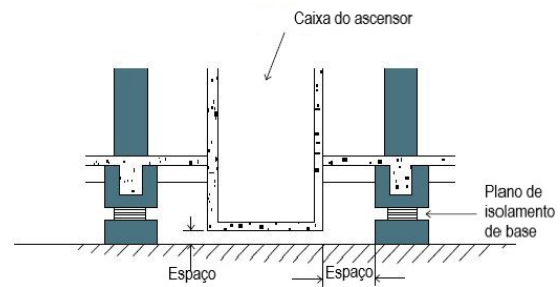


Figura 3.7: Plano de isolamento ao nível do fundo da cave, com o pormenor do núcleo de elevadores, adaptado de [22].

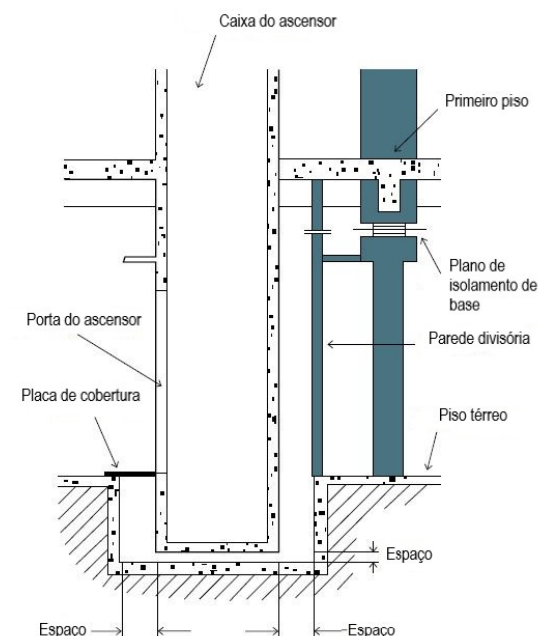


Figura 3.8: Plano de isolamento ao nível do piso térreo, com o pormenor do núcleo de elevadores, adaptado de [22].

deformações nas guias que atravessam o plano de isolamento, que se encontra entre pisos, para o

Outra solução possível será separar em duas partes o percurso do sistema de elevação, havendo um poço na superestrutura, isolado, e outro na cave, fixa a esta, com o inconveniente de uma viagem entre a cave e a estrutura acima se fazer em duas. Traria a vantagem de já não serem necessárias juntas à volta da caixa, o que é vantajoso do ponto de vista construtivo, e vai de encontro a melhorar a segurança contra incêndios. Afigura-se que um possível incêndio na cave não se propagará pelo poço dos elevadores, o que também conduziria os fumos à estrutura acima, impedindo de certa forma o funcionamento do poço como “chaminé” num possível evento destes.

O único documento específico a esta temática foi um artigo de revista do *Journal of Environment and Engineering*, intitulado *Dynamic Analysis for Elevators Installed in Mid-Story Seismic Isolated Buildings* [23], do ano 2007, cujo o objetivo é investigar as

caso de não se adotar nenhuma das soluções descritas nesta secção, desenvolvendo um modelo não-linear de elementos finitos, por forma a modelar todo o sistema de ascensores, onde é proposto um dimensionamento óptimo do sistema de guias, para resistir a um evento sísmico. Entende-se que esta solução não é ideal, uma vez que as soluções anteriormente apresentadas são de maior fiabilidade e segurança. Por isto, fez-se exclusivamente referência ao estudo em questão, aferindo-se ser um tema ainda pouco investigado.

Em suma, a conciliação do sistema de ascensores com o plano de isolamento de base é de extrema importância, uma boa pormenorização é essencial para que o sistema seja salvaguardado dos enormes deslocamentos relativos, entre a superestrutura e a subestrutura. As soluções técnicas apresentadas necessitam de uma análise detalhada, por forma a avaliar as dimensões das juntas envolventes da caixa, e o dimensionamento do núcleo que agrega o sistema de ascensores deverá apresentar alguma rigidez, por forma a que se possa deslocar com a superestrutura sem deformações significativas.

Capítulo 4

Estudo Paramétrico

4.1 Introdução

O dimensionamento sísmico dos sistemas de ascensores depende, fundamentalmente, da aceleração de cálculo a que o elemento é sujeito sobre a ação de um sismo. Sendo que, as atuais regulamentações sísmicas não propõem uma fórmula de estimação desta variável para edifícios com isolamento de base. A expressão proposta nas ET 11/2020 [1], mencionada em 3.2.3, apesar de ser uma forma conservativa de estimação da aceleração, até certo ponto, não percebe a diferença entre a aceleração espectral e a que se realmente verifica como máxima no edifício, além do mais, não tem em conta o acréscimo do valor da aceleração resultante da contabilização dos modos superiores.

Nesta base, realizou-se um estudo paramétrico que tem como objetivo relacionar propriedades físicas e dinâmicas de um edifício com isolamento de base, com o máximo de valor de aceleração de cálculo, em função das seguintes variáveis do edifício: tipologia estrutural, número de pisos e da relação entre períodos fundamentais da estrutura de base isolada e da superestrutura considerando-a de base fixa. Promovendo-se a obtenção de uma série de expressões de aceleração de cálculo.

Para concretizar estes objetivos realizou-se um programa em *Python*, que realiza a modelação do comportamento sísmico de um edifício com isolamento de base, sobre algumas considerações simplificativas. Parte-se de um modelo linear equivalente do sistema de isolamento de base, considera-se um modelo plano do edifício, e a partir destes realiza uma análise modal por espectros de resposta.

4.2 Modelo Numérico

O modelo numérico considerando foi um modelo plano de massas concentradas nos pisos, e foi realizado com recurso a um programa, desenvolvido para este estudo, na linguagem de programação *Python*. Primeiramente é modelada a superestrutura, ilustrada à esquerda da figura 4.1, para de seguida, modelar a estrutura com isolamento de base, à direita na mesma figura. O modelo tem um número de pisos variável, N , compreendido entre 2 e 10 pisos, por serem valores aceitáveis para edifícios correntes com isolamento de base. Tomou-se que os elementos estruturais verticais são

iguais em todos os pisos, portanto temos a mesma rigidez por piso, EI_{piso} . Considerou-se também que a massa do edifício se assemelha a um sistema discreto com concentração de massas ao nível dos pisos, e optou-se fixar o valor da massa por piso, incluindo a massa do piso da base, em 500 ton , para todos os osciladores calculados. Como se pretende que cada oscilador tenha um determinado período fundamental, ao fixarmos a massa por piso torna-se apenas necessário encontrar a rigidez por piso que satisfaça a tal condição. Fixou-se a altura entre pisos, h , em $3,2m$. O sistema de isolamento é modelado através da associação de uma mola horizontal na base do modelo de base isolada, tendo esta mola rigidez igual à rigidez efetiva do sistema de isolamento de base considerado, k_{eff} .

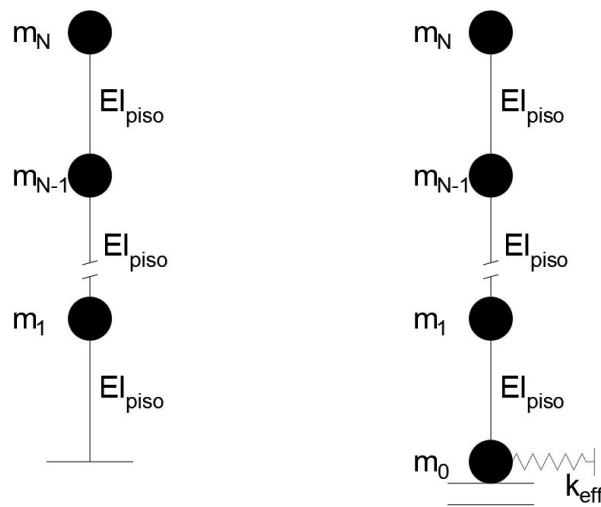


Figura 4.1: Modelo de massas concentradas nos pisos: Base fixa e Base isolada.

Como é considerado um modelo plano da estrutura, não se entra em conta com possíveis efeitos de excentricidade entre o centro de rigidez do sistema de isolamento de base e o centro de massa da superestrutura, que como mencionado em 2.2.3 num modelo linear equivalente descrito pelo Eurocódigo 8, o movimento de torção em torno do eixo vertical poderá ser desprezado, se satisfizer uma série de condições, que se considera que os modelos em estudo compreendem.

Por não ser relevante para análise e pela simplificação do modelo, não é considerada a deformabilidade axial dos elementos verticais e também se considera que os elementos horizontais são axialmente rígidos, por forma a que os deslocamentos horizontais num piso sejam iguais em todos os pontos desse piso.

O modelo de cálculo é incorporado para satisfazer várias tipologias estruturais, tendo por base os critérios do Eurocódigo 8 [2] de definição de cada tipo de estrutura, sendo as consideradas como adequadas num edifício com isolamento de base: sistema porticado, sistema misto equivalente a sistema porticado, sistema misto equivalente a paredes e sistema de paredes. Cada tipologia estrutural, é definida no modelo numérico, com base num parâmetro, que se denomina de n , que define uma razão entre a contribuição dos pórticos e paredes.

4.3 Análise Modal

O uso de uma análise modal permite obter bons resultados, e sobretudo, permite compreender o comportamento da estrutura isolada através da observação dos seus modos de vibração [10]. Segundo o EC8 [2], se o comportamento do sistema de isolamento puder ser considerado através de um modelo linear equivalente, é possível adotar o método da análise modal. De modo a afirmar que a análise modal é exata, assume-se que o modelo é linear, o que é uma aproximação. Outra aproximação está na atribuição do amortecimento dos osciladores à estrutura, que se considera constante, para o primeiro modo, e na atribuição do amortecimento da superestrutura aos modos superiores. Que se traduz na adaptação do espectro de resposta aos coeficientes de amortecimento considerados para o primeiro modo e os restantes, voltando a descrever este assunto mais à frente no documento.

4.3.1 Cálculo das Frequências e Modos de Vibração

O problema da identificação das frequências de vibração de um determinado sistema, é resolvido com base na análise do movimento em regime livre e sem amortecimento. Nestas condições, as equações de equilíbrio dinâmico tomam uma forma mais simplificada [24]:

$$[M]\{\ddot{q}(t)\} + [K]\{q(t)\} = 0 \quad (4.1)$$

Sendo $\ddot{q}(t)$ e $q(t)$ respetivamente a aceleração e o deslocamento em cada grau de liberdade, $[M]$ é a matriz de massa e $[K]$ é a matriz de rigidez da estrutura relativa aos graus de liberdade considerados. Para o cálculo das frequências e dos modos de vibração, admite-se que o movimento vibratório da estrutura, é do tipo harmónico, e partindo da equação 4.1 obtém-se a seguinte expressão [24]:

$$[K - p^2 M]\{v\} = \{0\} \quad (4.2)$$

Onde p é a frequência de vibração e $\{v\}$ é a matriz que representa a configuração modal da estrutura. Para que o sistema de equações 4.2 tenha uma solução não trivial, é necessário que se anule o determinante da matriz $[K - p^2 \cdot M]$. Logo, a determinação de frequências e modos de vibração resulta num problema tradicional de determinação de valores e vetores próprios, em que os primeiros representam as frequências e os segundos os modos de vibração. Assim, a cada frequência p_n corresponde um modo de vibração $\{v_n\}$, correspondendo à coluna n da matriz modal, [24].

4.3.2 Matriz de Massa

Como se assumiu que o modelo é de massas concentradas nos pisos, a matriz de massa utilizada para a superestrutura é diagonal e toma a forma da equação 4.3. Para a estrutura isolada, de forma semelhante, mas que se acresce mais uma massa associada, forma-se a equação 4.4, onde m_0 é a

massa do piso 0, logo acima do plano de isolamento de base.

$$[M]_{N \cdot N} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & m_N \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$[M]_{(N+1) \cdot (N+1)} = \begin{bmatrix} m_0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & m_N \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

4.3.3 Definição da Matriz de Rigidez

Tenciona-se analisar a configuração modal dos edifícios com diferentes tipologias, isto é, com comportamentos distintos devido à variação do contributo entre pórticos e paredes, resultando na necessidade de obter uma matriz rigidez que satisfaça cada caso. A matriz de rigidez de um edifício resulta na prática da soma entre matrizes de rigidez dos dois tipos de elementos, pilares e paredes, que têm diferentes comportamentos em altura. É crucial obter a matriz de rigidez que modele o comportamento de cada tipo de elemento estrutural, apresentando-se no presente subcapítulo a modelação numérica de cada um, para a obter-se a matriz rigidez global de uma certa tipologia estrutural.

Pórtico Equivalente

Os edifícios com tipologia estrutural de pórtico puro, quando sujeitos a uma ação sísmica, deformam-se com a característica dos pilares sofrerem rotações reduzidas ao nível dos pisos, resultando na prática à associação de um único grau de liberdade por piso, sendo esta a translação na respetiva direção em análise, ao nível de cada piso. O deslocamento entre pisos, ou seja, o acréscimo de deslocamento de um piso relativamente ao piso imediatamente abaixo, apenas depende da força de corte global ao nível da base de cada piso, sendo que esta diminui em altura, sob o efeito da ação sísmica. Desta forma, o deslocamento entre pisos em edifícios com comportamento tipo pórtico puro é apenas função das forças de corte ao nível da base dos pisos, sendo por isso independente da deformação nos restantes pisos. Por outro lado, uma vez que a força de corte diminui em altura, o deslocamento entre pisos nos pórticos também diminuem.

Apresentando-se na figura 4.2, os deslocamentos independentes considerados para a superestrutura, à esquerda, e para a estrutura isolada, à direita.

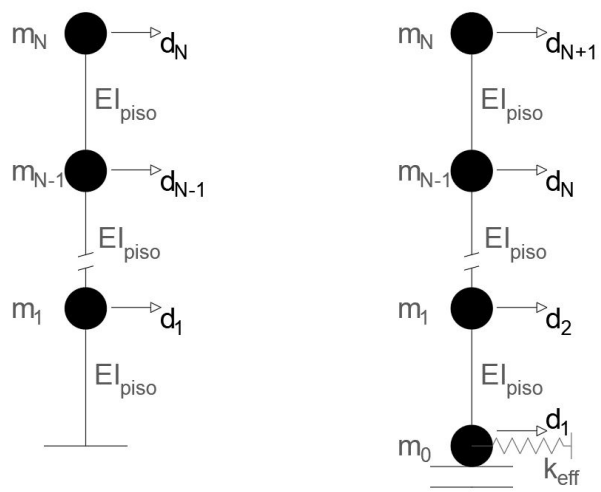


Figura 4.2: Deslocamentos independentes para estrutura tipo p3rtico: Base Fixa e Base Isolada.

Para um edif3cio de base fixa, calculando as rigidezes associadas a cada grau de liberdade, obt3m-se a matriz $N \cdot N$, em que N 3 o n3mero de pisos, na forma da seguinte equa33o 4.5:

$$[K]_{N \cdot N} = \begin{bmatrix} \frac{12 \cdot 2i}{L^2} & -\frac{12 \cdot i}{L^2} & 0 & \dots & 0 \\ -\frac{12 \cdot i}{L^2} & \frac{12 \cdot 2i}{L^2} & -\frac{12 \cdot i}{L^2} & \dots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -\frac{12 \cdot i}{L^2} & \frac{12 \cdot i}{L^2} \end{bmatrix} \quad \text{com } i = \frac{EI}{L} \quad (4.5)$$

No mesmo edif3cio, mas com um sistema de isolamento de base, origina-se mais um grau de liberdade, ao n3vel do plano de isolamento, em que a rigidez 3 igual 3 efetiva do sistema de isolamento de base, K_{eff} . Conclui-se assim que a matriz rigidez para o edif3cio isolado tem dimens3es $(N+1) \cdot (N+1)$, configurando-se na forma da equa33o 4.6.

$$[K]_{(N+1) \cdot (N+1)} = \begin{bmatrix} \frac{(K_{\alpha} + 12) \cdot i}{L^2} & -\frac{12 \cdot i}{L^2} & 0 & \dots & 0 \\ -\frac{12 \cdot i}{L^2} & \frac{12 \cdot 2i}{L^2} & -\frac{12 \cdot i}{L^2} & \dots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -\frac{12 \cdot i}{L^2} & \frac{12 \cdot i}{L^2} \end{bmatrix} \quad \text{com } i = \frac{EI}{L} \text{ e } K_{\alpha} = \frac{K_{eff} \cdot L^2}{i} \quad (4.6)$$

Parede Equivalente

Os edif3cios do tipo parede puro, devido 3 sua rigidez apresentam uma deformada semelhante a uma consola, com a caracter3stica dos deslocamentos aumentarem em altura e poder associar-se uma rota33o deste elemento ao n3vel dos pisos, originando-se mais um grau de liberdade, de rota33o, no modelo de c3lculo, evidenciando-se assim a diferen3a entre o que acontece no caso anterior do edif3cio tipo p3rtico puro. De salientar que neste elemento existe, quer deforma33o por flex3o quer deforma33o por corte, em que a influ3ncia de cada na deforma33o total, 3 fun33o das dimens3es dos elementos parede, das suas rigidezes e altura. Para modelar o comportamento de uma parede, recorreu-se ao

elemento finito de viga fina da Teoria de Euler-Bernoulli [25], composto por quatro graus de liberdade, duas translações e duas rotações, apresentando-se este elemento na figura 4.3. Este modelo não considera a rigidez por corte, sendo a rigidez total unicamente proporcional à rigidez de flexão, sendo uma aproximação aceitável por a deformação total de uma parede ser quase na sua totalidade por flexão.

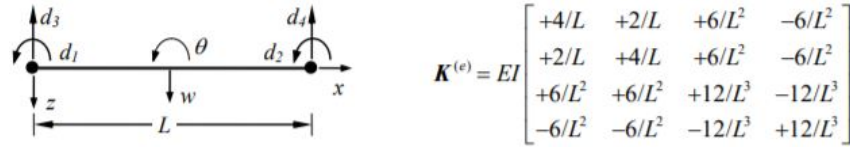


Figura 4.3: Elemento de viga fina (Euler-Bernoulli): aproximação linear.

Apresentando-se na figura 4.4, os deslocamentos independentes considerados para a superestrutura, à esquerda, e para a estrutura isolada, à direita.

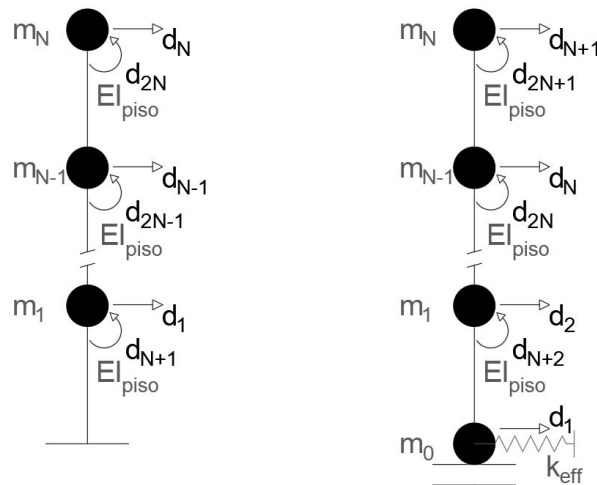


Figura 4.4: Deslocamentos independentes para estrutura tipo parede: Base Fixa e Base Isolada.

