

Reabilitação Sísmica de Edifícios Através da Aplicação de Isolamento de Base

Ana Sofia Lourenço Duarte

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Professor Doutor Luís Manuel Coelho Guerreiro

Júri

Presidente: Prof. Doutor António Manuel Figueiredo Pinto da Costa

Orientador: Professor Doutor Luís Manuel Coelho Guerreiro

Vogal: Professor Doutor João José Rio Tinto de Azevedo

Outubro de 2017

Agradecimentos

No final deste percurso académico, considero importante agradecer a todos aqueles que se mantiveram ao meu lado, nas mais diversas fases, quer nas mais complicadas, quer naquelas em que partilhei todas as conquistas.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, o professor Luís Manuel Coelho Guerreiro, por toda a sua disponibilidade e cooperação na realização deste trabalho e pela suas valiosas instruções e correções.

Um enorme obrigada à minha mãe, por tudo. Sem a sua ajuda, apoio e motivação constante, não me teria sido possível alcançar um dos maiores objetivos da minha vida.

Ao meu pai, por acreditar sempre em mim e por me ajudar a ultrapassar todos os obstáculos de uma forma positiva.

Ao meu irmão, por ter a capacidade de me conseguir animar nos momentos difíceis de preocupação, exaustão e angústia.

Aos meus avós, pela sua constante preocupação e transmissão de ânimo, força e coragem.

Às minhas amigas, pelo seu apoio incansável e por estarem sempre ao meu lado, demonstrando interesse no decorrer de todo o percurso.

Resumo

Os edifícios projetados sem preocupações quanto à segurança sísmica estão sujeitos a sofrerem danos ou mesmo a colapsarem devido à ocorrência de sismos. É, por isso, necessário reabilitar estas estruturas, tornando-as seguras para a vida humana.

O sistema de isolamento de base apresenta uma ótima solução de reabilitação sísmica, pois tem a capacidade de eliminar ou reduzir significativamente danos estruturais e não estruturais. Esta medida de reforço, permite manter a arquitetura do edifício e pode ser aplicada sem ser necessário interromper as atividades do mesmo.

O uso de sistemas de isolamento de base para proteção sísmica de estruturas novas é um conceito bem assente no meio técnico, no entanto, o seu uso como técnica de reforço ainda levanta algumas questões, principalmente no que respeita à inserção dos aparelhos numa estrutura existente, sendo esta questão o foco do presente estudo.

Apresenta-se um levantamento dos diferentes procedimentos que podem ser adotados na reabilitação sísmica de edifícios com isolamento de base para os diferentes tipos de estrutura: estruturas de alvenaria, de betão armado e metálicas.

Aplicou-se isolamento de base a um edifício existente, testando vários esquemas de montagem, com o intuito de avaliar de que modo a inserção dos aparelhos de apoios na estrutura, interfere na variação de esforços nos elementos estruturais.

Concluiu-se que para otimizar o esquema de montagem deve-se começar por instalar os isoladores nos pilares que apresentam menores deformações verticais. Intervir de forma uniforme é o modo mais eficaz de reduzir a variação de esforços.

Palavras-chave: Reabilitação Sísmica, Sistemas de Proteção Sísmica, Isolamento de Base, Procedimentos, Esquemas de Montagem, Aparelhos de Apoio.

Abstract

The buildings with no seismic design are exposed to undergo damages or even to collapse due to the occurrence of unexpected earthquakes. Therefore, it is necessary to rehabilitate these structures, making them secure to preserve life safety.

The base isolation system is a good solution for the seismic rehabilitation since it has the capacity to eliminate or to reduce fairly structural and non-structural damages. As a measure of retrofit, it allows to keep the architecture of the building and can be applied without interrupting the activities of the building.

The use of the seismic isolation system for seismic protection on new structures is a well-known concept in the technical environment. However, its use as retrofit technique still raises some questions, mainly in what concerns the insertion of equipment in an existing structure. This question is the focus of the present study.

It is presented a collection of the different procedures that can be adopted in the seismic rehabilitation of buildings with seismic isolation system for different kind of structures: masonry structures, concrete structures and steel structures.

Seismic isolation was applied on an existing building, testing some sequences of installation with the objective of evaluate how the insertion of the equipment of support in the structure interferes in the variation of the efforts in the structural elements.

In conclusion, to optimize the scheme of installation, installing the isolators in the columns that have less vertical displacement should be the first step. To intervene in a uniform way is the most effective way of reducing the variation of efforts.

Key-words: Seismic Rehabilitation; Systems of seismic protection; Isolation Base; Procedures, Installation Sequence; Isolators

Índice

Reabilitação Sísmica de Edifícios Através da Aplicação de Isolamento de Base	i
1 Introdução	1
1.1 Motivação do Trabalho	1
1.2 Enquadramento e Síntese	2
1.3 Objetivos do Trabalho	3
1.4 Metodologia.....	4
1.5 Estrutura da Dissertação	4
2 Isolamento Sísmico de Base.....	5
2.1 Conceito	5
2.2 História	10
2.3 Tipos de Sistemas de Isolamento de base	10
2.3.1 Apoios de Borracha de Alto Amortecimento (HDRB)	11
2.3.2 Blocos de Borracha com Núcleo de Chumbo (LRB)	16
2.3.3 Apoios Pendulares com Atrito (FPB)	18
2.4 Modelo de Análise.....	19
2.4.1 Comportamento dos aparelhos	20
2.4.2 Análise linear equivalente (análise linear simplificada)	20
2.4.3 Análise Modal	23
2.5 Dimensionamento do sistema de isolamento	23
2.5.1 Critérios de conformidade.....	24
2.5.2 Controlo de movimentos.....	25
2.5.3 Propriedades do sistema de isolamento	25
2.5.4 Verificações da segurança no estado limite último	26
3 Reabilitação Sísmica através da aplicação da Técnica de Isolamento de Base	27
3.1 Vantagens do isolamento de base em relação a outras técnicas	27
3.2 Projeto de Reforço Sísmico com Isolamento de Base	28
3.3 Intervenção	29
3.3.1 Procedimentos para estruturas em alvenaria.....	29
3.3.2 Procedimentos para estruturas de betão armado	34
3.4 Configurações de isolamento sísmico	40
3.4.1 Sistema de segurança	41
3.4.2 Distribuição geométrica dos aparelhos	41
3.4.3 Ligações do edifício ao exterior	41
3.4.4 Detalhes da ligação	42
3.4.5 Previsão de remoção dos aparelhos	43
3.5 Exemplos de Reforço Sísmico em edifícios existentes utilizando isolamento de base	43
4 Caso de Estudo	53

4.1	Caracterização da estrutura.....	53
4.2	Caracterização da Ação Sísmica.....	54
4.3	Análise da estrutura de base fixa.....	55
4.4	Dimensionamento dos aparelhos de apoio	56
4.5	Esquema de Montagem dos Aparelhos de Apoio	61
4.6	Otimização do esquema de montagem	69
4.7	Diferenças entre os dois esquemas de montagem	70
4.7.1	Vigas que melhoraram o seu comportamento no geral	70
4.7.2	Vigas pequenas que melhoraram.....	71
4.7.3	Vigas que mantiveram a mesma variação de momentos, mas um comportamento mais uniforme ⁷²	
4.7.4	Vigas que mantiveram o mesmo comportamento, mas alteram as variações em função da ordem das intervenções.....	72
4.7.5	Vigas que não sofreram alterações.....	73
4.7.6	Vigas que pioraram.....	73
4.8	Análise da estrutura com isolamento de base.....	74
4.9	Reforço das vigas	75
5	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	77
5.1	Conclusões	77
5.2	Desenvolvimentos Futuros	79
	Referências Bibliográficas	81
	ANEXOS.....	85
	Anexo A- Acelerogramas.....	85
	Anexo B - Valores das acelerações espectrais referentes aos 7 acelerogramas para um amortecimento de 12%.....	87
	Anexo C – Excerto dos Catálogos dos aparelhos HBRD da empresa Industriale.....	88
	Anexo D – Valores utilizados na construção dos diagramas de momentos em 4.5.....	89
	Anexo E – Valores utilizados na construção dos diagramas de momentos em 4.7	93
	Anexo F – Valores utilizados na construção dos diagramas de momentos em 4.9	100

Índice de Figuras

Figura 1 – Diferença entre danos causados após um sismo entre um edifício reforçado sismicamente e outro não (SPES, 2012)	2
Figura 2 – Ideia de sistema de isolamento de base (Guerreiro, 2004)	5
Figura 3 - Forma de espectro de resposta do Eurocódigo 8 (CEN, 2010)	6
Figura 4 - Redução das acelerações devido à aplicação do isolamento de base (Tinman et al., 2017) 6	
Figura 5 - Espectro de resposta elástica horizontal de acelerações (A) e de deslocamentos (B) (Amaral, 2013)	7
Figura 6 - Enquadramento das frequências de estruturas com isolamento e estruturas de base fixa no intervalo de frequências com maior conteúdo energético da ação sísmica (Guerreiro, 2004).	8
Figura 7 - Modos de deformação de edifícios de base fixa (A) e de base isolada (B) (Mayes & Naeim, 2014)	8
Figura 8 - Danos em edifícios de base fixa (A) e de base isolada (B) (Barbat & Bozzo, 1997)	9
Figura 9 - Efeito das condições do solo na resposta da estrutura (Amaral, 2013)	10
Figura 10 - Apoios de borracha de alto amortecimento (HDRB) (FIP Industriale, 2016)	12
Figura 11 – Modo de deformação de Apoios de borracha de alto amortecimento. (FIP Industriale, 2016)	12
Figura 12 - Ilustração do significado do fator de forma (adaptado de Guerreiro, 2003)	13
Figura 13 - Modo de deformação vertical do bloco de elastómero (Guerreiro, 2003)	14
Figura 14 - Variação do módulo de distorção, G , em função da distorção, γ (FIP Industriale, 2016) ..	15
Figura 15 - Variação do amortecimento, ζ , em função da distorção, γ (FIP Industriale, 2016)	15
Figura 16 - Curva histerética típica dos apoios de borracha de alto amortecimento, relação força-distorção (FIP Industriale, 2016)	15
Figura 17 - Blocos de Borracha com Núcleo de Chumbo (LRB) (FIP Industriale, 2016)	16
Figura 18 – Relação força–deslocamento de um apoio LRB sob ensaio cíclico de corte (A). Definição do modelo bilinear de aproximação ao comportamento do apoio LRB (B) (Figueiredo, 2007)	17
Figura 19 - Relação força–deslocamento de um apoio LRB sob ensaio cíclico de corte (Figueiredo, 2007)	17
Figura 20 - Apoios pendulares com atrito (FPS) (FIP Industriale, 2016)	18
Figura 21 - Relação bilinear força-d deslocamento de apoios FPS (FIP Industriale, 2016)	19
Figura 22 - Influência da relação de períodos na eficácia do comportamento da estrutura com isolamento (Guerreiro 2004)	22
Figura 23 – Espectro de resposta equivalente (Guerreiro, 2004)	23
Figura 24 – Isolamento de base em estruturas de alvenaria (Matsagar & Jangid, 2008)	30
Figura 25 - Procedimento de instalação de isoladores em fundações de alvenaria (adapatado de Mezzi et al., 2012)	31
Figura 26 - Procedimento de instalação de isoladores em paredes de alvenaria (adaptado de Melkumyan et al., 2011)	32
Figura 27 – Imagens ilustrativas do procedimento 2 (adaptado de Melkumyan et al., 2011)	33