Aplicando esta teoria à superestrutura com paredes, em que os graus de liberdade são os já descritos, obtém-se a matriz $(2 \cdot N) \cdot (2 \cdot N)$ no formato da equação 4.7:

$$[K]_{(2N) \cdot (2N)} = \begin{bmatrix} \frac{12 \cdot 2i}{L^2} & -\frac{12i}{L^2} & 0 & \dots & \frac{6(i-i)}{L} & \frac{6i}{L} & 0 & \dots \\ -\frac{12i}{L^2} & \frac{12 \cdot 2i}{L^2} & -\frac{12i}{L^2} & \dots & -\frac{6i}{L} & \frac{6(i-i)}{L} & \frac{6i}{L} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & 0 & -\frac{12i}{L^2} & \frac{12i}{L^2} & \dots & 0 & -\frac{6i}{L} & -\frac{6i}{L} \\ \frac{6(i-i)}{L} & -\frac{6i}{L} & 0 & \dots & 4 \cdot 2i & 2i & 0 & \dots \\ \frac{6i}{L} & \frac{6(i-i)}{L} & -\frac{6i}{L} & \dots & 2i & 4 \cdot 2i & 2i & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & 0 & \frac{6i}{L} & -\frac{6i}{L} & \dots & 0 & 2i & 4i \end{bmatrix} \quad \text{com } i = \frac{EI}{L} \quad (4.7)$$

Para o mesmo edifício mas com isolamento de base, acresce mais um grau de liberdade de translação

ao nível do plano de isolamento, isto considerando que as paredes não rodam na base pelo binário resultante proporcionado pelos aparelhos isoladores, atingindo assim a matriz $(2 \cdot N + 1) \cdot (2 \cdot N + 1)$ no formato da equação 4.8:

$$[K]_{(2N+1) \cdot (2N+1)} = \begin{bmatrix} \frac{(K_\alpha + 12)i}{L^2} & -\frac{12i}{L^2} & 0 & \dots & \frac{6(i-i)}{L} & \frac{6i}{L} & 0 & \dots \\ -\frac{12i}{L^2} & \frac{12 \cdot 2i}{L^2} & -\frac{12i}{L^2} & \dots & -\frac{6i}{L} & \frac{6(i-i)}{L} & \frac{6i}{L} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & 0 & -\frac{12i}{L^2} & \frac{12i}{L^2} & \dots & 0 & -\frac{6i}{L} & -\frac{6i}{L} \\ \frac{6(i-i)}{L} & -\frac{6i}{L} & 0 & \dots & 4 \cdot 2i & 2i & 0 & \dots \\ \frac{6i}{L} & \frac{6(i-i)}{L} & -\frac{6i}{L} & \dots & 2i & 4 \cdot 2i & 2i & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & 0 & \frac{6i}{L} & -\frac{6i}{L} & \dots & 0 & 2i & 4i \end{bmatrix} \quad \text{com } i = \frac{EI}{L} \text{ e } K_\alpha = \frac{K_{eff} L^2}{i} \quad (4.8)$$

Como é necessário para a análise dinâmica considerar apenas os deslocamentos independentes que apresentam massa associada, recorreu-se ao método da condensação estática. Sendo a matriz de rigidez condensada para os deslocamentos horizontais dos pisos, que são os graus de liberdade onde se considerou massa. A matriz rigidez supramencionada poderá ser descrita na forma da equação 4.9, com os termos subscritos u e θ denominarem respectivamente os graus de liberdade de translação e rotação. Dispondo da equação 4.10, obtemos a matriz rigidez efetiva, \tilde{K}_u , condensada nos deslocamentos independentes horizontais ao nível dos pisos, que têm massa associada [26].

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\theta} \\ K_{\theta u} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$\tilde{K}_u = K_{uu} - K_{u\theta} K_{\theta\theta}^{-1} K_{\theta u}^T \quad (4.10)$$

Associação de Pórticos com Paredes Resistentes

Como já descrito anteriormente, os edifícios considerados são de configuração constante em altura, e considera-se os pisos rígidos no seu plano. Sendo que no modelo plano compreende que os centros de massa e de rigidez dos diversos pisos são coincidentes, conduzindo a que a estrutura apresente um comportamento plano quando sujeita a forças de massa horizontais. Os deslocamentos horizontais nos elementos paredes e nos elementos em pórtico, serão os mesmos ao nível dos pisos, ou seja, pode-se obter a matriz rigidez global pela soma da matriz de rigidez de cada sistema. Mantendo-se apenas como incógnita a razão entre a contribuição das paredes e dos pórticos que satisfará cada tipologia estrutural.

No sentido de ilustrar a associação dos pórticos com paredes resistentes, mostra-se na figura 4.5 o modelo plano de cálculo para a superestrutura. Este consiste na condensação das paredes resistentes

e dos pórticos da estrutura numa única parede e pórtico equivalente, ligadas por bielas rígidas de forma a impor os mesmos deslocamentos por piso em cada sistema. Esta associação resultará numa interação de forças entre os dois sistemas, por forma haver compatibilização de deslocamentos nos dois sistemas.

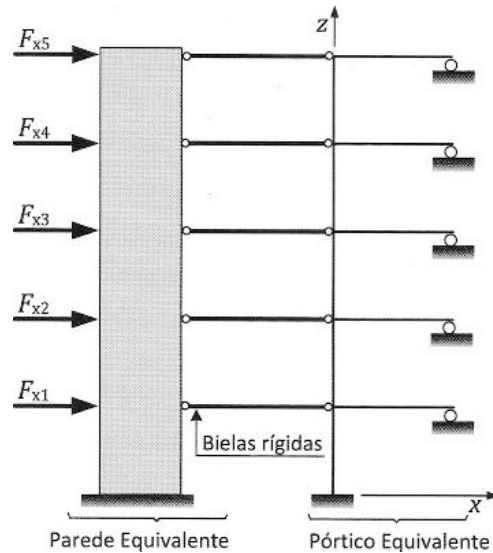


Figura 4.5: Modelo plano de cálculo com a associação de parede e pórtico equivalente, adaptado de [27]

4.3.4 Cálculo da Resposta da Estrutura

Os valores máximos da resposta da estrutura relativa às acelerações para cada modo de vibração, são dados pela equação 4.11, onde se obtém a resposta em coordenadas da estrutura, a partir da transformação em coordenadas modais.

$$\{\ddot{q}_n\}_{max} = \{\phi_n\}(\ddot{q}_{Gn})_{max} = \{\phi_n\}P_{nx}S_{ax}(p, \xi) \quad (4.11)$$

Normalização em relação à matriz de massa:

$$\{\phi_n\} = \frac{\{v_n\}}{\sqrt{\{v_n\}^T[M]\{v_n\}}} \quad (4.12)$$

Cálculo do fator de participação do modo n na direção x :

$$P_{nx} = \{\phi_n\}^T[M]\{1_x\} \quad (4.13)$$

$\{1_x\}$ vector com valores unitários nas posições correspondentes à direcção x e zero nas restantes.

4.4 Combinação Modal

Por forma a obter a resposta global da estrutura, é combinado o resultado alcançado para cada um dos modos. Com recurso a uma combinação quadrática completa (CQC), por ser a combinação mais correta [24], como se segue na equação 4.14. De forma aproximada, atende-se que o primeiro modo tem o amortecimento constante, equivalente ao sistema de isolamento de base, assumindo um valor de 15% por ser compreendido nos valores de amortecimento que atualmente se associa aos sistema de isolamento, e os restantes modos o amortecimento da superestrutura de betão, 5%.

$$E_E = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^N \rho_{in} E_{Ei} E_{En}} \quad (4.14)$$

$$\rho_{in} = \frac{8\xi^2(1 + \beta_{in})\beta_{in}^{\frac{3}{2}}}{(1 - \beta_{in}^2)^2 + 4\xi^2\beta_{in}(1 + \beta_{in})^2} \quad (4.15) \quad \beta_{in} = \frac{p_i}{p_n} \quad (4.16)$$

E_E é o efeito da ação sísmica, E_{Ei} e E_{En} são, respetivamente o efeito da ação sísmica para os modos i e n e ρ_{in} é o coeficiente de correlação entre os modos i e n

4.5 Tipologias Estruturais

No estudo, foram consideradas quatro tipologias estruturais: sistema porticado, sistema misto equivalente a sistema porticado, sistema misto equivalente a paredes e sistema de paredes. Na tabela 4.1 especifica-se em cada caso de estudo a percentagem de força de corte basal, retida em cada conjunto estrutural pórticos e paredes, de acordo com o limite da definição de cada tipologia segundo o Eurocódigo 8. Denomina-se os elementos paredes por w e os elementos pilares por p .

Tabela 4.1: Tipologias Estruturais do estudo.

Tipologia Estrutural	% $\frac{V_p}{V_p + V_w}$	% $\frac{V_w}{V_p + V_w}$
Pórtico	80	20
Misto equivalente a Pórtico	60	40
Misto equivalente a Parede	40	60
Parede	20	80

Cada tipologia foi construída usando uma razão entre a soma das inércias dos elementos pilares e os elementos paredes $n = \sum I_w / \sum I_p$. Obtendo a matriz rigidez global da estrutura pela soma da matriz rigidez dos elementos pilares em função de $\sum I_p$, com a matriz rigidez dos elementos parede em função de $\sum I_w = n \cdot \sum I_p$. Desta forma, a totalidade da rigidez por piso é dada pela expressão 4.17.

$$I_{piso} = \sum I_p + \sum I_w = \sum I_p \cdot (1 + n) \quad (4.17)$$

Sendo este um método iterativo, e por forma a iniciar o cálculo é atribuída um valor de rigidez

horizontal por piso, e varia-se o parâmetro n até que a força de corte basal medida em cada sistema estrutural, pórtico e parede, satisfaça cada tipologia estrutural mencionada.

Primeiramente, é necessário obter os deslocamentos globais da estrutura, que são os mesmos deslocamentos em cada sistema estrutural, permitindo assim, calcular as forças horizontais em cada piso pelas equações 4.18 e 4.19. Desta forma, começa-se por calcular a matriz flexibilidade da estrutura, pelo o inverso da matriz rigidez global, e aplicando uma carga triangular invertida unitária, obtêm-se os deslocamentos globais da estrutura, $[U]_{global}$.

Seguidamente calcula-se o vetor de forças transversais ao nível de cada piso, $\{V\}$, e fazendo a soma algébrica deste vetor resulta a força de corte basal na base para cada componente da estrutura. O código deste processo de cálculo encontra-se no Anexo A.

$$\{V\}_p = [K]_p \cdot [U]_{global} \quad (4.18)$$

$$\{V\}_w = [K]_w \cdot [U]_{global} \quad (4.19)$$

Recorrendo à metodologia descrita, e por iterações, foi-se variando o parâmetro n , até se atingir a repartição desejada de força de corte basal em cada sistema pórtico e parede, para cada tipologia estrutural e para o número de pisos de 2, 4, 7 e 10. Chegando à razão entre as somas de inércia, $n = \sum I_w / \sum I_p$, que satisfaz cada caso, sendo apresentado os respetivos valores de n na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Razão entre as somas das inércias dos pórticos e paredes, $n = \sum I_w / \sum I_p$, por forma a satisfazer cada tipologia estrutural com um dado número de pisos.

Sistema estrutural	% $\frac{V_p}{V_p+V_w}$	% $\frac{V_w}{V_p+V_w}$	<i>NPisos</i>	$n = \sum I_w / \sum I_p$
Pórtico	80	20	2	0,657
			4	0,785
			7	0,818
			10	0,827
Misto equivalente a Pórtico	60	40	2	2,123
			4	2,638
			7	2,839
			10	2,899
Misto equivalente a Parede	40	60	2	6,48
			4	8,03
			7	9,22
			10	9,67
Parede	20	80	2	24,56
			4	33,92
			7	42,01
			10	46,99

4.6 Algoritmo de Cálculo

Por forma a satisfazer o grau de generalidade pretendido para o estudo em questão, foi programado em *Python* um algoritmo que calcula a matriz rigidez de um edifício isolado genérico, realiza a análise modal e obtém a resposta sísmica da estrutura.

O cálculo da matriz rigidez da estrutura isolada é realizado primeiro pela obtenção da rigidez por piso do edifício, com um número de pisos N e uma tipologia estrutural definida pelo parâmetro n , partindo do período de fundamental da superestrutura, T_f , considerando-a de base fixa, compõe a matriz rigidez da estrutura fixa com a variável EI_{piso} como incógnita. De forma a obter o valor da rigidez por piso que satisfaça o período fundamental fixo pretendido, o algoritmo constrói a equação $([K] - p^2[M])$, varia a rigidez por piso e para cada valor calcula o determinante da equação, quando o determinante iguala a zero é verificado se o primeiro valor próprio da equação, T_1 , corresponde ao período fixo de entrada, isto porque pode haver um valor próprio que não o primeiro que iguala o T_f , o que corresponderia a uma estrutura mais flexível do que a pretendida, caso isso aconteça é voltada à iteração inicial somando um acréscimo ao valor do EI_{piso} calculado. Quando é obtido um valor de rigidez por piso em que corresponde o primeiro valor próprio, T_1 , com o valor iniciado como período fundamental fixo, T_f , é verificado assim o valor de EI_{piso} que satisfaz o caso particular. É exemplificado na figura 4.6 o fluxograma deste primeiro algoritmo do processo de cálculo.

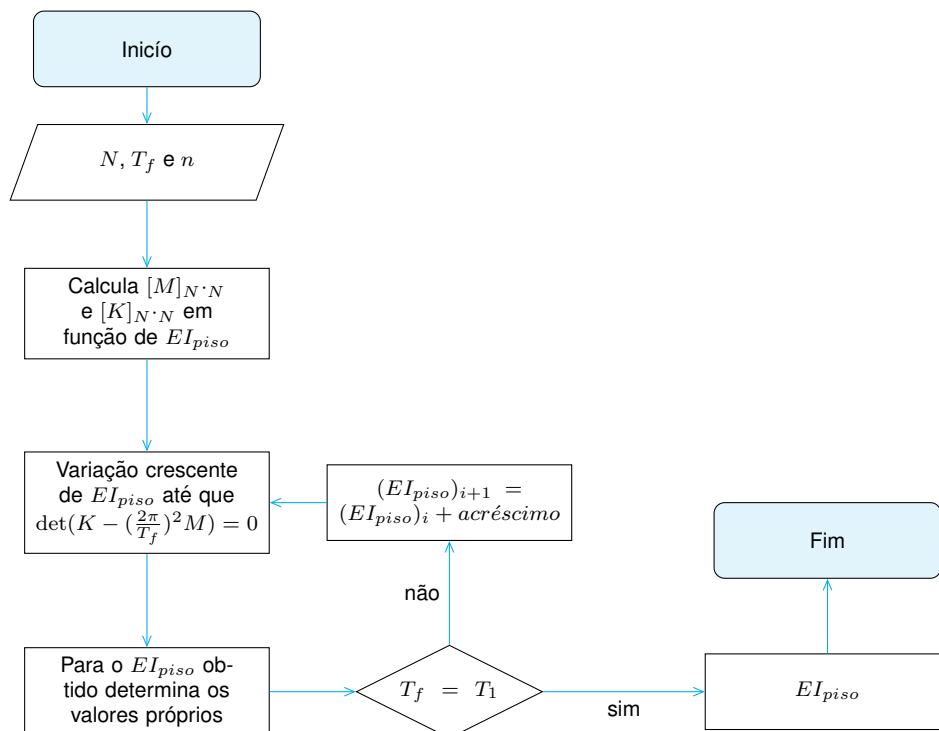


Figura 4.6: Fluxograma do procedimento de cálculo, para obtenção da rigidez por piso.

Então, obtido o EI_{piso} , que satisfaz um período fundamental para a superestrutura considerando de base fixa T_f , e para um período da estrutura com isolamento de base T_{eff} , é possível obter a matriz rigidez da estrutura isolada calculando a rigidez efetiva do isolamento K_{eff} , sendo o T_{eff} função da

equação 4.20 atingindo a equação 4.21:

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{M_{total}}{K_{eff}}} \quad (4.20)$$

$$K_{eff} = \frac{(N + 1) \cdot m}{\left(\frac{T_{eff}}{2\pi}\right)^2} \quad (4.21)$$

Com isto, é calculada a matriz rigidez da estrutura com isolamento de base com o K_{eff} , EI_{piso} , para um número de pisos N e para uma certa tipologia estrutural definida pelo parâmetro n . Tendo como principais parâmetros o período fundamental efetivo T_{eff} e a razão entre períodos $\frac{T_{eff}}{T_f}$. É possível calcular a resposta sísmica da estrutura, nomeadamente os modos de vibração, os factores de participação modal, os períodos dos modos superiores, realizar a análise modal e fazer a combinação quadrática completa.

4.7 Estudo de Sensibilidade

4.7.1 Considerações Iniciais

Por forma a compreender o efeito de todas as variáveis no resultado final da aceleração de cálculo, no topo do edifício, é feita uma análise de sensibilidade sobre o efeito do número de pisos e da tipologia estrutural na valor da amplificação da aceleração num edifício com isolamento de base. Separa-se os efeitos da amplificação global, que se denomina de β_{global} , em duas componentes: amplificação espectral, β_1 , e amplificação devido à contabilização dos modos superiores, β_2 .

Desta forma, pretende-se chegar a um resultado final da máxima aceleração, entrando com a aceleração espectral calculada apenas para o modo fundamental, e corrigir-la com o factor de amplificação, β_1 , que traduz a diferença entre a aceleração espectral e a aceleração no topo. E seguidamente, tendo a aceleração no último piso do edifício, multiplicar por mais um factor, β_2 , que contabiliza o acréscimo devido ao cálculo da aceleração no topo combinando todos os modos relativamente à solução calculada anteriormente que só contabiliza o efeito do modo fundamental.

Cada curva nos gráficos apresentados, são uma aproximação contínua de 50 resultados discretos, igualmente espaçados entre os valores limites da abcissa de cada gráfico.

4.7.2 Amplificação Espectral (β_1)

Primeiramente, estuda-se o efeito que há entre aceleração de entrada, a aceleração espectral para o período fundamental, e a máxima aceleração que efetivamente se regista para o primeiro modo. Ao entrar no espectro de resposta elástico, o valor obtido da aceleração é o valor espectral, ou seja, a aceleração equivalente aplicada num sistema de um grau de liberdade com o mesmo período de vibração do modo fundamental do edifício. Consequentemente, a máxima aceleração sentida no edifício não é a aceleração espectral, mas sim a aceleração no último piso. Para obter a aceleração máxima

é necessário realizar a análise modal, e multiplicar a aceleração espectral pelo factor de participação modal desse modo, e pela amplitude modal no piso considerado, neste caso o último piso, por corresponder a um maior valor. No sentido de ilustrar este problema, afigura-se abaixo na figura 4.7 o modelo considerado.

Está-se a denominar esta amplificação como sendo a amplificação espectral β_1 , e o seu cálculo é feito através da equação 4.22.

$$\beta_1 = P_{1x}\phi_{1n} \quad (4.22)$$

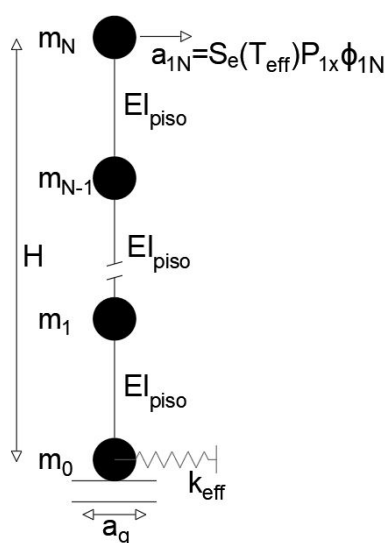


Figura 4.7: Modelo Amplificação Espectral (β_1)

Refere-se que neste estudo em particular, a ação sísmica não é relevante. O cálculo do sistema de 1 grau de liberdade e a realização da análise modal apenas depende de características físicas e dinâmicas do edifício.

Com o intuito de avaliar a variação desta componente de amplificação β_1 , no valor final da aceleração de cálculo, considera-se vários casos de estudo. Foi usado modelos com diferentes números de pisos, 2, 4, 7 e 10 pisos, e com as diferentes tipologias estruturais. Este estudo dividiu-se em duas partes, primeiro a análise da influência do número de pisos, para os casos separadas da tipologia em pórtico e em parede, por serem os extremos das 4 tipologias consideradas. Seguidamente, estudou-se a influência da tipologia estrutural, considerando as 4 referidas, fixando o número de pisos em 4.