Figura 28 - Procedimento de instalação de isoladores em colunas de alvenaria (adaptado de Melkumyan, 2014).....	33
Figura 29 - Isolamento de base em estruturas de betão armado (Matsagar & Jangid, 2008)	34
Figura 30 - Procedimento de instalação de isoladores em colunas de betão armado (adaptado de Luca'Trombetta et al, 2014)	35
Figura 31- Procedimento de instalação de isoladores em colunas de betão armado (adaptado de Luca'Trombetta et al, 2014)	36
Figura 32 - Procedimento de instalação de isoladores em fundações de betão armado (adaptado de Luca'Trombetta et al, 2014)	37
Figura 33 - Procedimento de instalação de isoladores em fundações de betão armado (adaptado de Johnson, 2012).....	38
Figura 34 - Procedimento de instalação de isoladores em fundações de betão armado (adaptado de Oliveto et al, 2014)	39
Figura 35 - Procedimento de instalação de isoladores em fundações de betão armado (adaptado de Briseghella et al., 2012)	40
Figura 36 - Sistema de suporte para: aparelhos no topo das colunas, (A); aparelhos na base das colunas, (B) (Mayes & Naeim, 2014)	41
<i>Figura 37 - Ligação flexível em tubagens de rede de esgoto (A), rede de incêndios(B) e rede de gás (C) (adaptado de Guerreiro, 2011).....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 38 - Elevadores e escadas projetados de forma a se movimentarem em conjunto com a estrutura aquando de um sismo (Lanning et al ,2017).....</i>	<i>42</i>
Figura 39 - Detalhe de uma possível ligação (Mayes & Naeim, 2014).....	42
Figura 40 - Edifício “Iasi City Hall” (A), Detalhe do plano de isolamento (B), Distribuição dos aparelhos de apoio (C), (Gilani & Miyamoto, 2012).....	44
Figura 41 - Edifício “The Bucharest City Hall Building” (A), proposta de intervenção (B), viga de contenção e aparelhos de apoio (Iordachescu & Iordachescu, 2012).....	45
Figura 42 -Edifício de apartamentos reforçados com isolamento de base (Melkumyan, 2014)	46
Figura 43 – Escola reforçada com isolamento de base (A), distribuição dos aparelhos isoladores (B) (Melkumyan, 2014).....	46
Figura 44 - Edifícios da vila de Solarino (A), fundações originais do edifício (B), distribuição dos aparelhos isoladores (C) (Adpatado de (Oliveto & Marletta, 2005))	47
Figura 45 – Edifício “Los Angeles City Hall” (Martin, s.d.)	48
Figura 46 – Procedimento de instalação de aparelhos numa estrutura metálica com adição de paredes (adaptado de Martin, 2016 e de Youssef & Hata, 2005).....	49
Figura 47 – Sensores (Youssef & Hata, 2005).....	49
Figura 48 - Edifício “San Francisco City Hall” (Canfield, 2016).....	50
Figura 49 - Procedimento de instalação de aparelhos numa estrutura metálica (adaptado de Canfield, s.d.).....	51
Figura 50 -Edifício “Oakland City Hall” (A), Técnica “column cut” utilizada na intervenção de reforço do edifício (B) (adaptado de (Forell / Elsesser Engineers, s.d.) e (Sheedy Drayage Co., s.d.)	51

Figura 51 - Modelo estrutural (A), planta do primeiro piso (B)	54
Figura 52 - Modos de vibração: segundo x (A), de torção (B), segundo y (C)	55
Figura 53 - Distribuição e numeração dos aparelhos de apoio.....	56
Figura 54 -Espectro de resposta relativo à média dos 7 acelerogramas adotados para um amortecimento de 12%	58
Figura 55 – Distribuição geométricas do tipo de aparelhos de apoio	60
Figura 56- Representação das primeiras três intervenções	63
Figura 57 – Representação das duas hipóteses para a quarta intervenção	64
Figura 58 – Nomenclaturas das vigas.....	64
Figura 59 - Variação de momentos das vigas 14-15Q, 13-14Q, 11-12Q e 10-11Q para as duas hipóteses testadas	65
Figura 60 - Representação das 3 hipóteses testadas na 5ª intervenção	66
Figura 61 – Comparação dos diagramas de momentos para as 3 hipóteses da 5ª intervenção.	66
Figura 62 - Comparação dos diagramas de momentos para as 3 hipóteses da 5ª intervenção	67
Figura 63 - Comparação dos diagramas de momentos para as 3 hipóteses da 5ª intervenção	67
Figura 64 – Variação de momentos numa viga pequena com colocação de apenas um aparelho apenas numa das extremidades	68
Figura 65 - Representação das ultimas duas intervenções	68
Figura 66 - Esquema de montagem.....	69
Figura 67 - Esquema de montagem otimizado	70
Figura 68 - Diagrama de momentos da viga 12-13Q devido ao primeiro esquema de montagem (A) e relativo ao esquema de montagem otimizado (B)	71
Figura 69 - Diagrama de momentos da viga 10S-T devido ao primeiro esquema de montagem (A) e relativo ao esquema de montagem otimizado (B)	71
Figura 70 - Diagrama de momentos da viga 13-14T devido ao primeiro esquema de montagem (A) e relativo ao esquema de montagem otimizado (B)	71
Figura 71 - Diagrama de momentos da viga 14T-U devido ao primeiro esquema de montagem (A) e relativo ao esquema de montagem otimizado (B)	72
Figura 72 - Diagrama de momentos da viga 11T-U devido ao primeiro esquema de montagem (A) e relativo ao esquema de montagem otimizado (B).	72
Figura 73 - Diagrama de momentos da viga 12-13U devido ao primeiro esquema de montagem (A) e relativo ao esquema de montagem otimizado (B)	73
Figura 74 - Diagrama de momentos da viga 10-11Q devido ao primeiro esquema de montagem (A) e relativo ao esquema de montagem otimizado (B)	73
Figura 75 - Modos de vibração: segundo x (A), segundo y (B).....	74
Figura 76 – Diagrama de momentos de todas as intervenções para o esquema de montagem otimizado	75
Figura 77 - Diagrama de momentos de todas as intervenções para o esquema de montagem otimizado	75

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Resumo da variação das cotas e áreas do edifício	53
Tabela 2 - Síntese das cargas aplicadas	54
Tabela 3 - Resultados da análise modal da estrutura de base fixa	55
Tabela 4 - Valores máximos do esforço normal, em kN, para a combinação envolvendo a ação sísmica	59
Tabela 5 - Aparelhos de apoio e respectivas características	60
Tabela 6 - Deslocamentos verticais em mm e esforço normal de cada pilar em kN	62
Tabela 7 - Resultados da análise modal da estrutura de base isolada	74

Lista de Abreviaturas

EC8, Eurocódigo 8

FPB, apoios pendulares com atrito (Friction Pendulum Bearings)

HDRB, apoios de borracha de alto amortecimento (High Damping Rubber Bearings)

LRB, apoios de borracha com núcleo de chumbo (Lead Rubber Bearings)

SI, Seismic isolator

Lista de Variáveis

Símbolos latinos

A_{Ed} , valor de cálculo de uma ação sísmica

D , diâmetro do aparelho de apoio

E_b , módulo de compressibilidade do elastómero

E_d , valor de cálculo do efeito das ações

G , módulo de distorção

$G_{k,j}$, valor característico da ação permanente j

K_1 , rigidez inicial de pré-plastificação

K_2 , rigidez de pós-plastificação,

K_e , rigidez horizontal efetiva

K_{eff} , rigidez efetiva

K_h , rigidez horizontal

K_v , rigidez vertical

M , massa da superestrutura

N , esforço axial

P , valor representativo de uma ação de pré-esforço

$Q_{k,i}$, valor característico da ação variável acompanhante

S , fator de forma

S_e , aceleração espectral

T_f , período fundamental

T_{eff} , período efetivo

b_2 , coeficiente que depende da forma da secção

d_{dc} , deslocamento máximo

d_r , valor de cálculo do deslocamento entre pisos

f_{isol} , frequência para o sistema de base isolada

f_{fixa} , frequência da estrutura de base fixa

f_j , forças horizontais aplicadas em cada nível da superestrutura

h , altura entre pisos

h_{el} , espessura da camada de elastómero

Símbolos gregos

H, fator de correção do amortecimento

ζ , amortecimento

ψ_2 , coeficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma ação variável

γ , distorção

γ_M , coeficiente parcial de uma propriedade do material

γ_x , fator de majoração dos deslocamentos sísmicos

v, coeficiente de redução que tem em conta o mais baixo período de retorno da ação sísmica associada ao requisito de limitação de danos.

1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se o motivo da escolha do tema, fazendo um enquadramento e uma síntese do mesmo. Referem-se os objetivos do trabalho e os métodos utilizados para solucionar o problema. Por último, indica-se a estrutura da dissertação, descrevendo sumariamente o conteúdo de cada um dos restantes capítulos.

1.1 Motivação do Trabalho

Os sismos são fenómenos geológicos com potencial destrutivo, inevitáveis e recorrentes. A sua previsão não é possível, mas, atendendo aos registos de sismos ocorridos e à identificação de falhas tectónicas ativas, é possível delimitarem-se zonas nas quais se esperam ocorrências sísmicas com determinadas características.

A sismicidade histórica de Portugal Continental e dos Açores regista a ocorrência de fortes sismos no passado e por isso existe uma grande possibilidade de o cenário se voltar a repetir.

Como apela a SPES (SPES, 2012): “Apesar de os sismos serem inevitáveis as suas principais consequências não o são”, pois os danos devidos a uma ocorrência sísmica podem ser mitigados se as estruturas forem dotadas de capacidade de resistência sísmica suficiente. Isto é possível, recorrendo à engenharia sísmica moderna que dispõe capacidade técnica e científica para projetar e reforçar estruturas capazes de resistir aos sismos.

Em Portugal, a partir da segunda metade da década de 50 do século XX, começou-se a desenvolver legislação técnica que obriga ao dimensionamento sísmo-resistente de edifícios novos. No entanto, as construções que já existiam não foram contempladas. Assim, a maior parte dos edifícios antigos não está dotada de capacidade resistente suficiente para suportar um abalo sísmico.

Esta é uma realidade que não pode ser ignorada e que requer medidas apropriadas de resolução. A área da reabilitação sísmica cresceu imenso nas últimas duas décadas, contudo o conhecimento de tecnologia de proteção sísmica é inferior ao que existe para construções novas. Com a atual transferência da atividade da construção nova para a reabilitação, reforça-se a necessidade de continuar a desenvolver tecnologias nesta área que promovam intervenções de reabilitação de elevada fiabilidade, que evitem o colapso das estruturas e que previnam a ocorrência de danos.

Para reforçar a importância do reforço sísmico estrutural apresenta-se a Figura 1, em que se pode observar a diferença nos danos causados devidos a um sismo no Faial, em 1998, entre dois edifícios. O edifício da direita não estava provido de qualquer capacidade resistente sísmica e o da esquerda tinha sido reforçado sísmicamente.



Figura 1 – Diferença entre danos causados após um sismo entre um edifício reforçado sismicamente e outro não (SPES, 2012)

Um entrave na boa execução das intervenções de reabilitação sísmica prende-se com o facto de não haver legislação ou recomendações técnicas que obriguem a considerar a questão da resistência sísmica em obras de reabilitação de edifícios antigos (SPES, 2012). A legislação existente referente a este tema resume-se ao artigo 9º, presente no decreto-lei 53/2014, prescreve: “As intervenções em edifícios existentes não podem diminuir as condições de segurança e de salubridade da edificação nem a segurança estrutural e sísmica do edifício.” Como não se exige qualquer evidência que indique qual a situação do edifício antes da intervenção, e com a pressão de se construir, muitas vezes não resta muito tempo para a fiscalização. Deste modo, não existem consequências no caso de incumprimento e este artigo é muitas vezes descurado e nem esta exigência mínima é satisfeita (Santos, 2017).