Os resultados da amplificação espectral obtidos estão em função de $\frac{T_{eff}}{T_f}$, por ser a principal medida de eficácia de um edifício sísmicamente isolado, enfatizando-se que este parâmetro é o único relevante, na medida em que estamos a medir um valor relativo, o valor da máxima aceleração sobre o valor espectral. Dois edifícios com T_f diferentes mas com a mesma razão $\frac{T_{eff}}{T_f}$, correspondem a ter um valor da aceleração no topo do edifício diferentes, mas o relevante no estudo, é a diferença entre a máxima aceleração e a de entrada, aceleração espectral, que será igual em ambos.

Variação do número de pisos - Pórtico

Apresentam-se na figura 4.8 os valores da amplificação espectral, β_1 , em função de T_{eff}/T_f para uma estrutura com tipologia equivalente a pórtico e variando o número de pisos em 2, 4, 7 e 10. Na tabela 4.3 indicam-se os parâmetros do factor de participação modal e a amplitude modal no último piso, N , para o caso particular de $T_{eff}/T_f=3$, de modo a interpretar os resultados obtidos.

Observa-se existir uma redução da amplificação espectral com o aumento do número de pisos, sendo que, um menor número de pisos corresponde a um maior factor de amplificação, para a tipologia equivalente a Pórtico. Analisando os dados da tabela 4.3, constata-se que com o incremento do número de pisos, o factor de participação modal do primeiro modo aumenta significativamente. Em sintonia, a amplitude modal no último piso decresce de forma mais significativa, conduzindo a menores factores de amplificação espectral.

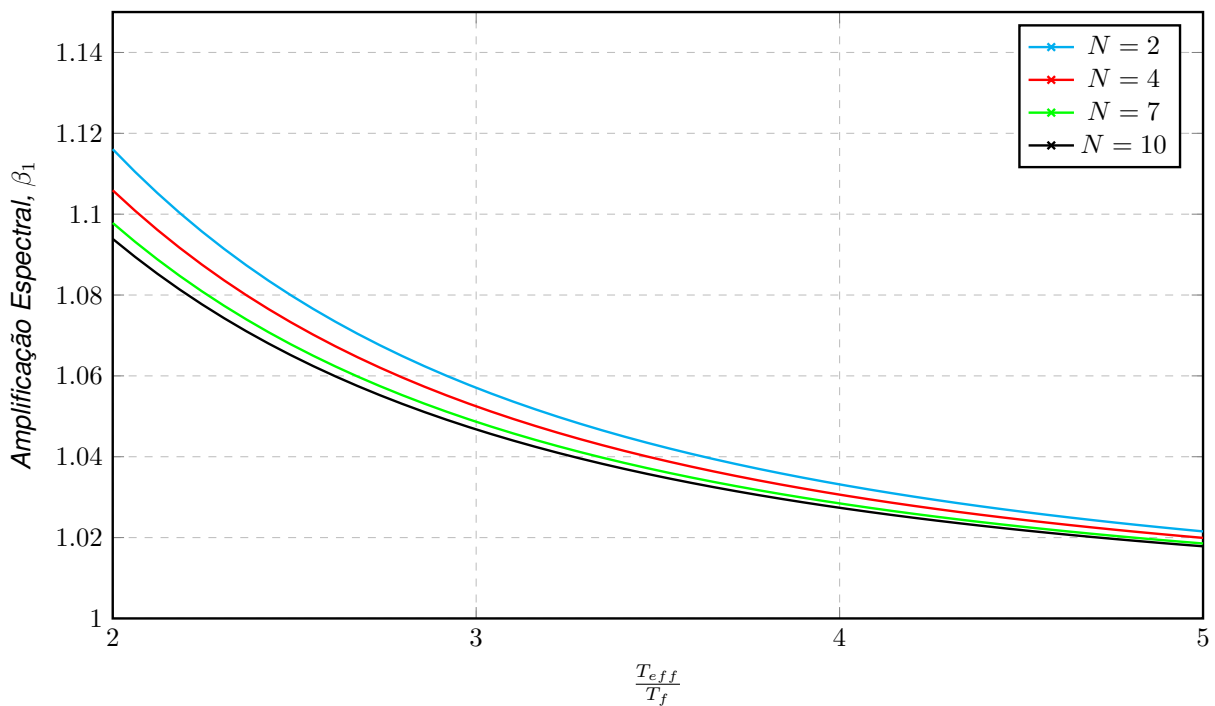


Figura 4.8: Factor de amplificação β_1 em função de T_{eff}/T_f , para sistema porticado variando o número de pisos.

Tabela 4.3: Dados Modais e valor de β_1 , para a tipologia pórtico com variação número de pisos e $T_{eff}/T_f = 3$.

$T_{eff}/T_f=3$	N=2	N=4	N=7	N=10
M (ton)	1500	2500	4000	5500
H (m)	6,4	12,8	22,4	32
P_{1x}	38,68	49,94	63,18	74,09
ϕ_{1n}	0,0273	0,0211	0,0166	0,0141
β_1	1,057	1,052	1,049	1,047

Variação do número de pisos - Parede

Seguindo o mesmo raciocínio, indicam-se na figura 4.9 os valores da amplificação espectral, β_1 , em função de T_{eff}/T_f para uma estrutura com tipologia equivalente a parede e variando o número de pisos em 2, 4, 7 e 10. Na tabela 4.4 observa-se os parâmetros do factor de participação modal e a amplitude modal no último piso, N , para o caso particular de $T_{eff}/T_f=3$, de forma a justificar os resultados obtidos.

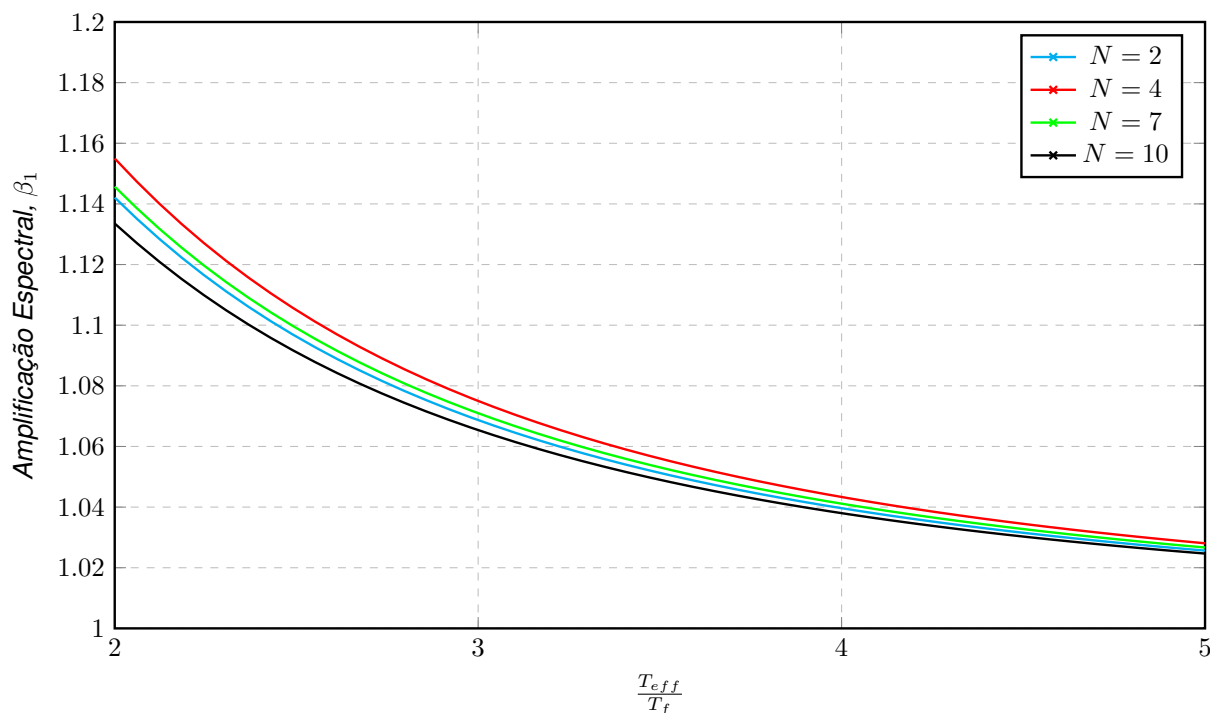


Figura 4.9: Factor de amplificação β_1 em função de T_{eff}/T_f , para sistema parede variando o número de pisos.

Tabela 4.4: Dados Modais e valor de β_1 , para a tipologia parede com variação número de pisos e $T_{eff}/T_f = 3$

$T_{eff}/T_f=3$	N=2	N=4	N=7	N=10
M (ton)	1500	2500	4000	5500
H (m)	6,4	12,8	22,4	32
P_{1x}	38,67	49,93	63,17	74,07
ϕ_{1n}	0,0276	0,0215	0,0169	0,0144
β_1	1,069	1,075	1,071	1,065

Como se observa os valores das curvas da amplificação espectral não acompanha o incremento do número de pisos. A curva de maior amplificação corresponde ao caso do número de pisos igual a 4, e o caso de menor amplificação resume-se à curva de 10 pisos. Analisando os dados da tabela 4.4, constata-se que com o incremento do número de pisos, o factor de participação modal do primeiro modo varia de forma semelhante ao revelado anteriormente para a tipologia equivalente a pórtico. O que explica esta variação distinta entre a variação do número de pisos e o valor de amplificação espectral, são os valores da amplitude modal, que continuam a diminuir com o aumento do número de pisos, mas não na mesma proporção. De salientar que os resultados apresentados na tabela são

valores arredondados, e que no programa de cálculo são contabilizadas mais casas decimais, que para os valores da amplitude modal é relevante no cálculo do valor de amplificação final.

Como observado nos gráficos 4.8 e 4.9, a influência da variável número de pisos tem pouco significado na amplificação, no modo fundamental da aceleração.

Varição da tipologia estrutural - N=4

Representa-se na figura 4.10 os valores da amplificação espectral, β_1 , em função de T_{eff}/T_f variando a tipologia estrutural nas quatro consideradas no estudo, e devido à pequena variância do número de pisos no valor de amplificação, fixa-se o número de pisos em 4, correspondente a maiores valores para a tipologia tipo parede e a segunda maior para a tipologia tipo pórtico. Na tabela 4.5 apresenta-se os parâmetros do factor de participação modal e a amplitude modal no último piso, N , para o caso particular de $T_{eff}/T_f=3$, de forma a justificar os resultados obtidos.

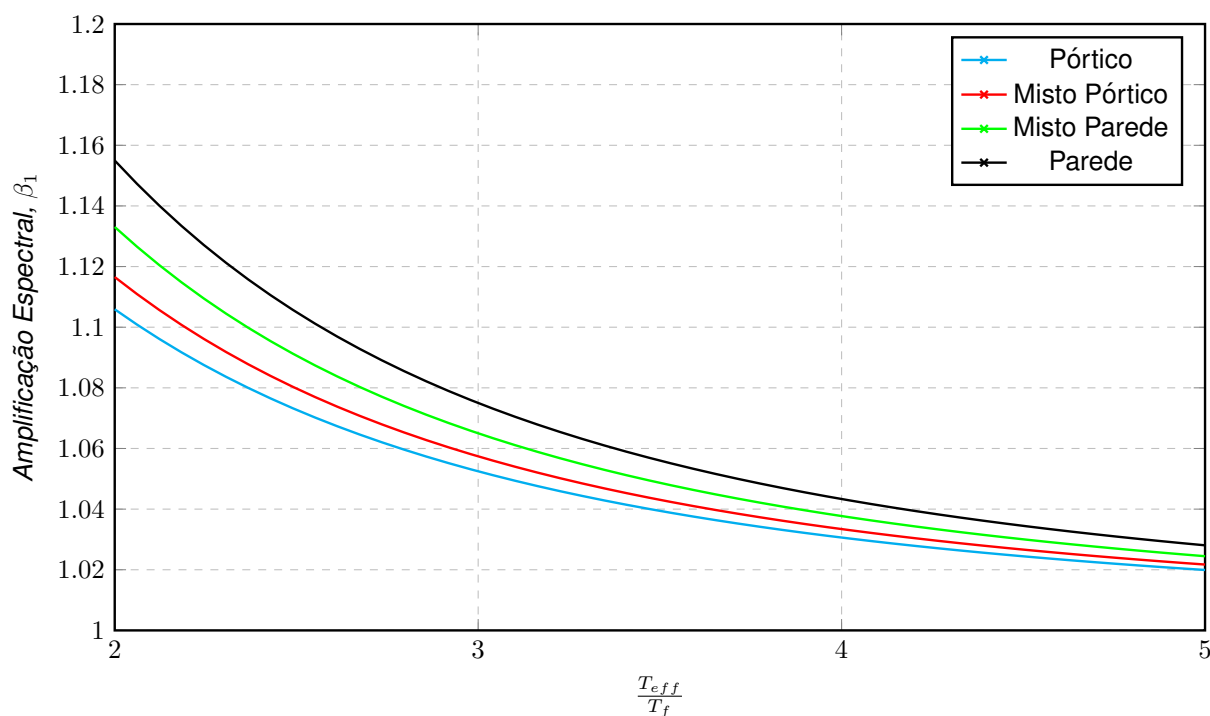


Figura 4.10: Factor de amplificação β_1 em função de T_{eff}/T_f , para edifício com 4 pisos e variando a tipologia estrutural.

Tabela 4.5: Dados Modais e valor de β_1 , para N=4 com variação da tipologia estrutural e $T_{eff}/T_f = 3$.

$T_{eff}/T_f=3$	Pórtico	Misto Pórtico	Misto Parede	Parede
M (ton)	2500	2500	2500	2500
H (m)	12,8	12,8	12,8	12,8
P_{1x}	49,94	49,94	49,94	49,93
ϕ_{1n}	0,0211	0,0212	0,0213	0,0215
β_1	1,052	1,057	1,065	1,075

Como esperado, no gráfico 4.10 é perceptível a influência das paredes na amplificação da aceleração. Com o aumento da inércia das paredes nas tipologias estruturais consideradas, há um aumento da amplificação da aceleração em altura. O valor desta amplificação passa dos 5,2% da tipologia porticado para 7,5% para a tipologia equivalente a parede, para o caso de T_{eff}/T_f igual a 3. Isto deve-se ao comportamento que as paredes têm na deformada global da estrutura, que faz com que a amplitude modal incremente com o aumento da influência das paredes, observado na tabela 4.5.

4.7.3 Efeito dos Modos Superiores (β_2)

Ao se considerar a aceleração espectral do primeiro modo não se está a ter em conta o acréscimo que é contabilizado pelos modos superiores. Desta forma, fez-se a análise da sua influência no valor final da aceleração no topo do edifício. Para isso, mediu-se a aceleração no topo do edifício combinada, calculada fazendo uma combinação quadrática completa, e a aceleração no topo para o primeiro modo. Assim, dividindo a aceleração combinada, a_N^{CQC} , pela aceleração relativa apenas ao modo fundamental, a_N^{modo1} , obtém-se o factor de amplificação, denominado de β_2 , ver equação 4.23.

$$\beta_2 = \frac{a_N^{CQC}}{a_N^{modo1}} \quad (4.23)$$

Na avaliação desta componente de amplificação, não só a razão T_{eff}/T_f tem influência como o próprio valor de T_{eff} é relevante nos resultados. Portanto, foi fixado o período efetivo em 2s e 3s, por $T_{\text{eff}}=3s$ ser um limite imposto pelo EC8 [2] para uma análise simplificada e $T_{\text{eff}}=2s$ por ser esperado valores iguais ou superiores a este para edifícios correntes com isolamento de base. Ao fixarmos o período fundamental isolado, avalia-se o peso de todos os modos, variando o número de pisos e a tipologia estrutural. Isto irá permitir prever a aceleração para a combinação de todos os modos, entrando apenas com o período efetivo.

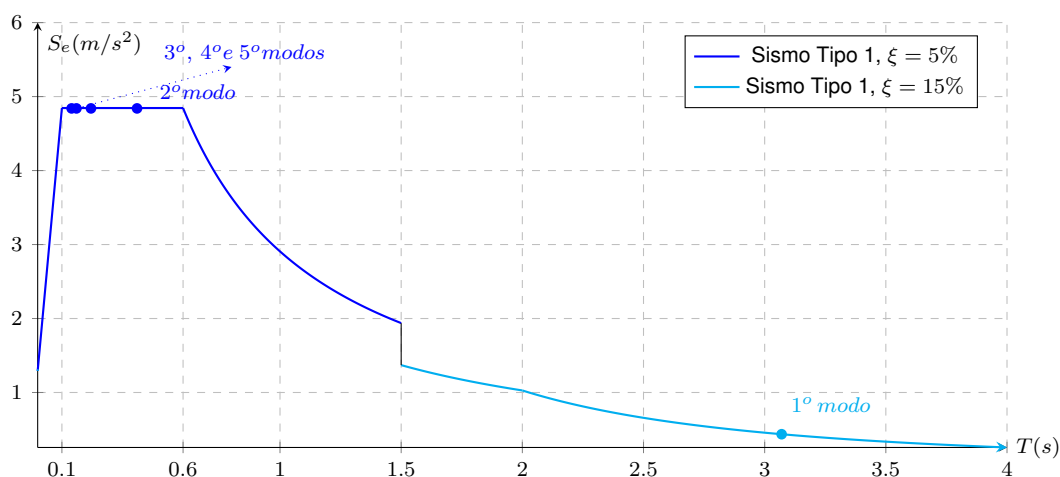


Figura 4.11: Espectro de Resposta: Sismo Tipo 1

Ilustra-se na figura 4.11 a forma do espectro modificado para o sismo Tipo 1 utilizada na análise, neste exemplo específico com os dados sísmicos da zona de Lisboa, para um edifício com classe de

importância II e um terreno do tipo B. No exemplo ilustrado tem-se um edifício isolado com 4 pisos, portanto com 5 modos de vibração e com um T_{eff} de 3s e um T_f de 1s. Assiste-se que o período fundamental é ligeiramente superior ao T_{eff} , devido a uma certa flexibilidade da superestrutura. A aceleração espectral calculada para o primeiro modo, resulta da correção do espectro com um amortecimento de 15% pela multiplicação do espectro pelo coeficiente de correção do amortecimento, η , e os valores espectrais dos modos superiores são calculados usando o espectro com 5% de amortecimento. Nota-se o afastamento entre o primeiro e os restantes modos no espectro, sendo que os modos superiores estacionam no patamar de pico do mesmo, onde se associa maiores valores espectrais. O que também irá pesar no valor final será o factor de participação modal de todos os modos, em que os modos superiores terão um valor muito mais reduzido em relação ao do primeiro modo, isto é, na essência o modo fundamental é o que tem maior peso no valor final, mas haverá um acréscimo devido à contabilização de todos os modos de vibração.

Nesta análise, é fixado o período fundamental efetivo, de forma a estudar a influência da variação dos modos superiores. Primeiramente estudou-se para a tipologia tipo parede, a influência da variação do número de pisos. Consecutivamente para um número de pisos fixo, variou-se a tipologia estrutural para perceber o seu efeito nos resultados. Esta análise foi realizada para dois valores de T_{eff} : 2s e 3s.

No que toca à ação sísmica usada, referente ao Eurocódigo 8, não foi considerado no estudo o sismo tipo 2, por se concluir que a diferença de resultados de amplificação, β_2 com a do sismo tipo 1, não seria relevante. Portanto, a análise segue com valor de amplificação para o sismo afastado, mas na forma de cálculo final, onde se entra com o cálculo da aceleração espectral, impondo-se fazer o cálculo para os dois tipos de sismos, e usar o máximo dos valores obtidos de cada tipo de sismo.

Variação do número de pisos - Parede - $T_{eff} = 2s$

Na figura 4.12 são apresentados os valores da amplificação tendo em conta o efeito dos modos superiores, β_2 , em função de T_{eff}/T_f , variando o número de pisos em 2, 4, 7 e 10 para a tipologia equivalente a parede e um período efetivo fixo de 2s para todos os osciladores.