Na maioria das obras de reabilitação de edifícios antigos verifica-se que as intervenções se cingem a aspetos estéticos, de conforto e habitabilidade, quando deviam envolver também aspetos estruturais.

Se a reabilitação de edifícios antigos não acautelar o problema sísmico, pode aumentar a vulnerabilidade dos edifícios, aumentando o risco sísmico.

Surge assim a necessidade de se criar um documento regulamentar que reúna diretrizes claras com recomendações e normas técnicas para o reforço sísmico e que obrigue a ter em conta a segurança sísmica nas obras de reabilitação de edifícios. Simultaneamente, criar mecanismos de fiscalização sistemáticos e eficientes (SPES, 2012).

Dada a importância da contínua investigação e formação de pessoal especializado em técnicas de reforço sísmico de edifício, este foi o tema escolhido para o presente trabalho.

1.2 Enquadramento e Síntese

Na reabilitação sísmica de edifício, para além da tradicional estratégia de reforço sísmico através do acréscimo de resistência e da exploração da capacidade dúctil, existem outras estratégias que podem ser adotadas, nomeadamente, sistemas de proteção sísmica. Estes melhoram o comportamento sísmico das estruturas alterando as suas características dinâmicas ou aumentando a sua capacidade de dissipação de energia. Os sistemas de proteção sísmica estão divididos em

sistemas passivos, ativos e semi-ativos (Guerreiro, 2011).

Os sistemas passivos são sistema que não necessitam de fornecimento de energia para ativar os dispositivos, isto consegue-se com a própria excitação da estrutura (Guerreiro, 2011). Dentro dos sistemas passivos, destacam-se as estratégias de isolamento de base e de dissipação de energia. A sua conceção é a mais simples e a sua eficácia na proteção de estruturas tornam estes sistemas economicamente mais acessíveis e mais requisitados.

Os sistemas semi-ativos necessitam de uma pequena fonte de energia para adaptar as características dos dispositivos, de modo a controlar e a modificar a resposta da estrutura. Servem de exemplo os Tuned Mass Damper (TMD) semi-ativos.

Quanto aos sistemas ativos, estes necessitam de energia para modificar e controlar o movimento da estrutura. O seu funcionamento passa por contrariar os movimentos de um sismo, pela aplicação de forças externas no edifício, procurando contrariar esses movimentos. Na base de aplicação destes sistemas está a previsão da reação da estrutura ao evento sísmico. Como exemplo temos os TMD ativos.

O sistema de proteção sísmica tratado no presente trabalho é o isolamento sísmico de base. Este sistema consiste em isolar a estrutura das suas fundações, através da inserção de uma camada horizontal de baixa rigidez, permitindo que haja movimento entre o solo e a estrutura. Deste modo, possibilita-se que o edifício permaneça quase estacionário relativamente ao movimento do solo, reduzindo o deslocamento entre pisos e eliminando significativamente os danos aquando de um sismo. A principal consequência deste sistema na resposta da estrutura ao sismo é a redução da frequência de vibração. Com isto, há um aumento do período acompanhado pela redução das acelerações na estrutura e, conseqüentemente, das forças induzidas na estrutura devido ao sismo. Esta técnica apresenta um grande potencial como estratégia de proteção sísmica, pois, para além de evitar o colapso, reduz significativamente os danos que poderiam surgir devido a uma ocorrência sísmica, evitando posteriores obras de restauro. Além disso, como medida de reforço sísmico apresenta a vantagem de poder ser aplicada sem que seja necessário desocupar o edifício ou interromper as suas atividades e, no que toca a reabilitação de edifícios históricos, permite que seja feita a intervenção sem provocar quaisquer alterações a nível arquitetónico.

1.3 Objetivos do Trabalho

Com este trabalho pretende-se explorar a aplicação de isolamento de base em edifícios existentes. Para tal, o primeiro objetivo passa por elaborar uma síntese da regulamentação existente para o dimensionamento destes sistemas. Em seguida, procura-se aprofundar o estudo na fase de aplicação dos aparelhos na estrutura, subdividindo-o em duas partes. Uma parte procura fazer um levantamento de vários procedimentos possíveis de aplicação de isolamento de base a diferentes tipos de estruturas. Na outra parte, pretende-se dimensionar e aplicar um sistema de isolamento a um edifício em concreto, para que se possa detetar quais os problemas que possam surgir aquando da inserção dos aparelhos e quais as suas possíveis soluções.

1.4 Metodologia

Para síntese da regulamentação e elaboração da coletânea de procedimentos, a metodologia utilizada teve por base a recolha de informação disponível e a interpretação técnica da mesma. Para o caso de estudo, a modelação da aplicação de isolamento de base a um edifício, foi feita com o auxílio do programa *SAP2000* (CSI, 2017), que permitiu avaliar a melhor forma de inserir os aparelhos na estrutura.

1.5 Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos. No capítulo 2 é introduzido o conceito de isolamento de base e é feita uma pequena referência à sua história. São esquematizados os tipos de sistemas de isolamento de base, fazendo-se uma abordagem mais aprofundada aos sistemas mais utilizados. Por último, são resumidos os modelos de análise disponíveis e as regras de dimensionamento regulamentadas para estes aparelhos.

No terceiro capítulo é abordado o isolamento de base como técnica de reforço sísmico, apresentando as suas vantagens em relação a outras técnicas. É introduzido o projeto de reforço sísmico como isolamento de base, mais propriamente a parte das intervenções, onde é apresentada uma coletânea de procedimentos possíveis para diferentes tipos de estruturas. Alerta-se para algumas configurações de isolamento sísmico e por fim, são apresentados exemplos reais de reabilitação sísmica em edifícios históricos utilizando esta técnica.

No capítulo seguinte é integrado o caso de estudo, em que se aplicou um sistema de isolamento de base a uma estrutura existente. Em primeiro lugar é apresentado o dimensionamento do conjunto de aparelhos e, em seguida, é apresentada a investigação sobre a sequência de inserção dos aparelhos na estrutura, procurando definir o melhor esquema de montagem.

No último capítulo é feito um resumo de todas as conclusões tiradas ao longo do trabalho.

2 Isolamento Sísmico de Base

O isolamento sísmico de base é utilizado como medida de proteção contra os efeitos dos sismos. Os sismos são sentidos como movimentos vibratórios na superfície terrestre, originados pela libertação de energia, resultantes de movimentos tectónicos, que se propagam em todas as direções e sentidos na forma de ondas. Quando essas ondas atingem as fundações de uma estrutura, a fundação começa a vibrar, transmitindo esses movimentos do solo às estruturas (Gencoglu & Daskiran, 2017). Os esforços gerados podem superar a capacidade resistente das estruturas provocando danos. A ideia de isolamento sísmico de base é isolar a estrutura das suas fundações, inserindo uma camada horizontal deformável entre a estrutura e as fundações capaz de absorver os movimentos do solo. Permite assim que a estrutura permaneça quase imóvel relativamente aos movimentos do solo, resultando numa drástica redução dos danos nos elementos estruturais e não estruturais (Guisasola & Reboredo, 2017). Ora, esta medida não só previne o colapso, como ao reduzir os danos permite que os edifícios se mantenham operacionais após a ocorrência de um sismo, o que pode ser fundamental no caso de edifícios como centros de emergência, quartéis de bombeiros e hospitais (Ferraioli & Mandara, 2017).

Neste capítulo introduz-se o conceito do sistema de isolamento, uma breve abordagem sobre a sua história e alguns tipos de aparelhos que podem ser encontrados no mercado. Apresentam-se os modelos de análise e as regras de boa prática de dimensionamento que se encontram regulamentadas.

2.1 Conceito

Isolamento sísmico de base é um sistema de proteção sísmica que consiste em desacoplar as fundações da estrutura, através de uma camada de baixa rigidez horizontal que permite que haja movimento entre o solo e a estrutura, Figura 2. Esta superfície de descontinuidade é constituída por aparelhos de apoio, designados de isoladores. O conjunto dos isoladores denomina-se sistema de isolamento. Para maior eficácia, estes devem estar localizados próximos da base da estrutura, acima dos elementos de fundação. A parte da estrutura localizada acima da superfície de isolamento é designada por superestrutura e encontra-se isolada. A parte localizada abaixo da superfície de isolamento, incluindo as fundações, é denominada por subestrutura.

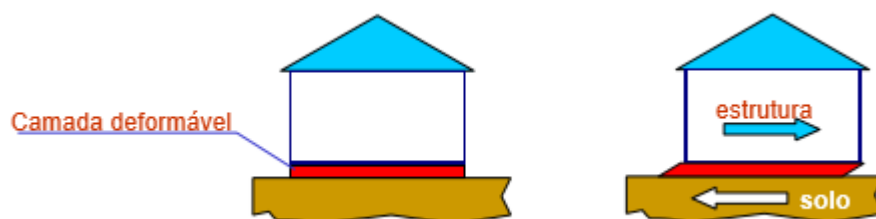


Figura 2 – Ideia de sistema de isolamento de base (Guerreiro, 2004)

A consequência imediata de tornar a estrutura mais flexível, pela existência da camada de rigidez horizontal baixa, é o aumento do período fundamental e, naturalmente, a diminuição da frequência

própria de vibração da estrutura. Pela análise do espectro de resposta do EC8 (CEN, 2010), representado na Figura 3 observa-se que o aumento do período fundamental (para $T > T_c$) é acompanhado pela descida da aceleração espectral e, conseqüentemente, por uma redução das forças sísmicas na estrutura (Meireles, 2011).

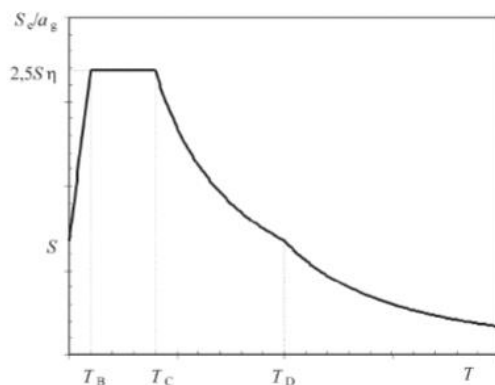


Figura 3 - Forma de espectro de resposta do Eurocódigo 8 (CEN, 2010)

Se o período fundamental do sistema sem isolamento sísmico se encontrar dentro do patamar de aceleração constante, entre T_B e T_C , a mudança para um dos patamares seguintes é visivelmente benéfica. Por outro lado, o aumento do amortecimento diminui o valor do coeficiente de correção, η , altera as ordenadas do espectro de resposta para valores mais baixos, o que demonstra a importância da capacidade de dissipação de energia dos sistemas de isolamento de base (Meireles, 2011).

Reduções nas forças de base são visíveis se o período de vibração da estrutura com isolamento for significativamente alto. A redução da resposta em termos de esforços internos depende principalmente da natureza do movimento sísmico do solo e do período da estrutura de base fixa (Tinman & Speicher, 2017). A Figura 4 mostra um caso de aplicação de isolamento de base num hospital no Peru, onde se explicita a redução que se observa nas acelerações quando se aumenta o período.