Constata-se da figura 4.12 que para T_{eff} igual a 2s, e com referência aos valores de T_{eff}/T_f superiores a 3, não há uma considerável diferença ao contabilizar os modos superiores no valor da aceleração no topo para a tipologia tipo parede, que para T_{eff}/T_f igual a 3 têm-se valores na ordem dos 6% de aumento, o que por si só é de pouca relevância. A curva relativa ao caso de 2 pisos apresenta menores valores, justificando-se por conter menos modos, 3 no total, e em comparação com as restantes curvas com mais modos de vibração, conduz a uma menor diferença.

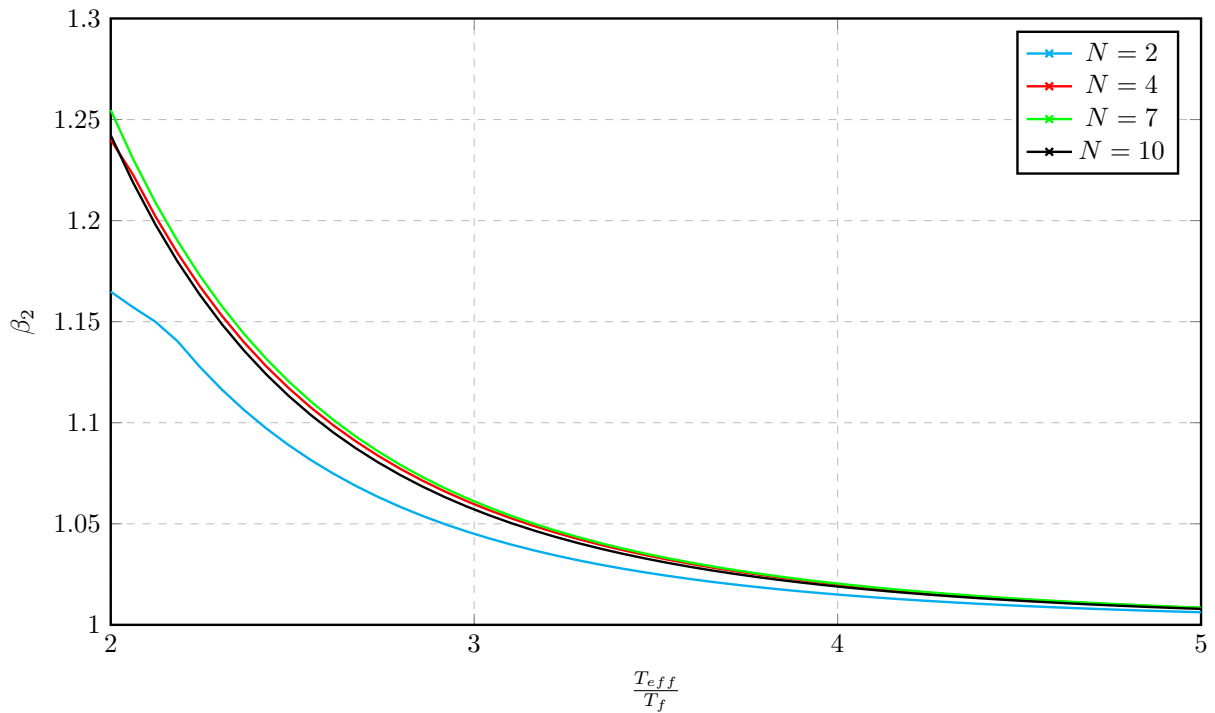


Figura 4.12: Factor de amplificação β_2 para sistema parede com $T_{eff} = 2s$ e variando o número de pisos.

Variação do número de pisos - Parede - $T_{eff} = 3s$

De forma semelhante na figura 4.13 os valores da amplificação tendo em conta o efeito dos modos superiores, β_2 , em função de T_{eff}/T_f , variando o número de pisos em 2, 4, 7 e 10 para a tipologia equivalente a parede mas agora para um período efetivo de 3s.

Da figura 4.13 apreende-se o já esperado, agora ao considerar um T_{eff} de 3s, conduz a maiores valores de amplificação. Isto explica-se essencialmente por se estar a fixar o primeiro modo mais à direita no espectro de resposta, o que induz a que diferença dos valores espectrais do primeiro modo para os restantes é superior. Continua a haver um afastamento da curva referente aos 2 pisos, pela mesma razão já explicada. Para um T_{eff}/T_f igual a 3, temos valores que podem chegar aos 30% de amplificação, para a curva de 7 pisos, o que já se considera relevante no valor final da aceleração de cálculo.

De notar os pontos de inflexão nas curvas, que se explica por a partir de uma certa razão T_{eff}/T_f , um ou mais dos modos superiores de maior peso no valor final da aceleração combinada, deixa de estar estacionado no patamar de pico do espectro de resposta, sendo-os associados um menor valor espectral.

Para um edifício isolado corrente, é de esperar que o seu T_{eff} esteja compreendido entre 2 e 3s. Como se conclui, a diferença das curvas referentes aos $T_{eff}=2s$ para as dos 3s é significativa, portanto considerar os valores de amplificação para $T_{eff}=3s$ é conservativo.

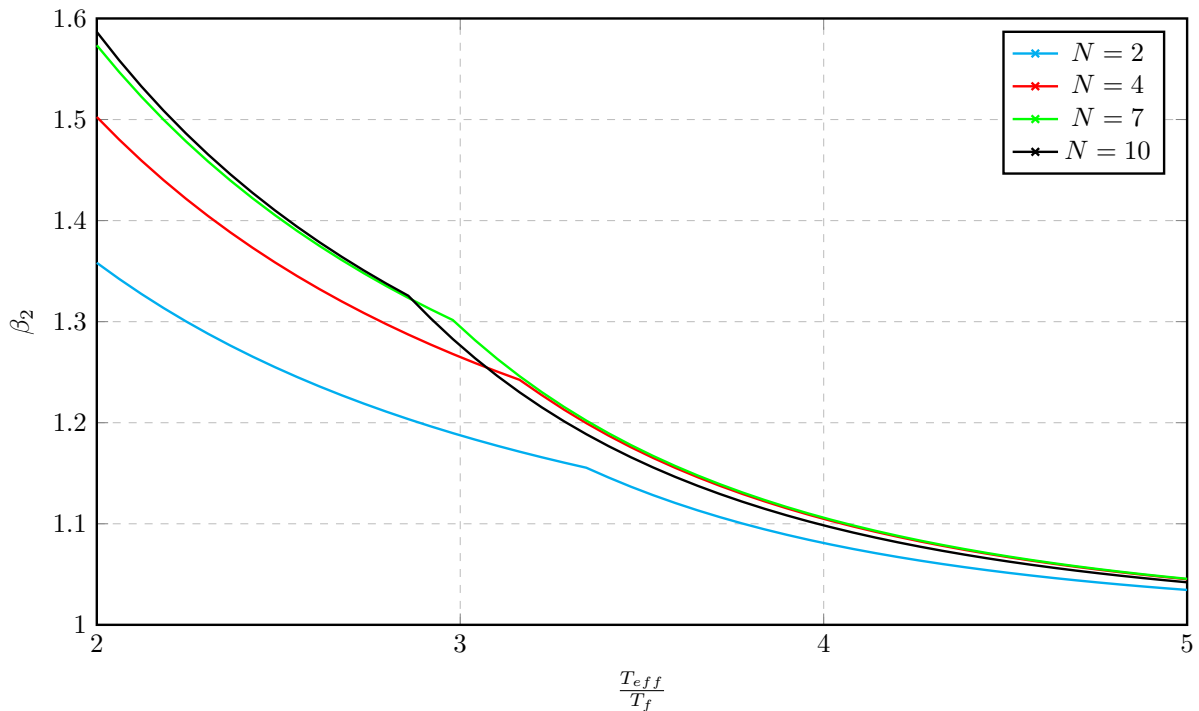


Figura 4.13: Factor de amplificação β_2 para sistema parede com $T_{eff} = 3s$ e variando o número de pisos.

Varição da Tipologia Estrutural - N=4 - $T_{eff} = 3s$

Na figura 4.14, compara-se as quatro tipologias estruturais fixando o número de pisos em 4. Apesar de o valor de β_2 ser mais desfavorável para o número de pisos igual a 7 utiliza-se igual a 4, porque se irá concluir mais à frente que é o caso que corresponde a maiores valores de amplificação global, e o período efetivo é igual a 3s, que como concluído é a que leva a maiores valores de β_2 .

Constata-se que há um aumento da aceleração combinada em relação à aceleração calculada pelo primeiro modo, com o acréscimo da inércia das paredes resistentes. O aumento da inércia das mesmas induz a que os fatores de participação modal dos modos superiores sejam mais elevados, ou seja, a amplitude destes modos terá um maior peso em relação às tipologias com menor área de paredes.

Pode afirmar-se que os casos referentes à tipologia tipo parede e usar um T_{eff} de 3s, são os casos mais desfavoráveis na amplificação que tem em conta os modos superiores, β_2 , portanto a mais conservativa. De referir que a aceleração espectral para T_{eff} de 3s é cerca de 45% da aceleração espectral para T_{eff} de 2s, explica-se com o andamento do espectro de resposta entre os 2 e 4s, o valor espectral varia com o inverso do quadrado do período.

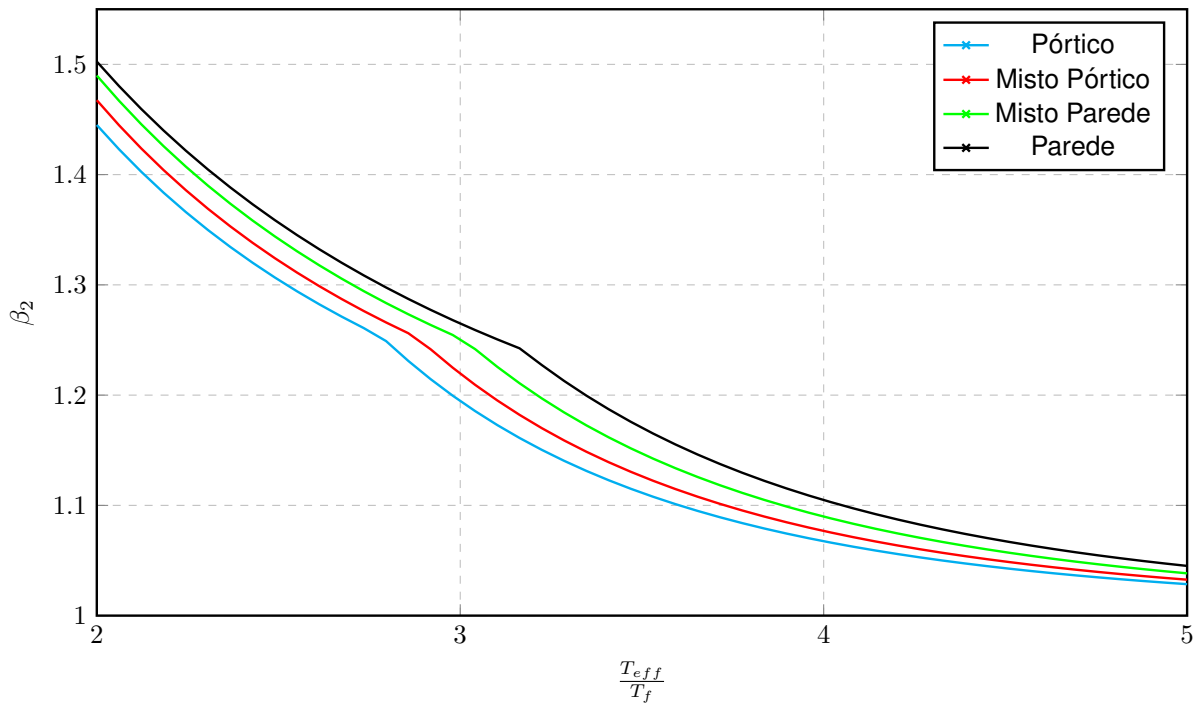


Figura 4.14: Factor de amplificação β_2 com $T_{eff} = 3s$ e $N=4$ variando a tipologia estrutural.

4.8 Amplificação Global da Aceleração

4.8.1 Considerações Iniciais

Nesta secção apresenta-se os resultados globais do coeficiente de amplificação da aceleração, tendo em conta a amplificação espectral e o efeito dos modos superiores. Considera-se as quatro tipologias usadas e fixou-se novamente o T_{eff} em 2 e 3s e o número de pisos em 4, que como visto na secção anterior corresponde à situação mais desfavorável, conservativa.

O resultado da amplificação global, β_{global} , pode-se descrever na equação 4.24, como a multiplicação da amplificação espectral, β_1 , pela amplificação da contabilização do efeito de todos os modos, β_2 .

$$\beta_{global} = \beta_1 \cdot \beta_2 \quad (4.24)$$

4.8.2 Resultados Globais

Apresenta-se na presente subsecção os resultados da amplificação global, obtidos fixando o número de pisos em 4, e variando a tipologia estrutural, para um amortecimento equivalente de 15%. Posteriormente analisa-se os resultados para diferentes coeficientes de amortecimento equivalente para edifícios isolados, considerados os valores de 10%, 15% e 20%. Apresenta-se mais uma vez os resultados para T_{eff} igual a 2 e 3s, onde estes dois valores são relevantes na contabilização dos modos superiores mas não na componente da amplificação espectral, que só depende da razão T_{eff}/T_f .

Variação da Tipologia Estrutural - N=4 - $T_{eff} = 2s$

Retrata-se na figura 4.15 as curvas referentes às quatro tipologias estruturais para o factor de amplificação global em função de T_{eff}/T_f e fixando o T_{eff} em 2s.

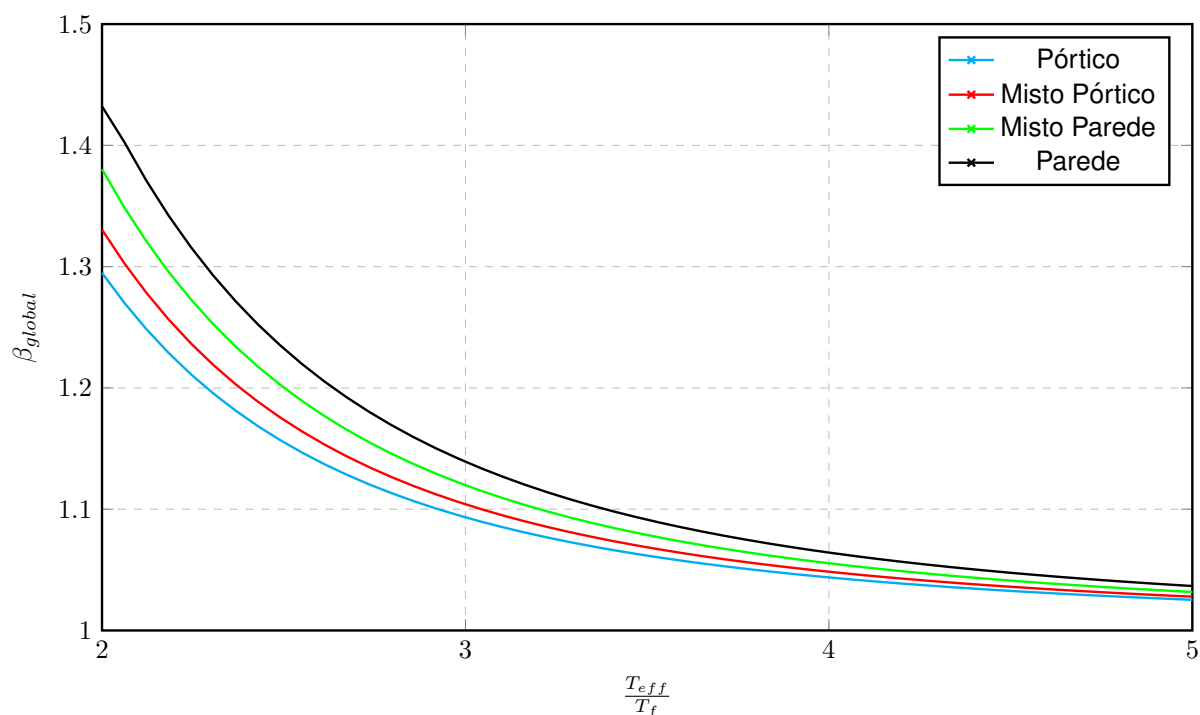


Figura 4.15: Factor de amplificação Global com $T_{eff} = 2s$ e N=4 variando a tipologia estrutural.

Como esperado, como o factor de amplificação β_1 quer o β_2 levam a valores mais elevados com o aumento da participação das paredes, em que o mesmo acontece para o factor de amplificação global. Sendo para um $T_{eff}/T_f=3$, para a tipologia tipo pórtico temos um valor de cerca de 9% e para a tipologia tipo parede de 14% de amplificação global.

Variação da Tipologia Estrutural - N=4 - $T_{eff} = 3s$

Ilustra-se na figura 4.16 as curvas referentes às quatro tipologias estruturais para o factor de amplificação global em função de T_{eff}/T_f e agora fixando o T_{eff} em 3s.

De forma semelhante ao descrito na figura anterior, os resultados da figura 4.16 apresentam o mesmo andamento com a variação da tipologia estrutural, mas com valores de amplificação mais elevados, como já concluído anteriormente com a componente da amplificação que tem em conta os modos superiores é mais elevada para um T_{eff} de 3s. Para um $T_{eff}/T_f=3$ a tipologia tipo pórtico apresenta um resultado de 25,8% e a tipologia tipo parede cerca de 36% de amplificação global.

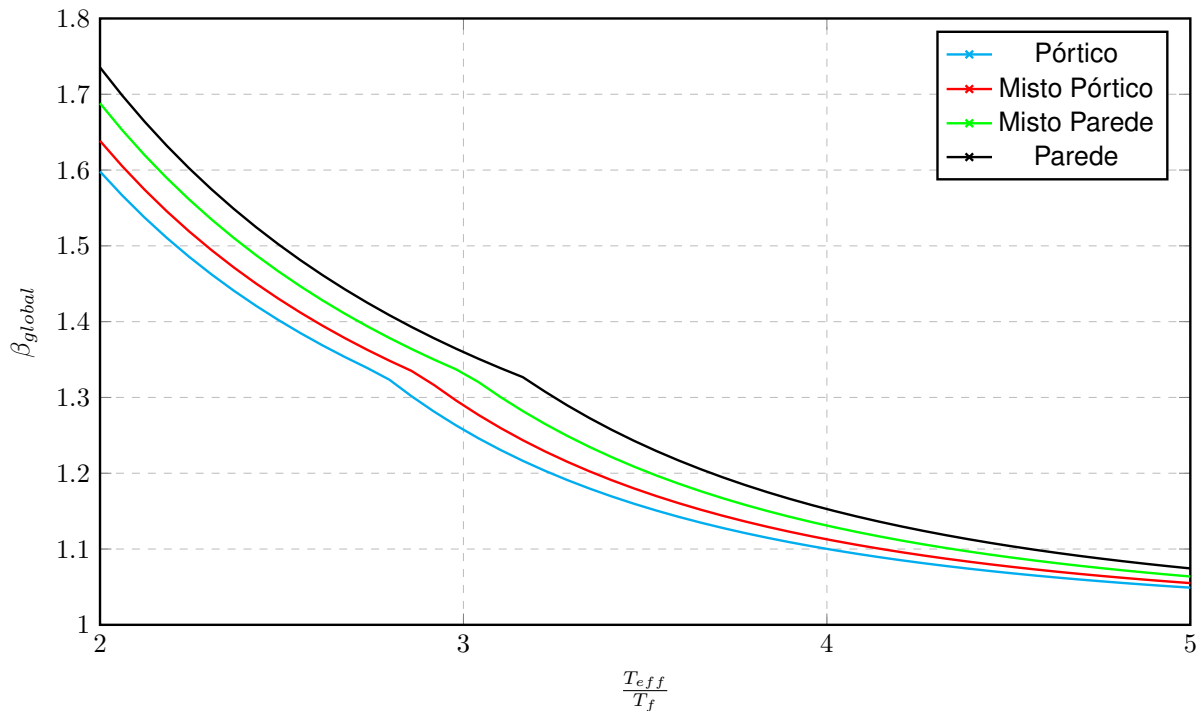


Figura 4.16: Factor de amplificação Global com $T_{eff} = 3s$ e $N=4$ variando a tipologia estrutural.