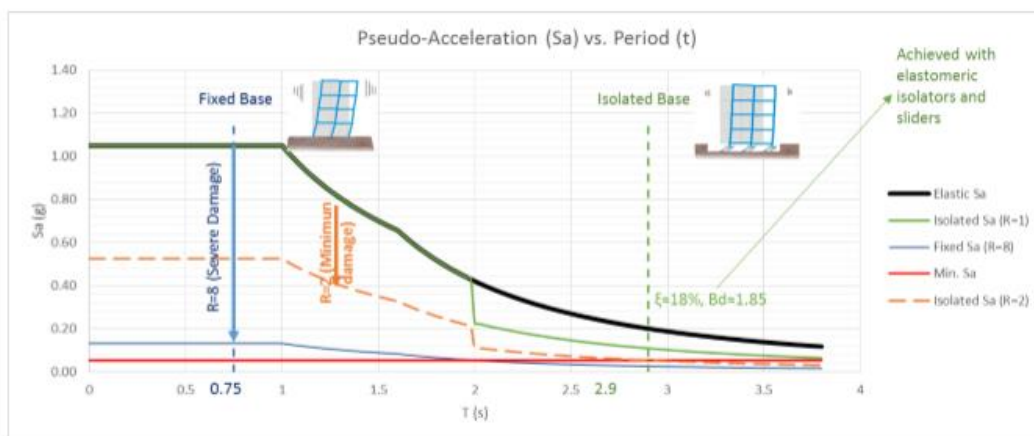


Figura 4 - Redução das acelerações devido à aplicação do isolamento de base (Tinman et al., 2017)

Como referido anteriormente, devido à baixa rigidez da superfície de isolamento que torna a

estrutura mais flexível, dá-se um aumento do período e, conseqüentemente, reduz-se a frequência própria de vibração, essencialmente por efeito da deformabilidade do sistema de isolamento de base. Contudo, isso implica um aumento dos deslocamentos totais da estrutura. Este efeito do isolamento sísmico na reposta dinâmica das estruturas pode ser ilustrado na Figura 5, onde mostra a relação existente entre a redução da frequência e das acelerações e a redução da frequência e o aumento dos deslocamentos totais. Apresenta-se um espectro de resposta elástico de acelerações e deslocamentos horizontais, respetivamente, segundo o EC8, referente um sismo do tipo 1, localizado na zona 1.3 (Lisboa), num solo duro do tipo A, rocha, para uma estrutura de classe de importância máxima IV. Apresenta-se a resposta para níveis de amortecimento de 2, 5 e 10% do amortecimento crítico.

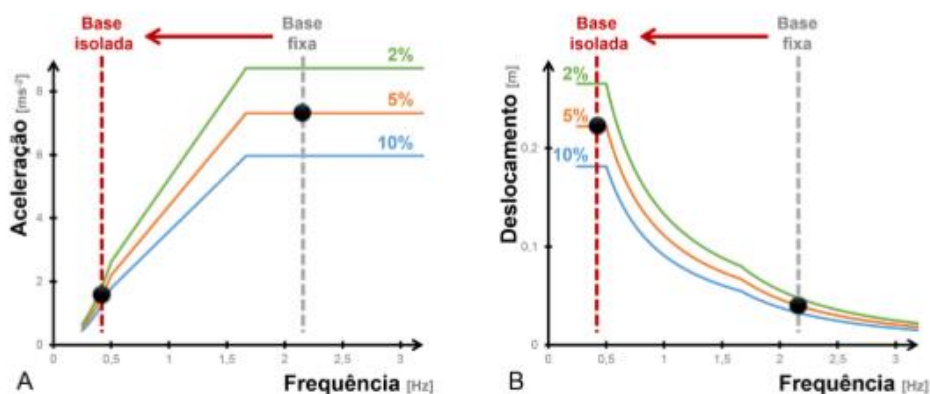


Figura 5 - Espectro de resposta elástica horizontal de acelerações (A) e de deslocamentos (B) (Amaral, 2013)

Verifica-se na Figura 5(A) a redução da frequência própria de vibração de uma estrutura que provoca uma grande redução no valor das acelerações impostas pelo sismo e, conseqüentemente, dos esforços originados pela ação sísmica. Por outro lado, conforme ilustrado na Figura 5(B), a diminuição da frequência fundamental provoca um aumento considerável dos deslocamentos.

Observa-se, também, que o aumento do amortecimento reduz a resposta quer em termos de acelerações e como deslocamentos. No entanto, esta redução em função do aumento do amortecimento, em estruturas de base isolada, sente-se mais em termos de deslocamentos do que em acelerações.

Este efeito de redução de acelerações como conseqüência da redução da frequência fundamental da estrutura resultada de esta passar a apresentar valores fora do intervalo das frequências de excitação predominantes das ações sísmicas, evitando assim que haja ocorrência de fenómenos de ressonância, Figura 6.



Figura 6 - Enquadramento das frequências de estruturas com isolamento e estruturas de base fixa no intervalo de frequências com maior conteúdo energético da ação sísmica (Guerreiro, 2004).

Embora o aumento da flexibilidade estrutural leve à ocorrência de deslocamento elevados, esses movimentos horizontais concentram-se no plano do sistema de isolamento, passando a restante estrutura a ter um comportamento semelhante a um corpo rígido. Atendendo a essas alterações, surge um novo primeiro modo de vibração em que a estrutura se move quase como um bloco rígido. Considerando esta hipótese, a participação modal da frequência fundamental torna-se bastante mais significativa do que os restantes modos de vibração, que os deixa com uma contribuição diminuta para os esforços e deslocamentos. A aplicação do isolamento sísmico permite assim minimizar, ou até mesmo quase eliminar, os deslocamentos relativos ocorridos entre pisos, como é possível observar-se na Figura 7 com o aumento dos deslocamentos, mas não a deformação.