Variação do Coeficiente de Amortecimento

De forma a avaliar a influência do coeficiente de amortecimento equivalente associado ao sistema de isolamento, estudou-se a sua variação. Esta variação do amortecimento apenas influencia na componente que contabiliza o efeito dos modos superiores. Desta forma, apresenta-se na figura 4.17 os valores da amplificação globais, β_{global} , em função de T_{eff}/T_f , variando o amortecimento equivalente do sistema de isolamento em 10%, 15% e 20%, para a tipologia equivalente a parede e um período efetivo fixo de 3s.

Por observação da figura 4.17, nota-se um claro efeito deste parâmetro no valor do factor de amplificação. Como dito, esta variação apenas influencia a componente do factor de amplificação que contabiliza todos os modos. Como o primeiro modo de vibração está associado o coeficiente de amortecimento, pela correção do espectro de resposta, um maior amortecimento leva a um menor valor espectral para o primeiro modo, sendo que os restantes não são afetados por serem os associados a um amortecimento da superestrutura, 5%. Por isso há uma maior diferença do modo fundamental para os superiores, com o aumento desta variável.

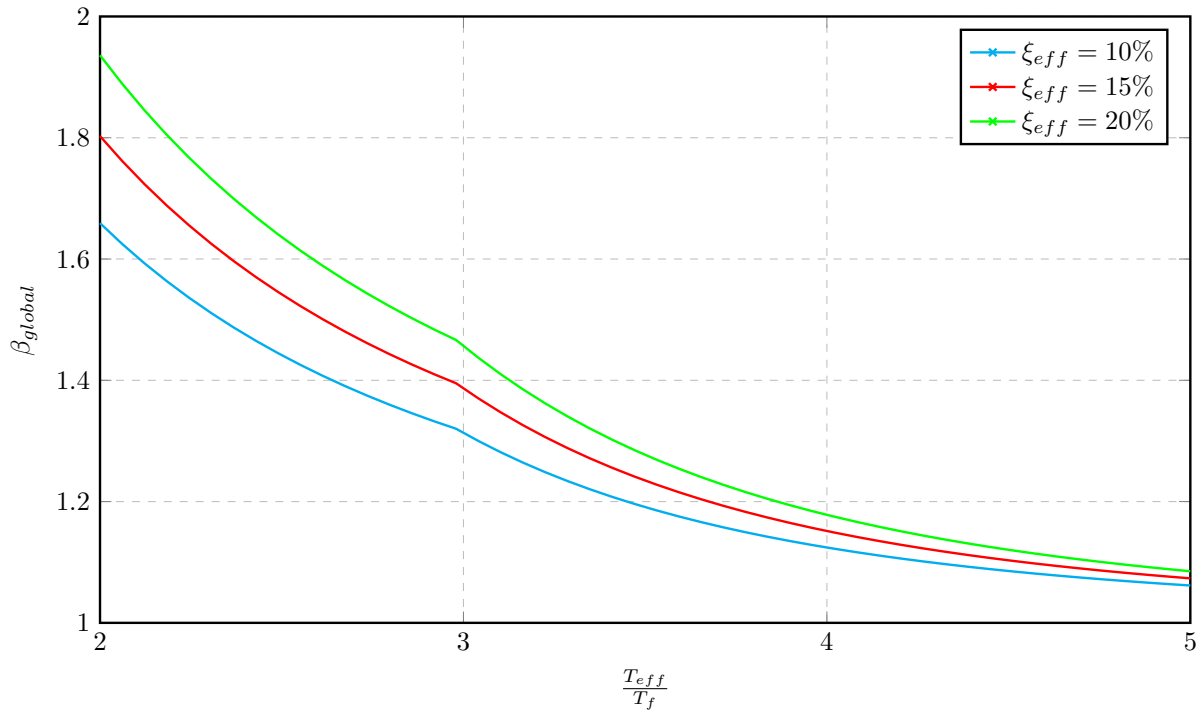


Figura 4.17: Factor de amplificação global, β_{global} , com $T_{eff} = 3s$ e $N=7$ variando o coeficiente de amortecimento efetivo.

4.9 Fórmulas Propostas

Feita assim a análise, e tendo por base o concluído anteriormente, propõe-se um conjunto de equações para calcular o fator de amplificação global de um edifício isolado, entrando apenas com a razão entre períodos, período efetivo e período da superestrutura. Estas equações foram interpoladas para um edifício com 4 pisos, com um amortecimento equivalente do sistema de isolamento de base de 15%, e foi considerado um T_{eff} de 2 e 3s. Por forma, a conferir uma aproximação mais precisa, se o for pretendido, basta calcular para as duas curvas de T_{eff} de 2 e 3s e fazer uma ponderação com base no T_{eff} de referência.

A forma de cálculo da amplificação global é proposta pelo formato da equação 4.25, que melhor se ajusta às curvas calculadas, e usando os coeficientes da tabela 4.6 e 4.7 pode-se obter a amplificação total da aceleração para as quatro tipologias estruturais e para o T_{eff} pretendido.

$$\beta_{global}\left(\frac{T_{eff}}{T_f}\right) = a \cdot e^{-b\left(\frac{T_{eff}}{T_f}\right)} + c \quad (4.25)$$

Tabela 4.6: Coeficientes de interpolação para as quatro tipologias, $T_{eff}=2s$.

Sistema estrutural	a	b	c
Pórtico	3,993	1,359	1,026
Misto equivalente a Pórtico	4,501	1,361	1,028
Misto equivalente a Parede	5,144	1,356	1,032
Parede	5,630	1,331	1,036

Tabela 4.7: Coeficientes de interpolação para as quatro tipologias, $T_{eff}=3s$.

Sistema estrutural	a	b	c
Pórtico	3,317	0,845	0,992
Misto equivalente a Pórtico	3,223	0,797	0,99
Misto equivalente a Parede	3,112	0,741	0,983
Parede	3,001	0,690	0,980

Apresenta-se na figura 4.18, a representação gráfica da interpolação das fórmulas propostas para a estimação da amplificação global, β_{global} , para T_{eff} de 2 e 3s e para as quatro tipologias estruturais, com os marcadores triangulares cinzentos a representar alguns valores exactos.

Definido assim o β_{global} , pode-se calcular a aceleração de cálculo, pela equação 4.26, relembrando que a amplificação global foi obtida usando um ξ_{eff} de 15%. De forma a obter apenas resultados conservativos, limita-se o cálculo da aceleração espectral a valores de amortecimento equivalente inferior ou igual a 15%. Isto porque um coeficiente de amortecimento efetivo superior conduz a um maior fator de amplificação global o que não estará contabilizado nas fórmulas propostas.

$$a_d = S_e(T_{eff}, \xi_{eff}) \cdot \beta_{global} \cdot \frac{\gamma_a}{q_a} \quad (4.26)$$

Sendo γ_a e q_a respetivamente, o coeficiente de importância e o factor de comportamento do elemento não estrutural. Como referido na secção 3.2, considera-se prudente tomar um valor unitário para ambos dos coeficientes.

A aceleração a que outros equipamentos do sistema de ascensores estarão previsivelmente sujeitos pode ser inferior à aceleração de cálculo considerada, calculada no pior cenário, caso os mesmos equipamentos se encontrem instalados de forma fixa em outros pisos que não o último. Nesses casos, deverá considerar-se uma aceleração de cálculo modificada, a'_d , determinada conforme se apresenta na equação 4.27 com base na aceleração espectral $S_e(T_{eff}, \xi_{eff})$, na altura a que se encontra instalado o equipamento, z , e da altura do edifício, H , sendo essas alturas medidas acima do nível de aplicação da ação sísmica.

$$a'_d = S_e(T_{eff}, \xi_{eff}) \cdot (1 + (\beta_{global} - 1) \cdot \frac{z}{H}) \quad (4.27)$$

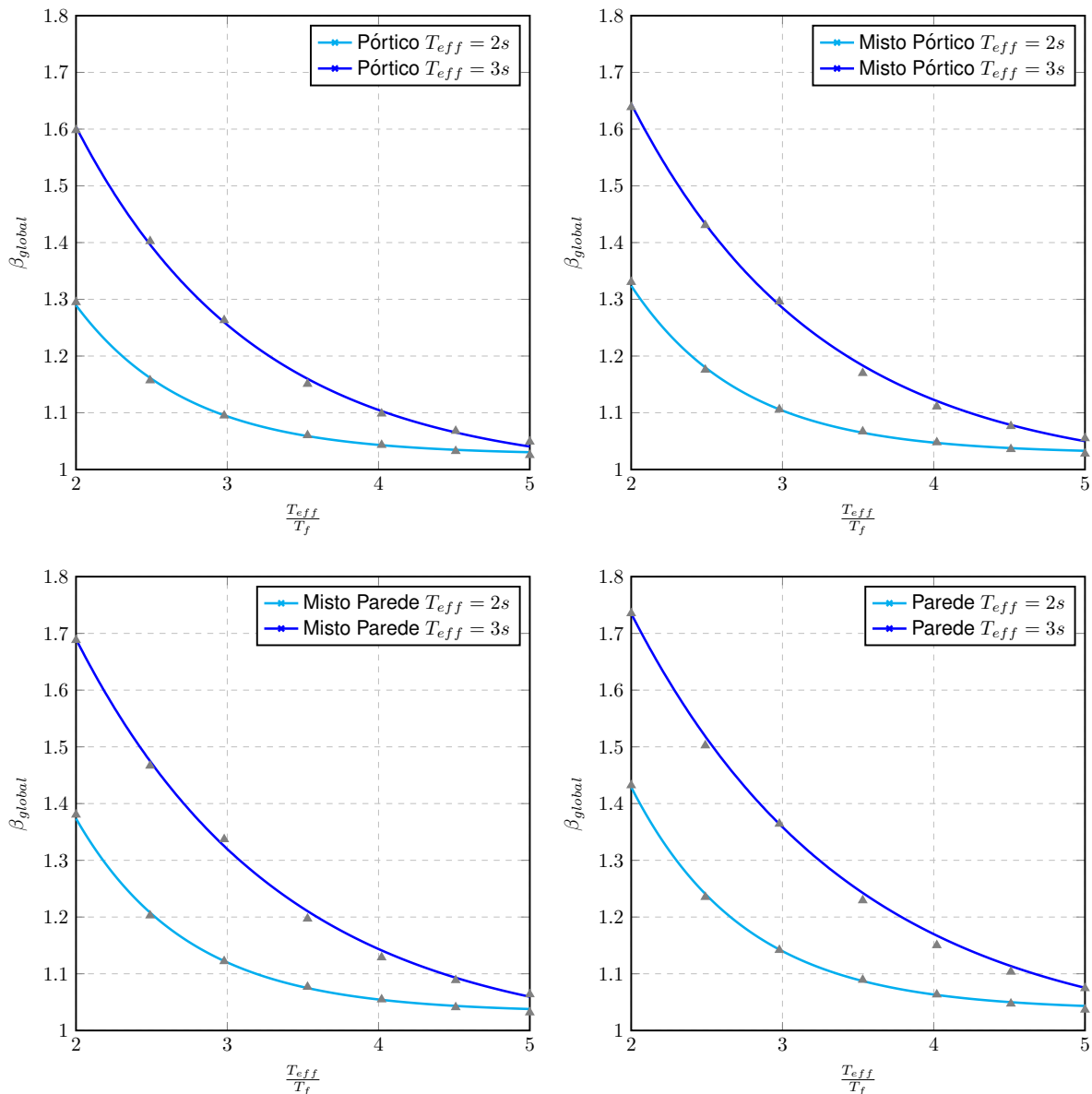


Figura 4.18: Representação gráfica das equações propostas de cálculo do β_{global} para T_{eff} igual a 2 e 3s das quatro tipologias estruturais.

4.10 Fórmula Simplificada

Procede-se agora à dedução de uma expressão simplificada mas ao mesmo tempo conservativa, da determinação da aceleração de cálculo, pela motivação que o projetista dos ascensores pode não ter à priori os parâmetros dinâmicos do edifício de modo a fazer uso das expressões deduzidas na secção anterior. Assim, toma-se o $T_{eff}=2s$ e a razão T_{eff}/T_f igual a 3, e usando as curvas de amplificação referente a um edifício com tipologia estrutural parede e com um número de pisos de 4. Desta forma, o valor do β_{global} é de 1,14 e o valor espectral da aceleração é calculado usando um período de 2s, assim chega-se a um valor conservativo da aceleração de cálculo, que estará sobrestimado mesmo que o edifício tenha um período fundamental e uma eficácia do sistema de isolamento superior. Em

consequência, esta simplificação é descrita na equação 4.28. Relembra-se que se pode usar um coeficiente de amortecimento efetivo inferior aos 15%, que continuará a ser do lado da segurança.

$$a_d = S_e(2s, 15\%) \cdot 1,14 \cdot \frac{\gamma_a}{q_a} \quad (4.28)$$

Deste modo, foi calculado para todas as zonas do país a aceleração de cálculo e a respetiva categoria sísmica do ascensor (CSA), como demonstrado no subcapítulo 3.2.2. Foi considerado o máximo valor da aceleração espectral entre o sismo tipo 1 e tipo 2, os tipos de solo A, B, C, D e E, e foram considerados as classes de importância III e IV, por se entender que são mais relevantes os edifícios com uma maior importância para a aplicação de isolamento de base. Apresenta-se na tabela 4.8 a aceleração de cálculo e a categoria sísmica do ascensor, para um conjunto de 15 municípios que cobre todas as possíveis combinações em termos de zonamento para as ações sísmicas Tipo 1 e 2, e as restantes zonas do país encontram-se no Anexo B.

Tabela 4.8: Aceleração de cálculo (m/s^2) e categoria sísmica do ascensor, para os 15 municípios representativos do zonamento para as ações sísmicas Tipo 1 e 2.

Município	Designação	Zonas Sísmicas		Classe de Importância III Tipo de solo					Classe de Importância IV Tipo de solo				
		Tipo1	Tipo2	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0205	Beja	1.4	2.4	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
0603	Coimbra	1.6	2.4	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
4901	Corvo		2.4	0.32	0.42	0.49	0.73	0.55	0.37	0.48	0.56	0.83	0.62
0805	Faro	1.2	2.3	1.75	1.98	2.14	3.19	2.27	2.36	2.39	2.40	3.25	2.42
3103	Funchal	1.6		0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
4401	Santa Cruz da Graciosa		2.2	0.58	0.69	0.78	1.09	0.84	0.68	0.78	0.86	1.17	0.92
0807	Lagos	1.1	2.3	2.19	2.29	2.36	3.29	2.41	2.95	2.95	2.95	3.93	2.95
1009	Leiria	1.5	2.4	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1106	Lisboa	1.3	2.3	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
0211	Odemira	1.2	2.4	1.75	1.98	2.14	3.19	2.27	2.36	2.39	2.40	3.25	2.42
0212	Ourique	1.3	2.4	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
4203	Ponta Delgada		2.1	0.72	0.82	0.89	1.19	0.94	0.85	0.91	0.96	1.23	0.99
1312	Porto	1.6	2.5	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1416	Santarém	1.5	2.3	0.54	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1114	Vila Franca de Xira	1.4	2.3	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82

Legenda CSA 0 CSA 1 CSA 2

Constata-se da tabela 4.8 referente às zonas representativas do país, que em muitos casos é necessário o dimensionamento sísmico explícito dos sistemas de ascensores em edifícios com isolamento de base, que são os casos com categoria sísmica de ascensor de 1 ou superior.

4.11 Considerações Finais

Finalizado este estudo, chegou-se a um conjunto de expressões para a determinação da máxima aceleração sentido num edifício de base isolada genérico, em função da variável que traduz a eficiência

do sistema de isolamento de base, T_{eff}/T_f . Tendo por base uma análise modal, estimou-se o comportamento da estrutura de base isolada e foi possível obter os respetivos dados dinâmicos, de forma generalizada. Foram consideradas distintas tipologias estruturais, por forma a incluir todas as possibilidades da tipologia estrutural da superestrutura. Isto tudo com um modelo numérico programado na linguagem *Python*.

Em acréscimo, este estudo assim possibilita a um projetista de um sistema de ascensores, proceder à realização do dimensionamento sísmico do sistema, tendo por base a fórmula de cálculo simplificada para a aceleração de cálculo proposta. Foi igualmente apresentado um conjunto de tabelas com os valores da aceleração de cálculo, assim como da categoria sísmica do elevador, para todo o território nacional.

Por último, de referir que a metodologia usada é de uma forma simplificada, não considerando o comportamento não linear de um edifício com isolamento de base, mas que conduz a resultados próximos da realidade. Sendo que todas as opções tomadas no desenvolvimento das expressões de cálculo foram de um modo conservativas, assegura-se a fiabilidade desta metodologia.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Conclusões

O principal objetivo desta dissertação foi a dedução de um conjunto de expressões para estimação da máxima aceleração sísmica sentida num edifício com isolamento de base. Por forma a que seja possível realizar o dimensionamento sísmico de um sistema de ascensores, instalado num edifício com isolamento de base, em concordância com a EN 81-77:2018.

Realizou-se em primeiro lugar uma revisão de literatura sobre a ação sísmica e a sua caracterização, dando especial atenção à representação por espectro de resposta. Do método de proteção sísmica por isolamento de base, do seu conceito, os principais tipos dos seus componentes e da sua forma de modelação num modelo linear equivalente. Foi exposto o modo de funcionamento e dos seus elementos integrantes de sistemas de ascensores, focando apenas nos ascensores elétricos de tração. Fez-se uma abordagem da metodologia de dimensionamento sísmico e instalação de sistemas de ascensores, seguindo a EN 81-77:2018. No final, foram discutidas várias soluções técnicas de conciliação da caixa dos ascensores com o plano de isolamento de base de um edifício.

Para a concretização do objetivo principal, foi realizado um estudo paramétrico, onde se analisou uma série de modelos lineares equivalentes de edifícios com isolamento de base programado em *Python*. Realizou-se um estudo de sensibilidade sobre os parâmetros de amplificações considerados, β_1 e β_2 , chegando-se a um conjunto de resultados de amplificação global, β_{global} . Concretizando-se num conjunto de fórmulas de estimação da máxima aceleração sentida num edifício com isolamento de base, de uma forma mais precisa, e uma fórmula simplificada de mais fácil uso.

Uma das conclusões atingidas é que os sistemas de ascensores incorporados em edifícios com isolamento de base, em muitas zonas do país, ainda estão sujeitos a um nível de aceleração considerável, suficiente para ser necessário realizar o seu dimensionamento explícito ao efeito sísmico pela NP EN 81-77:2018.

5.2 Trabalho Futuro

De modo a aprofundar o trabalho realizado nesta dissertação, surgem as seguintes propostas para trabalhos a desenvolver futuramente:

- Estudo dos pormenores de ligação dos ascensores à estrutura, dimensão das juntas entre a caixa do ascensor e a sua envolvente, e do suporte vertical do núcleo quando este é suspenso na superestrutura;
- Considerar o comportamento não-linear do sistema de isolamento de base, e comparar os resultados obtidos nessa análise com os obtidos no método simplificado;
- Caso de estudo tridimensional, e eventuais comparações com os casos planos que foram alvos de estudo nesta dissertação.

Bibliografia

- [1] IST-UL. "Especificações Técnicas para o Dimensionamento de Ascensores de Edifícios Hospitalares Sujeitos a Condições Sísmicas", ET 11/2020. *UIE/ACSS*, 11 2020.
- [2] *NP EN 1998-1:2010*, "Eurocódigo 8 — Projeto de estruturas para resistência aos sismos — Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios". CEN/CT 115, IPQ, 2010.
- [3] *NP EN 81-77:2018*. "Safety rules for the construction and installations of lifts - Particular applications for passenger and goods passenger lifts - Part 77: Lifts subject to seismic conditions" / "Regras de segurança para o fabrico e instalação de ascensores; Aplicações particulares para ascensores de pessoas e de pessoas e bens; Parte 77: Ascensores sujeitos a condições sísmicas". IPQ, 2018.
- [4] M. Lopes and R. Bento. Seismicity and seismic risk. *Apontamentos da Disciplina de Dinâmica Estrutural e Engenharia Sísmica*, IST, 12 2018.
- [5] L. Guerreiro. Acção Sísmica. *Apontamentos da Disciplina de Engenharia Sísmica de Pontes*, IST, 02 2011.
- [6] L. Guerreiro. A definição da acção sísmica na regulamentação actual. *Reabilitação Sísmica de Edifícios*, 2010.
- [7] F. R. Figueiredo. *Isolamento Sísmico de Base - Dimensionamento de Sistemas de Isolamento de Base em Edifícios*, Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Eng.^ª Civil. IST, 2007.
- [8] A. M. de Carvalho Henriques. *Isolamento de Base para Reabilitação Sísmica de Edifícios de Betão Armado*, Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Eng.^ª Civil. Universidade de Coimbra, 2020.
- [9] M. C. Constantinou and I. G. Tadjbakhsh. Optimum Characteristics of Isolated Structures. *J. of Structural Engineering*, ASCE, 1985.
- [10] L. Guerreiro. Isolamento de base. *Apontamentos do Mestrado de Engenharia de Estruturas*, IST, 2004.
- [11] Hdrb – high damping rubber bearings. <https://structurae.net/en/products-services/lasto-hdrb-high-damping-rubber-bearings>. Acedido: 17-09-2021.
- [12] Elastomeric isolators. *FIP Industriale*, 2016.

- [13] L. Guerreiro. Comportamento de blocos de elastómero (borrachas). *Apontamentos do Mestrado de Engenharia de Estruturas*, IST, 2003.
- [14] A. Y. Elghazouli. *SEISMIC DESIGN OF BUILDINGS TO EUROCODE 8*. CRC PRESS, Taylor Francis Group, 2017.
- [15] A. K. Chopra. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2011.
- [16] P. M. Calvi and D. M. Ruggiero. Earthquake-induced floor accelerations in base isolated structures. *16th World Conference on Earthquake, 16WCEE 2017*, 2017.
- [17] Next generation machine-roomless elevators. <https://continuingeducation.bnppmedia.com/courses/otis-elevator-company/next-generation-machineromless-elevators/2//>. Acedido: 17.09.2021.
- [18] Traction passenger elevator. <https://www.rkelevators.com/traction-passenger-elevator.php>. Acedido: 19.05.2021.
- [19] *EN ISO 7465:2007, "Passenger lifts and service lifts - Guide rails for lift cars and counterweights - T-type"*. International Standard, 2007.
- [20] *EN 81-20:2014. Safety rules for the construction and installation of lifts - Lifts for the transport of persons and goods - Part 20: Passenger and goods passenger lifts*. 2014.
- [21] *EN 81-50:2014. Safety rules for the construction and installation of lifts - Examinations and tests - Part 50: Design rules, calculations, examinations and tests of lift components*. 2014.
- [22] Guideline for the Design of Seismic Isolation Systems for Buildings - DRAFT FOR TRIAL USE. *NZSEE*, 06 2019.
- [23] S. Watanabe, T. Yumura, N. Funai, Y. Hayashi, S. Minewaki, and M. Kibayashi. Dynamic analysis for elevators installed in mid-story seismic isolated buildings. *Journal of Environment and Engineering*, 2(3):436–447, 2007.
- [24] L. Guerreiro. Revisões de análise modal e análise sísmica por espectros de resposta. *Apontamentos da Disciplina de Dinâmica e Engenharia Sísmica, Mestrado de Engenharia de Estruturas*, IST, 03 1999.
- [25] L. M. S. Castro. Método dos Elementos Finitos: Análise de Pórticos Planos. *Apontamentos da Disciplina de Análise de Estruturas II*, IST, 2009.
- [26] J. M. Proença. COMPLEMENTOS À RESPOSTA DINÂMICA DE SISTEMAS DE MÚLTIPLOS GRAU DE LIBERDADE (MDOF). *Apontamentos da Disciplina de Dinâmica e Engenharia Sísmica, Mestrado de Engenharia de Estruturas*, IST, 09 2011.
- [27] P. M. Mendes and J. J. O. Pedro. *Dimensionamento de Estruturas de Edifícios e Estruturas Especiais*, volume 1. IST Press, 2020.

Anexo A

Códigos em Python

Código A.1: Função Principal

```
1
2 def beta_ad_Px(N,Tf,R,n,alpha):
3     %% LIBRARY
4     import numpy as np
5     import matplotlib.pyplot as plt
6     from scipy import linalg
7     from numpy.linalg import lstsq
8     from numpy import ones,vstack
9     %%dados sismicos
10    zs1=1 #zona sismica para sismo tipo 1
11    zs2=1 #zona sismica para sismo tipo 2
12    tt=1 #tipo de terreno(1=A, 2=B, 3=C, ETC.)
13    gamai=1.0 #classe de importancia IV
14    csi_iso = 15.0 #coeficiente de amortecimento efetivo%
15    eta_iso = (10/(5+csi_iso))**0.5
16    %%dados edificio
17    N= int(N)
18    m=500
19    L=3.2 #altura entre pisos
20    %%definicoes
21    agr_s1=np.array([2.5, 2.0, 1.5, 1.0, 0.6, 0.35])
22    agr_s2=np.array([2.5, 2.0, 1.7, 1.1, 0.8])
23    smax=np.array([1.0, 1.35, 1.6, 2.0, 1.8])
24    TB=0.1
25    TC1=np.array([0.6, 0.6, 0.6, 0.8, 0.6])
26    TC2=np.array([0.25, 0.25, 0.25, 0.3, 0.25])
27    TD=2.0
28
29    ag1=np.multiply(gamai,agr_s1[zs1-1])
30    ag2=np.multiply(gamai,agr_s2[zs2-1])
31    #
32    import fun_coefsolo
33    smax=smax[tt-1]
34    ag=ag1
35    S1=fun_coefsolo.coefsolo(smax,ag)
36    ag=ag2
37    S2=fun_coefsolo.coefsolo(smax,ag)
38    %%Modo fundamental base fixa:
39    M= [ [0 for j in range(N)] for i in range(N)]
40    for i in range(N):
41        M[i][i]=m
42    import fun_ipiso_P_SW
43    Kglobal, ip=fun_ipiso_P_SW.ipiso(N,Tf,n,alpha,1)
44    for i in range(N-1):
45        Kglobal, ip=fun_ipiso_P_SW.ipiso(N,Tf,n,alpha,ip)
46    #Pf=(1/Tf)*2*np.pi
47    w1,v1 = linalg.eigh(Kglobal,M)#w1 e v1 valores e vetores propios
48    v1f=np.zeros(N)
49    print('ip',ip)
50    print('Kglobal base fixa',Kglobal)
```

```

51 print('w1 base fixa',w1)
52 for i in range(N):
53     v1f[i]=v1[i][0]#modo fundamental
54 import fun_normmodo
55 PHI1f=fun_normmodo.normmodo(v1f,N,M)#normaliza modo em rela o a matriz de
    massa
56 PHI1fplot=np.zeros(N)
57 for i in range(N): #normaliza em rela o ao grau de liberdade N
58     PHI1fplot[i]=np.multiply(PHI1f[i],(1/PHI1f[N-1]))
59 #%%Modo isolado:
60 Tb=Tf*R
61 kb=((N+1)*m)/((Tb/(2*np.pi))**2)
62 print('Rigidez isolamento de base: Kb=',kb)
63 Mi= [ [0 for j in range(N+1)] for i in range(N+1)]
64 for i in range(N+1):
65     Mi[i][i]=m
66 print('Mi',Mi)
67 kb_P=0.8*kb
68 kb_SW=0.2*kb
69 print('kb_P',kb_P)
70 print('kb_SW',kb_SW)
71 """
72 Matriz K Portico com isolamento de base
73 """
74 KP_bi= [ [0 for j in range(N+1)] for i in range(N+1)]
75 for i in range(N+1):
76     if i == 0:
77         KP_bi[i][i]=kb_P+(alpha*12+(1-alpha)*3)*ip/(L**2)
78     elif i == 1:
79         KP_bi[i][i]=(12+(alpha*12+(1-alpha)*3))*ip/(L**2)
80     elif i == N:
81         KP_bi[i][i]=12*ip/(L**2)
82     else:
83         KP_bi[i][i]=12*2*ip/(L**2)
84 for i in range(N+1):
85     if i == 0:
86         KP_bi[i][i+1]=-(alpha*12+(1-alpha)*3)*ip/(L**2)
87     elif i == 1:
88         KP_bi[i][i-1]=-(alpha*12+(1-alpha)*3)*ip/(L**2)
89         KP_bi[i][i+1]=-12*ip/(L**2)
90     elif i == N:
91         KP_bi[i][i-1]=-12*ip/(L**2)
92     else:
93         KP_bi[i][i-1]=-12*ip/(L**2)
94         KP_bi[i][i+1]=-12*ip/(L**2)
95 """
96 Matriz K Parede com isolamento de base
97 """
98 Kuu_bi= [ [0 for j in range(N+1)] for i in range(N+1)]#matriz de zeros
99 Kur_bi= [ [0 for j in range(N)] for i in range(N+1)]
100 Krr_bi= [ [0 for j in range(N)] for i in range(N)]
101 Kru_bi= [ [0 for j in range(N+1)] for i in range(N)]
102 #Kuu_bi N+1 por N+1
103 for i in range(N+1):
104     if i == 0:
105         Kuu_bi[i][i]=kb_SW+12*n*ip/(L**2)
106     elif i == (N):
107         Kuu_bi[i][i]=12*n*ip/(L**2)
108     else:
109         Kuu_bi[i][i]=12*2*n*ip/(L**2)
110 for i in range(N+1):
111     if i == 0:
112         Kuu_bi[i][i+1]=-12*n*ip/(L**2)
113     elif i == (N):
114         Kuu_bi[i][i-1]=-12*n*ip/(L**2)
115     else:
116         Kuu_bi[i][i-1]=-12*n*ip/(L**2)
117         Kuu_bi[i][i+1]=-12*n*ip/(L**2)
118 #Kur_bi (N+1 por N) e Kru_bi (N por N+1)
119 for i in range(N+1):
120     if i == 0:
121         Kur_bi[i][i]=6*n*ip/L
122     elif i==N:
123         Kur_bi[i][i-1]=-6*n*ip/L
124 for i in range(N+1):

```



```

125     if i == (N):
126         Kur_bi[i][i-2]=-6*n*ip/L
127     #elif i == 1:
128     #     Kur_bi[i][i]=6*n*ip/L
129     elif i == 1:
130         Kur_bi[i][i]=6*n*ip/L
131     elif i!=0:
132         Kur_bi[i][i-2]=-6*n*ip/L
133         Kur_bi[i][i]=6*n*ip/L
134     Kru_bi=np.array(Kur_bi).T
135     #Krr_bi
136     for i in range(N):
137         if i == 0:
138             Krr_bi[i][i]=4*2*n*ip
139         elif i == (N-1) :
140             Krr_bi[i][i]=4*n*ip
141         else:
142             Krr_bi[i][i]=4*2*n*ip
143     for i in range(N):
144         if i == 0:
145             Krr_bi[i][i+1]=2*n*ip
146         elif i == (N-1):
147             Krr_bi[i][i-1]=2*n*ip
148         else:
149             Krr_bi[i][i-1]=2*n*ip
150             Krr_bi[i][i+1]=2*n*ip
151     Krrinv_bi=np.linalg.inv(Krr_bi)
152     Ktemp_bi=np.dot(np.dot(Kur_bi, Krrinv_bi), Kru_bi)
153     #Ktemp=Kur.dot(Krrinv).dot(Kru)
154     Ku_eft_bi=Kuu_bi-Ktemp_bi #Matriz rigidez efetiva
155     KSW_bi=Ku_eft_bi
156     """
157     Matriz global com isolamento de base
158     """
159     Kglobal_bi=KP_bi+KSW_bi
160
161     wi,vi = linalg.eigh(Kglobal_bi,Mi)
162     print('wi',wi)
163     Tbi=2*np.pi*(1/((wi[0])**0.5))
164     viplot=[ [0 for j in range(N+1)] for i in range(N+1)]
165     for i in range(N+1):
166         for j in range(N+1):
167             viplot[j][i]=vi[j][i]/vi[0][i]
168
169     pbi=[]
170     Tbiarray=[]
171     for x in range(N+1):
172         globals()['Tbi%s'% (x+1)] = 2*np.pi*(1/((wi[x])**0.5))
173     for x in range(N+1):
174         globals()['pbi%s'% (x+1)] = (wi[x]**0.5)
175     for x in range(N+1):
176         pbi.append((wi[x]**0.5))
177     for x in range(N+1):
178         Tbiarray.append(2*np.pi*(1/((wi[x])**0.5)))
179     for x in range(N+1):
180         globals()['MOD0bi%s'% (x+1)] = np.zeros(N+1)
181     for n in range(N+1):
182         if n==0:
183             for i in range(N+1):
184                 MOD0bi1[i]=vi[i][0]
185         if n==1:
186             for i in range(N+1):
187                 MOD0bi2[i]=vi[i][1]
188         if n==2:
189             for i in range(N+1):
190                 MOD0bi3[i]=vi[i][2]
191         if n==3:
192             for i in range(N+1):
193                 MOD0bi4[i]=vi[i][3]
194         if n==4:
195             for i in range(N+1):
196                 MOD0bi5[i]=vi[i][4]
197         if n==5:
198             for i in range(N+1):
199                 MOD0bi6[i]=vi[i][5]

```

```

200         for i in range(N+1):
201             MOD0bi7[i]=vi[i][6]
202     if n==7:
203         for i in range(N+1):
204             MOD0bi8[i]=vi[i][7]
205     if n==8:
206         for i in range(N+1):
207             MOD0bi9[i]=vi[i][8]
208     if n==9:
209         for i in range(N+1):
210             MOD0bi10[i]=vi[i][9]
211     if n==10:
212         for i in range(N+1):
213             MOD0bi11[i]=vi[i][10]
214     import fun_normmodo
215     for i in range (N+1):
216         if i==0:
217             MOD0bi1norm=fun_normmodo.normmodo(MOD0bi1,(N+1),Mi)
218         if i==1:
219             MOD0bi2norm=fun_normmodo.normmodo(MOD0bi2,(N+1),Mi)
220         if i==2:
221             MOD0bi3norm=fun_normmodo.normmodo(MOD0bi3,(N+1),Mi)
222         if i==3:
223             MOD0bi4norm=fun_normmodo.normmodo(MOD0bi4,(N+1),Mi)
224         if i==4:
225             MOD0bi5norm=fun_normmodo.normmodo(MOD0bi5,(N+1),Mi)
226         if i==5:
227             MOD0bi6norm=fun_normmodo.normmodo(MOD0bi6,(N+1),Mi)
228         if i==6:
229             MOD0bi7norm=fun_normmodo.normmodo(MOD0bi7,(N+1),Mi)
230         if i==7:
231             MOD0bi8norm=fun_normmodo.normmodo(MOD0bi8,(N+1),Mi)
232         if i==8:
233             MOD0bi9norm=fun_normmodo.normmodo(MOD0bi9,(N+1),Mi)
234         if i==9:
235             MOD0bi10norm=fun_normmodo.normmodo(MOD0bi10,(N+1),Mi)
236         if i==10:
237             MOD0bi11norm=fun_normmodo.normmodo(MOD0bi11,(N+1),Mi)
238     PHI1biplot=np.zeros(N+1)
239     temp=MOD0bi1[0]
240     for i in range(N+1): #normalizar ao grau de liberdade N
241         PHI1biplot[i]=np.multiply(MOD0bi1[i],(1/temp))
242     %%massa e altura modal efetiva
243     H=np.zeros(N+1)
244     for i in range(N+1):
245         if i==1:
246             H[i]=L
247         elif i > 1:
248             H[i]=H[i-1]+L
249     #base fixa
250     Hjf=np.zeros(N)
251     for i in range(N):
252         Hjf[i]=H[i+1]
253     Mn_numerador=0
254     for i in range (N):
255         Mn_numerador=Mn_numerador+m*PHI1f[i]
256     Mn_numerador=Mn_numerador**2
257     Mn_denominador=0
258     for i in range (N):
259         Mn_denominador=Mn_denominador+m*(PHI1f[i]**2)
260     M1f=Mn_numerador/Mn_denominador
261     Hn_numerador=0
262     for i in range (N):
263         Hn_numerador=Hn_numerador+m*PHI1f[i]*Hjf[i]
264     Hn_denominador=0
265     for i in range (N):
266         Hn_denominador=Hn_denominador+m*PHI1f[i]
267     H1f=Hn_numerador/Hn_denominador
268     #base isolada
269     Hjbi=H
270     Mn_numerador=0
271     for i in range (N+1):
272         Mn_numerador=Mn_numerador+m*MOD0bi1[i]
273     Mn_numerador=Mn_numerador**2
274     Mn_denominador=0

```

```

275 for i in range (N+1):
276     Mn_denominador=Mn_denominador+m*(MOD0bi1[i]**2)
277 M1bi=Mn_numerador/Mn_denominador
278 Hn_numerador=0
279 for i in range (N+1):
280     Hn_numerador=Hn_numerador+m*MOD0bi1[i]*Hjbi[i]
281 Hn_denominador=0
282 for i in range (N+1):
283     Hn_denominador=Hn_denominador+m*MOD0bi1[i]
284 H1bi=Hn_numerador/Hn_denominador
285 %%Aceleracoes
286 onex=np.ones(N+1)
287 onex=np.transpose(onex)
288 acbi=[]
289 eta_iso = (10/(5+csi_iso))**0.5
290 TB=0.1
291 TC=0.6
292 Sd_biarray=[]
293 for i in range(N+1):
294     if i==0:
295         Sd_bi1=fun_spech.spech(ag1,S,TB,TC,2,Tbi1,eta_iso)
296         Sd_biarray.append(Sd_bi1)
297         Pxbi1=MOD0bi1.dot(Mi).dot(onex)
298         acbi1=MOD0bi1.dot(Pxbi1).dot(Sd_bi1)
299         acbi.append(acbi1)
300         beta1=acbi1[N]/acbi1[0]
301     if i==1:
302         Sd_bi2=fun_spech.spech(ag1,S,TB,TC,2,Tbi2,1)
303         Sd_biarray.append(Sd_bi2)
304         Pxbi2=MOD0bi2.dot(Mi).dot(onex)
305         acbi2=MOD0bi2.dot(Pxbi2).dot(Sd_bi2)
306         acbi.append(acbi2)
307         beta2=acbi2[N]/acbi2[0]
308         betapx=Pxbi1*MOD0bi1[1]
309     if i==2:
310         Sd_bi3=fun_spech.spech(ag1,S,TB,TC,2,Tbi3,1)
311         Sd_biarray.append(Sd_bi3)
312         Pxbi3=MOD0bi3.dot(Mi).dot(onex)
313         acbi3=MOD0bi3.dot(Pxbi3).dot(Sd_bi3)
314         acbi.append(acbi3)
315         beta3=acbi3[N]/acbi3[0]
316         betapx=Pxbi1*MOD0bi1[2]
317     if i==3:
318         Sd_bi4=fun_spech.spech(ag1,S,TB,TC,2,Tbi4,1)
319         Sd_biarray.append(Sd_bi4)
320         Pxbi4=MOD0bi4.dot(Mi).dot(onex)
321         acbi4=MOD0bi4.dot(Pxbi4).dot(Sd_bi4)
322         acbi.append(acbi4)
323         beta4=acbi4[N]/acbi4[0]
324         betapx=Pxbi1*MOD0bi1[3]
325     if i==4:
326         Sd_bi5=fun_spech.spech(ag1,S,TB,TC,2,Tbi5,1)
327         Sd_biarray.append(Sd_bi5)
328         Pxbi5=MOD0bi5.dot(Mi).dot(onex)
329         acbi5=MOD0bi5.dot(Pxbi5).dot(Sd_bi5)
330         acbi.append(acbi5)
331         beta5=acbi5[N]/acbi5[0]
332         betapx=Pxbi1*MOD0bi1[4]
333     if i==5:
334         Sd_bi6=fun_spech.spech(ag1,S,TB,TC,2,Tbi6,1)
335         Sd_biarray.append(Sd_bi6)
336         Pxbi6=MOD0bi6.dot(Mi).dot(onex)
337         acbi6=MOD0bi6.dot(Pxbi6).dot(Sd_bi6)
338         acbi.append(acbi6)
339         beta6=acbi6[N]/acbi6[0]
340         betapx=Pxbi1*MOD0bi1[5]
341     if i==6:
342         Sd_bi7=fun_spech.spech(ag1,S,TB,TC,2,Tbi7,1)
343         Sd_biarray.append(Sd_bi7)
344         Pxbi7=MOD0bi7.dot(Mi).dot(onex)
345         acbi7=MOD0bi7.dot(Pxbi7).dot(Sd_bi7)
346         acbi.append(acbi7)
347         beta7=acbi7[N]/acbi7[0]
348         betapx=Pxbi1*MOD0bi1[6]
349     if i==7:

```

```

350     Sd_bi8=fun_spech.spech(ag1,S,TB,TC,2,Tbi8,1)
351     Sd_biarray.append(Sd_bi8)
352     Pxbi8=MODObi8.dot(Mi).dot(onex)
353     acbi8=MODObi8.dot(Pxbi8).dot(Sd_bi8)
354     acbi.append(acbi8)
355     beta8=acbi8[N]/acbi8[0]
356     betapx=Pxbi1*MODObi1[7]
357     if i==8:
358         Sd_bi9=fun_spech.spech(ag1,S,TB,TC,2,Tbi9,1)
359         Sd_biarray.append(Sd_bi9)
360         Pxbi9=MODObi9.dot(Mi).dot(onex)
361         acbi9=MODObi9.dot(Pxbi9).dot(Sd_bi9)
362         acbi.append(acbi9)
363         beta9=acbi9[N]/acbi9[0]
364         betapx=Pxbi1*MODObi1[8]
365     if i==9:
366         Sd_bi10=fun_spech.spech(ag1,S,TB,TC,2,Tbi10,1)
367         Sd_biarray.append(Sd_bi10)
368         Pxbi10=MODObi10.dot(Mi).dot(onex)
369         acbi10=MODObi10.dot(Pxbi10).dot(Sd_bi10)
370         acbi.append(acbi10)
371         beta10=acbi10[N]/acbi10[0]
372         betapx=Pxbi1*MODObi1[9]
373     if i==10:
374         Sd_bi11=fun_spech.spech(ag1,S,TB,TC,2,Tbi11,1)
375         Sd_biarray.append(Sd_bi11)
376         Pxbi11=MODObi11.dot(Mi).dot(onex)
377         acbi11=MODObi11.dot(Pxbi11).dot(Sd_bi11)
378         acbi.append(acbi11)
379         beta11=acbi11[N]/acbi11[0]
380         betapx=Pxbi1*MODObi1[10]
381     beta=acbi[0][N]/acbi[0][0]
382     #%%CQC
383     acbase=[]
384     actopo=[]
385     for i in range(N+1):
386         acbase.append(acbi[i][0])
387         actopo.append(acbi[i][N])
388     import fun_coefcorr
389     acbasecqc=0
390     for n in range(N+1):
391         for i in range(N+1):
392             if i==0:
393                 csi=0.15
394             else:
395                 csi==0.05
396             roin=fun_coefcorr.coefcorr(i,n,acbase,pbi,csi)
397             acbasecqc=roin*acbase[i]*acbase[n]+acbasecqc
398     acbasecqc=acbasecqc**0.5
399     actopocqc=0
400     for n in range(N+1):
401         for i in range(N+1):
402             if i==0:
403                 csi=0.15
404             else:
405                 csi==0.05
406             roin=fun_coefcorr.coefcorr(i,n,acbase,pbi,csi)
407             actopocqc=roin*actopo[i]*actopo[n]+actopocqc
408     actopocqc=actopocqc**0.5
409     beta_CQC=actopocqc/acbi[0][N]
410
411     beta_global=actopocqc/acbi[0][0]
412     betaglobalpx=betapx*beta_CQC
413     #return betapx (beta1) ou beta_CQC (beta2) ou betaglobalpx (betaglobal)
414     return betaglobalpx

```

Código A.2: Função que calcula a rigidez por piso.

```

1 import numpy as np
2 def ipiso(N,Tf,n,alpha,ip):
3     #%% Definicoes gerais
4     #Matriz de Massa
5     M= [ [0 for j in range(N)] for i in range(N)]
6     for i in range(N):
7         M[i][i]=500

```

```

8 #Matriz de Rigidez
9 Kuu= [ [0 for j in range(N)] for i in range(N)]#matriz zeros
10 Kur= [ [0 for j in range(N)] for i in range(N)]
11 Krr= [ [0 for j in range(N)] for i in range(N)]
12 Kru= [ [0 for j in range(N)] for i in range(N)]
13 L=3.2#altura entre pisos
14 Pf=(1/Tf)*2*np.pi
15 dete=0
16 dete_ant=0
17 cond=-1
18 if ip==1:
19     ip=-0.9 #99
20 x=1
21 if ip > 2:
22     x=0
23 %% 1a Iteracao
24 while cond < 0:
25     dete_ant=dete
26     if x==1:
27         ip+=1
28     else:
29         ip+=10
30     ""
31         Matriz KSW
32     ""
33 #Kuu
34 for i in range(N):
35     if i != (N-1):
36         Kuu[i][i]=12*2*n*ip/(L**2)
37     elif i == (N-1) :
38         Kuu[i][i]=12*n*ip/(L**2)
39 for i in range(N):
40     if i == 0:
41         Kuu[i][i+1]=-12*n*ip/(L**2)
42     elif i == (N-1):
43         Kuu[i][i-1]=-12*n*ip/(L**2)
44     else:
45         Kuu[i][i-1]=-12*n*ip/(L**2)
46         Kuu[i][i+1]=-12*n*ip/(L**2)
47 #Kur e Kru
48 for i in range(N):
49     if i != (N-1):
50         Kur[i][i]=0
51     elif i == (N-1) :
52         Kur[i][i]=-6*n*ip/L
53 for i in range(N):
54     if i == 0:
55         Kur[i][i+1]=6*n*ip/L
56     elif i == (N-1):
57         Kur[i][i-1]=-6*n*ip/L
58     else:
59         Kur[i][i-1]=-6*n*ip/L
60         Kur[i][i+1]=6*n*ip/L
61 Kru=np.array(Kur).T
62 #Krr
63 for i in range(N):
64     if i != (N-1):
65         Krr[i][i]=4*2*n*ip
66     elif i == (N-1) :
67         Krr[i][i]=4*n*ip
68 for i in range(N):
69     if i == 0:
70         Krr[i][i+1]=2*n*ip
71     elif i == (N-1):
72         Krr[i][i-1]=2*n*ip
73     else:
74         Krr[i][i-1]=2*n*ip
75         Krr[i][i+1]=2*n*ip
76 Krrinv=np.linalg.inv(Krr)
77
78 Ktemp=np.dot(np.dot(Kur, Krrinv), Kru)
79 #Ktemp=Kur.dot(Krrinv).dot(Kru)
80 Ku_eft=Kuu-Ktemp #Matriz rigidez efetiva
81 KSW=Ku_eft
82

```

```

83     """
84         Matriz KP
85     """
86     KP= [ [0 for j in range(N)] for i in range(N)] #matriz zeros
87     for i in range(N):
88         if i==0:
89             KP[i][i]=(12+(alpha*12+(1-alpha)*3))*ip/(L**2)
90         elif i == (N-1):
91             KP[i][i]=12*ip/(L**2)
92         else:
93             KP[i][i]=12*2*ip/(L**2)
94     for i in range(N):
95         if i == 0:
96             KP[i][i+1]=-12*ip/(L**2)
97         elif i == (N-1):
98             KP[i][i-1]=-12*ip/(L**2)
99         else:
100            KP[i][i-1]=-12*ip/(L**2)
101            KP[i][i+1]=-12*ip/(L**2)
102
103     """
104     C lculo do determinante
105     """
106     Kglobal=KP+KSW
107     C=Kglobal-(Pf**2)*np.array(M)
108     dete=np.linalg.det(C)
109     print(dete,ip)
110     if dete_ant<0 and dete>0:
111         cond=1
112     if dete_ant>0 and dete<0:
113         cond=1
114     dete=0
115     dete_ant=0
116     cond=-1
117     if x==1:
118         ip=ip-1.1
119     else:
120         ip=ip-11
121     #%% 2a Iteracao
122     while cond < 0:
123         dete_ant=dete
124         if x==1:
125             ip+=0.1
126         else:
127             ip+=1
128
129     """
130         Matriz KSW
131     """
132     #Kuu
133     for i in range(N):
134         if i != (N-1):
135             Kuu[i][i]=12*2*n*ip/(L**2)
136         elif i == (N-1) :
137             Kuu[i][i]=12*n*ip/(L**2)
138     for i in range(N):
139         if i == 0:
140             Kuu[i][i+1]=-12*n*ip/(L**2)
141         elif i == (N-1):
142             Kuu[i][i-1]=-12*n*ip/(L**2)
143         else:
144             Kuu[i][i-1]=-12*n*ip/(L**2)
145             Kuu[i][i+1]=-12*n*ip/(L**2)
146     #Kur e Kru
147     for i in range(N):
148         if i != (N-1):
149             Kur[i][i]=0
150         elif i == (N-1) :
151             Kur[i][i]=-6*n*ip/L
152     for i in range(N):
153         if i == 0:
154             Kur[i][i+1]=6*n*ip/L
155         elif i == (N-1):
156             Kur[i][i-1]=-6*n*ip/L
157         else:
158             Kur[i][i-1]=-6*n*ip/L

```

```

158         Kur[i][i+1]=6*n*ip/L
159     Kru=np.array(Kur).T
160     #Krr
161     for i in range(N):
162         if i != (N-1):
163             Krr[i][i]=4*2*n*ip
164         elif i == (N-1):
165             Krr[i][i]=4*n*ip
166     for i in range(N):
167         if i == 0:
168             Krr[i][i+1]=2*n*ip
169         elif i == (N-1):
170             Krr[i][i-1]=2*n*ip
171         else:
172             Krr[i][i-1]=2*n*ip
173             Krr[i][i+1]=2*n*ip
174     Krrinv=np.linalg.inv(Krr)
175
176     Ktemp=np.dot(np.dot(Kur, Krrinv), Kru)
177     #Ktemp=Kur.dot(Krrinv).dot(Kru)
178     Ku_eft=Kuu-Ktemp #Matriz rigidez efetiva
179     KSW=Ku_eft
180
181     """
182         Matriz KP
183     """
184     KP= [ [0 for j in range(N)] for i in range(N)] #matriz zeros
185     for i in range(N):
186         if i==0:
187             KP[i][i]=(12+(alpha*12+(1-alpha)*3))*ip/(L**2)
188         elif i == (N-1):
189             KP[i][i]=12*ip/(L**2)
190         else:
191             KP[i][i]=12*2*ip/(L**2)
192     for i in range(N):
193         if i == 0:
194             KP[i][i+1]=-12*ip/(L**2)
195         elif i == (N-1):
196             KP[i][i-1]=-12*ip/(L**2)
197         else:
198             KP[i][i-1]=-12*ip/(L**2)
199             KP[i][i+1]=-12*ip/(L**2)
200
201     """
202     Calculo do determinante
203     """
204     Kglobal=KP+KSW
205     C=Kglobal-(Pf**2)*np.array(M)
206     dete=np.linalg.det(C)
207     print(dete, ip)
208     if dete_ant<0 and dete>0:
209         cond=1
210     if dete_ant>0 and dete<0:
211         cond=1
212     dete=0
213     dete_ant=0
214     cond=-1
215     #ip=ip-11
216     if x==1:
217         ip=ip-0.11
218     else:
219         ip=ip-1.1
220     #%% 3a Iteracao
221     while cond < 0:
222         dete_ant=dete
223         if x==1:
224             ip+=0.01
225         else:
226             ip+=0.1
227     """
228         Matriz KSW
229     """
230     #Kuu
231     for i in range(N):
232         if i != (N-1):

```

```

233     Kuu[i][i]=12*2*n*ip/(L**2)
234     elif i == (N-1) :
235         Kuu[i][i]=12*n*ip/(L**2)
236 for i in range(N):
237     if i == 0:
238         Kuu[i][i+1]=-12*n*ip/(L**2)
239     elif i == (N-1):
240         Kuu[i][i-1]=-12*n*ip/(L**2)
241     else:
242         Kuu[i][i-1]=-12*n*ip/(L**2)
243         Kuu[i][i+1]=-12*n*ip/(L**2)
244 #Kur e Kru
245 for i in range(N):
246     if i != (N-1):
247         Kur[i][i]=0
248     elif i == (N-1) :
249         Kur[i][i]=-6*n*ip/L
250 for i in range(N):
251     if i == 0:
252         Kur[i][i+1]=6*n*ip/L
253     elif i == (N-1):
254         Kur[i][i-1]=-6*n*ip/L
255     else:
256         Kur[i][i-1]=-6*n*ip/L
257         Kur[i][i+1]=6*n*ip/L
258 Kru=np.array(Kur).T
259 #Krr
260 for i in range(N):
261     if i != (N-1):
262         Krr[i][i]=4*2*n*ip
263     elif i == (N-1) :
264         Krr[i][i]=4*n*ip
265 for i in range(N):
266     if i == 0:
267         Krr[i][i+1]=2*n*ip
268     elif i == (N-1):
269         Krr[i][i-1]=2*n*ip
270     else:
271         Krr[i][i-1]=2*n*ip
272         Krr[i][i+1]=2*n*ip
273 Krrinv=np.linalg.inv(Krr)
274
275 Ktemp=np.dot(np.dot(Kur, Krrinv), Kru)
276 #Ktemp=Kur.dot(Krrinv).dot(Kru)
277 Ku_eft=Kuu-Ktemp #Matriz de Rigidez Efetiva
278 KSW=Ku_eft
279
280 """
281         Matriz KP
282 """
283 KP= [ [0 for j in range(N)] for i in range(N)] #matriz de zeros
284 for i in range(N):
285     if i==0:
286         KP[i][i]=(12+(alpha*12+(1-alpha)*3))*ip/(L**2)
287     elif i == (N-1):
288         KP[i][i]=12*ip/(L**2)
289     else:
290         KP[i][i]=12*2*ip/(L**2)
291 for i in range(N):
292     if i == 0:
293         KP[i][i+1]=-12*ip/(L**2)
294     elif i == (N-1):
295         KP[i][i-1]=-12*ip/(L**2)
296     else:
297         KP[i][i-1]=-12*ip/(L**2)
298         KP[i][i+1]=-12*ip/(L**2)
299
300 """
301 Calculo do determinante
302 """
303 Kglobal=KP+KSW
304 C=Kglobal-(Pf**2)*np.array(M)
305 dete=np.linalg.det(C)
306 print(dete,ip)
307 if dete_ant<0 and dete>0:

```



```

308     cond=1
309     if dete_ant>0 and dete<0:
310         cond=1
311     dete=0
312     dete_ant=0
313     cond=-1
314     if x==1:
315         ip=ip-0.011
316     else:
317         ip=ip-0.11
318     %% 4a Iteracao
319     while cond < 0:
320         dete_ant=dete
321         if x==1:
322             ip+=0.001
323         else:
324             ip+=0.01
325     ""
326         Matriz KSW
327     ""
328     #Kuu
329     for i in range(N):
330         if i != (N-1):
331             Kuu[i][i]=12*2*n*ip/(L**2)
332         elif i == (N-1) :
333             Kuu[i][i]=12*n*ip/(L**2)
334     for i in range(N):
335         if i == 0:
336             Kuu[i][i+1]=-12*n*ip/(L**2)
337         elif i == (N-1):
338             Kuu[i][i-1]=-12*n*ip/(L**2)
339         else:
340             Kuu[i][i-1]=-12*n*ip/(L**2)
341             Kuu[i][i+1]=-12*n*ip/(L**2)
342     #Kur e Kru
343     for i in range(N):
344         if i != (N-1):
345             Kur[i][i]=0
346         elif i == (N-1) :
347             Kur[i][i]=-6*n*ip/L
348     for i in range(N):
349         if i == 0:
350             Kur[i][i+1]=6*n*ip/L
351         elif i == (N-1):
352             Kur[i][i-1]=-6*n*ip/L
353         else:
354             Kur[i][i-1]=-6*n*ip/L
355             Kur[i][i+1]=6*n*ip/L
356     Kru=np.array(Kur).T
357     #Krr
358     for i in range(N):
359         if i != (N-1):
360             Krr[i][i]=4*2*n*ip
361         elif i == (N-1) :
362             Krr[i][i]=4*n*ip
363     for i in range(N):
364         if i == 0:
365             Krr[i][i+1]=2*n*ip
366         elif i == (N-1):
367             Krr[i][i-1]=2*n*ip
368         else:
369             Krr[i][i-1]=2*n*ip
370             Krr[i][i+1]=2*n*ip
371     Krrinv=np.linalg.inv(Krr)
372
373     Ktemp=np.dot(np.dot(Kur, Krrinv), Kru)
374     #Ktemp=Kur.dot(Krrinv).dot(Kru)
375     Ku_oft=Kuu-Ktemp #Matriz de rigidez efetiva
376     KSW=Ku_oft
377
378     ""
379         Matriz KP
380     ""
381     KP= [ [0 for j in range(N)] for i in range(N)] #matriz de zeros
382     for i in range(N):

```

```

383         if i==0:
384             KP[i][i]=(12+(alpha*12+(1-alpha)*3))*ip/(L**2)
385         elif i == (N-1):
386             KP[i][i]=12*ip/(L**2)
387         else:
388             KP[i][i]=12*2*ip/(L**2)
389     for i in range(N):
390         if i == 0:
391             KP[i][i+1]=-12*ip/(L**2)
392         elif i == (N-1):
393             KP[i][i-1]=-12*ip/(L**2)
394         else:
395             KP[i][i-1]=-12*ip/(L**2)
396             KP[i][i+1]=-12*ip/(L**2)
397
398     """
399     Calculo do determinante
400     """
401     Kglobal=KP+KSW
402     C=Kglobal-(Pf**2)*np.array(M)
403     dete=np.linalg.det(C)
404     print(dete,ip)
405     if dete_ant<0 and dete>0:
406         cond=1
407     if dete_ant>0 and dete<0:
408         cond=1
409
410     return Kglobal, ip

```

Código A.3: Espectro de resposta

```

1 def spech(ag,S,TB,TC,TD,T,eta):
2     if 0 <= T <= TB:
3         Sd=ag*S*(1+(T/TB)*((2.5*eta)-1))
4     elif TB < T <= TC:
5         Sd=ag*S*2.5*eta
6     elif TC < T <= TD:
7         Sd=ag*S*2.5*(TC/T)*eta
8         #if Sd < 0.2*ag:
9             # Sd=0.2*ag
10
11     else:
12         Sd=ag*S*2.5*((TC*TD)/(T**2))*eta
13         #if Sd < 0.2*ag:
14             # Sd=0.2*ag
15     return Sd

```

Código A.4: Função Normalizar Modos

```

1 import numpy as np
2 def normmodo(vn,N,M):
3     vnt=np.transpose(vn)
4     escalar=vnt.dot(M).dot(vn)
5     PHI=np.zeros(N)
6     for i in range(N):
7         PHI[i]=vn[i]/((escalar)**0.5)
8     return PHI

```

Código A.5: Função que por iteração calcula a relação entre inércias dos pilares e paredes

```

1 import numpy as np
2 #Calcula a razão entre o somatório das inércias das paredes e dos pilares que
3   perfaz uma certa tipologia estrutural.
4 #n=Iw/Ip
5 def ni(N,n):
6     #%% Vetor forcas
7     F1=0
8     for i in range(N):
9         F1=F1+(i+1)
10    F1=(1/F1)*N
11    F = np.zeros(N)
12    for i in range(N):
13        F[i] = (i+1)*F1
14    print(F)
15    #%% Grau de encastramento dos pilares

```

```

15 alpha=1
16 %% Matriz de Rigidez Portico
17 ip=1
18 L=3.2
19 KP= [ [0 for j in range(N)] for i in range(N)] #matriz zeros
20 for i in range(N):
21     if i==0:
22         KP[i][i]=(12+(alpha*12+(1-alpha)*3))*ip/(L**2)
23     elif i == (N-1):
24         KP[i][i]=12*ip/(L**2)
25     else:
26         KP[i][i]=12*2*ip/(L**2)
27 for i in range(N):
28     if i == 0:
29         KP[i][i+1]=-12*ip/(L**2)
30     elif i == (N-1):
31         KP[i][i-1]=-12*ip/(L**2)
32     else:
33         KP[i][i-1]=-12*ip/(L**2)
34         KP[i][i+1]=-12*ip/(L**2)
35 #print('KP',KP)
36 %% Calculo da matriz de rigidez Paredes
37
38 Kuu= [ [0 for j in range(N)] for i in range(N)]#matriz de zeros
39 Kur= [ [0 for j in range(N)] for i in range(N)]
40 Krr= [ [0 for j in range(N)] for i in range(N)]
41 Kru= [ [0 for j in range(N)] for i in range(N)]
42 for i in range(N):
43     if i != (N-1):
44         Kuu[i][i]=12*2*n*ip/(L**2)
45     elif i == (N-1) :
46         Kuu[i][i]=12*n*ip/(L**2)
47 for i in range(N):
48     if i == 0:
49         Kuu[i][i+1]=-12*n*ip/(L**2)
50     elif i == (N-1):
51         Kuu[i][i-1]=-12*n*ip/(L**2)
52     else:
53         Kuu[i][i-1]=-12*n*ip/(L**2)
54         Kuu[i][i+1]=-12*n*ip/(L**2)
55 #Kur e Kru
56 for i in range(N):
57     if i != (N-1):
58         Kur[i][i]=0
59     elif i == (N-1) :
60         Kur[i][i]=-6*n*ip/L
61 for i in range(N):
62     if i == 0:
63         Kur[i][i+1]=6*n*ip/L
64     elif i == (N-1):
65         Kur[i][i-1]=-6*n*ip/L
66     else:
67         Kur[i][i-1]=-6*n*ip/L
68         Kur[i][i+1]=6*n*ip/L
69 Kru=np.array(Kur).T
70 #Krr
71 for i in range(N):
72     if i != (N-1):
73         Krr[i][i]=4*2*n*ip
74     elif i == (N-1) :
75         Krr[i][i]=4*n*ip
76 for i in range(N):
77     if i == 0:
78         Krr[i][i+1]=2*n*ip
79     elif i == (N-1):
80         Krr[i][i-1]=2*n*ip
81     else:
82         Krr[i][i-1]=2*n*ip
83         Krr[i][i+1]=2*n*ip
84 Krrinv=np.linalg.inv(Krr)
85 #Matriz de rigidez efetiva
86 Ktemp=np.dot(np.dot(Kur, Krrinv), Kru)
87 #Ktemp=Kur.dot(Krrinv).dot(Kru)
88 KSW=Kuu-Ktemp
89 %%Calculo dos deslocamentos

```

```

90 Kglobal=KSW+KP
91 Fglobal=np.linalg.inv(Kglobal)
92 Uglobal=np.dot(Fglobal, F) #Deslocamentos globais
93
94 For asP=np.dot(KP, Uglobal)
95 For asSW=np.dot(KSW, Uglobal)
96
97 # %percentagem Vb
98 Vb_P=0
99 for i in range(N):
100     Vb_P=(Vb_P+For asP[i])
101 Vb_P=Vb_P/N
102 Vb_SW=0
103 for i in range(N):
104     Vb_SW=(Vb_SW+For asSW[i])
105 Vb_SW=Vb_SW/N
106 print('Percentagem Vb nos P rticos', Vb_P*100)
107 print('Percentagem Vb nos Paredes', Vb_SW*100)
108 return n

```

Código A.6: Função Coeficiente Solo

```

1 def coefsolo(smax, ag):
2     if ag<=1:
3         coefsolo=smax
4     elif ag < 4:
5         coefsolo=smax - (1/3)*(smax-1)*(ag-1)
6     else:
7         coefsolo=1
8     return coefsolo

```

Código A.7: Função Coeficiente de correlação CQC

```

1 import numpy as np
2 def coefcorr(i, n, ac, pbi, csi):
3     roin=(8*(csi**2)*(1+(pbi[i]/pbi[n]))*((pbi[i]/pbi[n])**3/2))/(((1-((pbi[i]
4     ]/pbi[n])**2))**2)+4*(csi**2)*(pbi[i]/pbi[n])*((1+(pbi[i]/pbi[n]))**2))
5     return roin

```

Anexo B

Aceleração de Cálculo, a_d (m/s^2), e Categoria Sísmica do Ascensor

Município	Designação	Classe de Importância III					Classe de Importância IV				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1401	Abrantes	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0101	Águeda	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0901	Aguiar da Beira	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0701	Alandroal	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0102	Albergaria-a-Velha	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0801	Albufeira	1.75	1.98	2.14	3.19	2.27	2.36	2.39	2.40	3.25	2.42
1501	Alcácer do Sal	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
1402	Alcanena	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1001	Alcobaça	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1502	Alcochete	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
0802	Alcoutim	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
1101	Alenquer	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
0401	Alfândega da Fé	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1701	Aljó	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0803	Aljezur	2.19	2.29	2.36	3.29	2.41	2.95	2.95	2.95	3.93	2.95
0201	Aljustrel	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
1503	Almada	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
0902	Almeida	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1403	Almeirim	0.54	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0202	Almodôvar	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
1404	Alpiarça	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1201	Alter do Chão	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1002	Alvaiázere	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0203	Alvito	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
1115	Amadora	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
1301	Amarante	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0301	Amares	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0103	Anadia	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1003	Ansião	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1601	Arcos de Valdevez	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0601	Arganil	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1801	Armamar	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0104	Arouca	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0702	Arraiolos	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
1202	Arronches	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1102	Arruda dos Vinhos	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
0105	Aveiro	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1203	Avis	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1103	Azambuja	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
1302	Baião	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0302	Barcelos	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0204	Barrancos	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82

Legenda

Categoria sísmica do ascensor 0 Categoria sísmica do ascensor 1 Categoria sísmica do ascensor 2 Categoria sísmica do ascensor 3

Município	Designação	Classe de Importância III					Classe de Importância IV				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1504	Barreiro	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
1004	Batalha	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0205	Beja	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
0501	Belmonte	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1405	Benavente	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
1005	Bombarral	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
0703	Borba	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1702	Boticas	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0303	Braga	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0402	Bragança	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0304	Cabeceiras de Basto	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1104	Cadaval	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
1006	Caldas da Rainha	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1602	Caminha	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1204	Campo Maior	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0602	Cantanhede	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0403	Carrazeda de Ansiães	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1802	Carregal do Sal	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1406	Cartaxo	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
1105	Cascais	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
1007	Castanheira de Pêra	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0502	Castelo Branco	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0106	Castelo de Paiva	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1205	Castelo de Vide	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1803	Castro Daire	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0804	Castro Marim	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
0206	Castro Verde	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
0903	Celorico da Beira	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0305	Celorico de Basto	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1407	Chamusca	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1703	Chaves	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1804	Cinfães	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0603	Coimbra	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0604	Condeixa-a-Nova	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1408	Constância	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1409	Coruche	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
0503	Covilhã	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1206	Crato	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0207	Cuba	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
1207	Elvas	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1410	Entroncamento	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0107	Espinho	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0306	Esposende	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0108	Estarreja	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0704	Estremoz	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0705	Évora	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
0307	Fafe	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0805	Faro	1.75	1.98	2.14	3.19	2.27	2.36	2.39	2.40	3.25	2.42
1303	Felgueiras	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0208	Ferreira do Alentejo	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
1411	Ferreira do Zêzere	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0605	Figueira da Foz	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0904	Figueira de Castelo Rodrigo	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1008	Figueiró dos Vinhos	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0905	Fornos de Algodres	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0404	Freixo de Espada à Cinta	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1208	Fronteira	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0504	Fundão	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1209	Gavião	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24

Legenda

Categoria sísmica do ascensor 0 Categoria sísmica do ascensor 1 Categoria sísmica do ascensor 2 Categoria sísmica do ascensor 3

Município	Designação	Classe de Importância III					Classe de Importância IV				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0606	Góis	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1412	Golegã	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1304	Gondomar	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0906	Gouveia	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1505	Grândola	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
0907	Guarda	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0308	Guimarães	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0505	Idanha-a-Nova	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0110	Ílhavo	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0806	Lagoa	2.19	2.29	2.36	3.29	2.41	2.95	2.95	2.95	3.93	2.95
0807	Lagos	2.19	2.29	2.36	3.29	2.41	2.95	2.95	2.95	3.93	2.95
1805	Lamego	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1009	Leiria	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1106	Lisboa	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
0808	Loulé	1.75	1.98	2.14	3.19	2.27	2.36	2.39	2.40	3.25	2.42
1107	Loures	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
1108	Lourinhã	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
0607	Lousã	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1305	Lousada	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1413	Mação	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0405	Macedo de Cavaleiros	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1109	Mafra	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
1306	Maia	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1806	Mangualde	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0908	Manteigas	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1307	Marco de Canaveses	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1010	Marinha Grande	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1210	Marvão	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1308	Matosinhos	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0111	Mealhada	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0909	Mêda	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1603	Melgaço	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0209	Mértola	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
1704	Mesão Frio	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0608	Mira	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0609	Miranda do Corvo	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0406	Miranda do Douro	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0407	Mirandela	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0408	Mogadouro	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1807	Moimenta da Beira	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1506	Moita	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
1604	Monção	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0809	Monchique	1.75	1.98	2.14	3.19	2.27	2.36	2.39	2.40	3.25	2.42
1705	Mondim de Basto	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1211	Monforte	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1706	Montalegre	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0706	Montemor-o-Novo	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
0610	Montemor-o-Velho	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1507	Montijo	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
0707	Mora	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1808	Mortágua	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0210	Moura	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
0708	Mourão	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
1707	Murça	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0112	Murtosa	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1011	Nazaré	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1809	Nelas	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1212	Nisa	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1012	Óbidos	0.54	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24

Legenda

Categoria sísmica do ascensor 0 Categoria sísmica do ascensor 1 Categoria sísmica do ascensor 2 Categoria sísmica do ascensor 3

Município	Designação	Classe de Importância III					Classe de Importância IV				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0211	Odemira	1.75	1.98	2.14	3.19	2.27	2.36	2.39	2.40	3.25	2.42
1116	Odivelas	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
1110	Oeiras	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
0506	Oleiros	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0810	Olhão	1.75	1.98	2.14	3.19	2.27	2.36	2.39	2.40	3.25	2.42
0113	Oliveira de Azeméis	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1810	Oliveira de Frades	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0114	Oliveira do Bairro	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0611	Oliveira do Hospital	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1421	Ourém	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0212	Ourique	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
0115	Ovar	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1309	Paços de Ferreira	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1508	Palmela	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
0612	Pampilhosa da Serra	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1310	Paredes	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1605	Paredes de Coura	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1013	Pedrógão Grande	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0613	Penacova	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1311	Penafiel	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1811	Penalva do Castelo	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0507	Penamacor	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1812	Penedono	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0614	Penela	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1014	Peniche	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
1708	Peso da Régua	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0910	Pinhel	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1015	Pombal	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1606	Ponte da Barca	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1607	Ponte de Lima	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1213	Ponte de Sôr	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1214	Portalegre	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0709	Portel	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
0811	Portimão	2.19	2.29	2.36	3.29	2.41	2.95	2.95	2.95	3.93	2.95
1312	Porto	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1016	Porto de Mós	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0309	Póvoa de Lanhoso	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1313	Póvoa de Varzim	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0508	Proença-a-Nova	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0710	Redondo	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0711	Reguengos de Monsaraz	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
1813	Resende	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1709	Ribeira de Pena	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1414	Rio Maior	0.54	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1710	Sabrosa	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0911	Sabugal	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1415	Salvaterra de Magos	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
1814	Santa Comba Dão	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0109	Santa Maria da Feira	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1711	Santa Marta de Penaguião	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1416	Santarém	0.54	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1509	Santiago do Cacém	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
1314	Santo Tirso	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0812	São Brás de Alportel	1.75	1.98	2.14	3.19	2.27	2.36	2.39	2.40	3.25	2.42
0116	São João da Madeira	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1815	São João da Pesqueira	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1816	São Pedro do Sul	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1417	Sardoal	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1817	Sátão	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74

Legenda

Categoria sísmica do ascensor 0
Categoria sísmica do ascensor 1
Categoria sísmica do ascensor 2
Categoria sísmica do ascensor 3

Município	Designação	Classe de Importância III					Classe de Importância IV				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0912	Seia	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1510	Seixal	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
1818	Sernancelhe	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0213	Serpa	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
0509	Sertã	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1511	Sesimbra	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
1512	Setúbal	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
0117	Sever do Vouga	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0813	Silves	1.75	1.98	2.14	3.19	2.27	2.36	2.39	2.40	3.25	2.42
1513	Sines	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
1111	Sintra	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
1112	Sobral de Monte Agraço	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
0615	Soure	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1215	Sousel	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0616	Tábua	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1819	Tabuaço	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1820	Tarouca	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0814	Tavira	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
0310	Terras de Bouro	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1418	Tomar	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1821	Tondela	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0409	Torre de Moncorvo	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1419	Torres Novas	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1113	Torres Vedras	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
0913	Trancoso	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1318	Trofa	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0118	Vagos	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0119	Vale de Cambra	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1608	Valença	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1315	Valongo	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1712	Valpaços	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0712	Vendas Novas	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
0713	Viana do Alentejo	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
1609	Viana do Castelo	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0214	Vidigueira	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
0311	Vieira do Minho	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0510	Vila de Rei	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0815	Vila do Bispo	2.19	2.29	2.36	3.29	2.41	2.95	2.95	2.95	3.93	2.95
1316	Vila do Conde	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0410	Vila Flor	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1114	Vila Franca de Xira	0.88	1.14	1.32	2.16	1.47	1.18	1.46	1.66	2.65	1.82
1420	Vila Nova da Barquinha	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
1610	Vila Nova de Cerveira	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0312	Vila Nova de Famalicão	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0914	Vila Nova de Foz Côa	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1317	Vila Nova de Gaia	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1822	Vila Nova de Paiva	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0617	Vila Nova de Poiares	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
1713	Vila Pouca de Aguiar	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1714	Vila Real	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0816	Vila Real de Santo António	1.31	1.59	1.79	2.82	1.95	1.77	1.99	2.15	3.20	2.28
0511	Vila Velha de Ródão	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74
0313	Vila Verde	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0714	Vila Viçosa	0.53	0.71	0.84	1.40	0.95	0.71	0.94	1.11	1.83	1.24
0411	Vímioso	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0412	Vinhais	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1823	Viseu	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
0314	Vizela	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
1824	Vouzela	0.35	0.45	0.53	0.82	0.59	0.42	0.56	0.66	1.10	0.74

Legenda

Categoria sísmica do ascensor 0 Categoria sísmica do ascensor 1 Categoria sísmica do ascensor 2 Categoria sísmica do ascensor 3

Município	Designação	Classe de Importância III					Classe de Importância IV				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
	Ilha da Madeira										
3101	Calheta	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
3102	Câmara de Lobos	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
3103	Funchal	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
3104	Machico	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
3105	Ponta do Sol	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
3106	Porto Moniz	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
3107	Ribeira Brava	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
3108	Santa Cruz	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
3109	Santana	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
3110	São Vicente	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.41	0.56	0.66	1.10	0.74
	Ilha de Porto Santo										
3201	Porto Santo	0.31	0.41	0.49	0.82	0.55	0.21	0.56	0.66	1.10	0.74

Legenda

 Categoria sísmica do ascensor 0
 Categoria sísmica do ascensor 1
 Categoria sísmica do ascensor 2
 Categoria sísmica do ascensor 3

Município	Designação	Classe de Importância III					Classe de Importância IV				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
	Ilha de Santa Maria										
4101	Vila do Porto	0.58	0.69	0.78	1.09	0.84	0.68	0.78	0.86	1.17	0.92
	Ilha de São Miguel										
4201	Lagoa	0.72	0.82	0.89	1.19	0.94	0.85	0.91	0.96	1.23	0.99
4202	Nordeste	0.72	0.82	0.89	1.19	0.94	0.85	0.91	0.96	1.23	0.99
4203	Ponta Delgada	0.72	0.82	0.89	1.19	0.94	0.85	0.91	0.96	1.23	0.99
4204	Povoação	0.72	0.82	0.89	1.19	0.94	0.85	0.91	0.96	1.23	0.99
4205	Ribeira Grande	0.72	0.82	0.89	1.19	0.94	0.85	0.91	0.96	1.23	0.99
4206	Vila Franca do Campo	0.72	0.82	0.89	1.19	0.94	0.85	0.91	0.96	1.23	0.99
	Ilha Terceira										
4301	Angra do Heroísmo	0.72	0.82	0.89	1.19	0.94	0.85	0.91	0.96	1.23	0.99
4302	Praia da Vitória	0.72	0.82	0.89	1.19	0.94	0.85	0.91	0.96	1.23	0.99
	Ilha da Graciosa										
4401	Santa Cruz da Graciosa	0.58	0.69	0.78	1.09	0.84	0.68	0.78	0.86	1.17	0.92
	Ilha de São Jorge										
4501	Calheta	0.72	0.82	0.89	1.19	0.94	0.85	0.91	0.96	1.23	0.99
4502	Velas	0.72	0.82	0.89	1.19	0.94	0.85	0.91	0.96	1.23	0.99
	Ilha do Pico										
4601	Lajes do Pico	0.72	0.82	0.89	1.19	0.94	0.85	0.91	0.96	1.23	0.99
4602	Madalena	0.72	0.82	0.89	1.19	0.94	0.85	0.91	0.96	1.23	0.99
4603	São Roque do Pico	0.72	0.82	0.89	1.19	0.94	0.85	0.91	0.96	1.23	0.99
	Ilha do Faial										
4701	Horta	0.72	0.82	0.89	1.19	0.94	0.85	0.91	0.96	1.23	0.99
	Ilha das Flores										
4801	Lajes das Flores	0.32	0.42	0.49	0.73	0.55	0.37	0.48	0.56	0.83	0.62
4802	Santa Cruz das Flores	0.32	0.42	0.49	0.73	0.55	0.37	0.48	0.56	0.83	0.62
	Ilha do Corvo										
4901	Corvo	0.32	0.42	0.49	0.73	0.55	0.37	0.48	0.56	0.83	0.62

Legenda

 Categoria sísmica do ascensor 0
 Categoria sísmica do ascensor 1
 Categoria sísmica do ascensor 2
 Categoria sísmica do ascensor 3