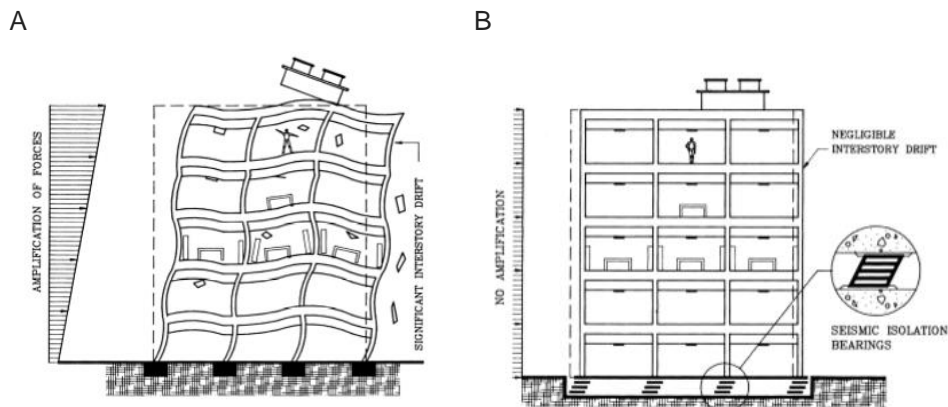


Figura 7 - Modos de deformação de edifícios de base fixa (A) e de base isolada (B) (Mayes & Naeim, 2014)

Este aspeto é de grande importância pois os danos normalmente registados nos elementos estruturais e não estruturais dos edifícios, durante um sismo, estão relacionados com a ocorrência de deslocamentos relativos entre pisos. A Figura 8(A) mostra o efeito dos deslocamentos relativos entre pisos de um edifício de base fixa, durante a ocorrência de um sismo, que provocam a fendilhação dos elementos estruturais.

Já numa estrutura isolada, Figura 8(B), os deslocamentos laterais concentram-se ao nível dos aparelhos isoladores. Assim os elementos estruturais e não estruturais exibem esforços inferiores aos registados para uma estrutura de base fixa, sendo que a superestrutura não evidencia danos apreciáveis.

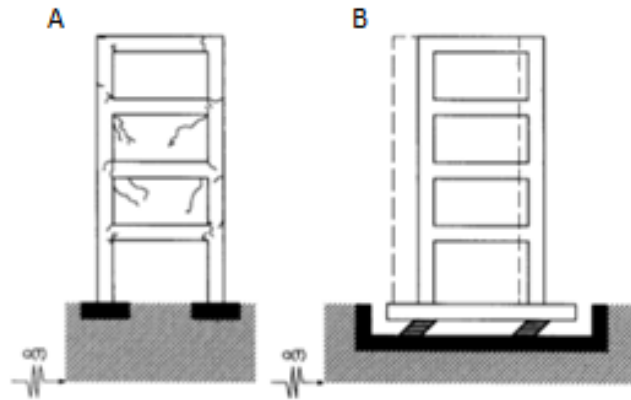


Figura 8 - Danos em edifícios de base fixa (A) e de base isolada (B) (Barbat & Bozzo, 1997)

O sistema de isolamento sísmico deverá também garantir a capacidade de restituição à posição inicial. Procura-se que o sistema de isolamento consiga voltar à sua posição inicial com vista a eliminar os deslocamentos residuais no final da ocorrência de um sismo e também prevenir a acumulação de deslocamentos, após a ocorrência de diversos eventos sísmicos.

Sendo os isoladores os únicos elementos de ligação entre o solo e a estrutura, estes devem apresentar elevada rigidez vertical de modo a assegurar uma ligação vertical rígida. Não apresentam alteração da resposta da estrutura à componente vertical da ação sísmica.

O sistema de isolamento permite corrigir os efeitos de torção estruturais (rotações segundo o eixo vertical). Com um dimensionamento adequado do sistema de isolamento de base é possível ajustar o centro de rigidez de forma a reduzir as excentricidades e, conseqüentemente, os efeitos de torção.

O isolamento de base é considerado um caso especial de proteção sísmica pela redução de rigidez. Apesar de ser eficiente, é preciso ter cuidado no dimensionamento do seu sistema, para não se introduzir uma rigidez demasiado baixa (Oliveto & Marletta, 2005).

Apesar dos sistemas de isolamento sísmico apresentarem bons resultados em termos de resposta às ocorrências sísmicas, esta técnica pode não ser adequada para todos os edifícios. Geralmente, essa técnica é mais eficaz em edifícios baixos e médios, pois as suas frequências fundamentais encontram-se no intervalo de frequências com maior conteúdo energético da ação sísmica (Gencoglu & Daskiran, 2017). No que diz respeito ao solo, quanto mais duro for o solo, mais eficiente será a utilização de sistemas de isolamento de base. Como se pode observar na Figura 9, a redução da frequência reduz o esforço de corte basal. Já num solo brando, por ser mais deformável, produz acelerações maiores para frequências mais baixas o que ia resultar em um esforço de corte basal superior na estrutura isolada em relação à da estrutura não-isolada.



Deve-se ainda ter atenção à existência de estruturas adjacentes ao edifício onde será aplicado o sistema de isolamento, pois devido ao aumento dos deslocamentos totais é necessário garantir que há espaço suficiente para o edifício se movimentar sem que haja embate contra as estruturas vizinhas.

2.2 História

Foi no início do século XX que apareceu, pela primeira vez, a ideia de isolar estruturas através da implementação de um sistema de proteção sísmica, que poderá estar na origem do que é hoje conhecido como Isolamento de Base. Esta patente foi registada em Munique, em 1906, e consistia numa placa rígida que servia de base de suporte ao edifício e que, por sua vez, estava assente sobre um conjunto de roletes de material rijo. No ano de 1919, o médico, Dr. Calantarients registou outra patente, na qual lança a ideia de que o edifício assente sobre uma camada de talco. Além desta solução de isolamento, criou um conjunto de dispositivos para ligação de condutas ao exterior com capacidade para acomodar grandes deslocamentos (Guerreiro 2006).

A primeira utilização documentada de um sistema de isolamento de base data de 1969, em Skopje, cidade situada na antiga Jugoslávia, na escola Heinrich Pestalozzi. Este sistema consistiu em assentar a estrutura em blocos de borracha não reforçada, com ligações do edifício ao meio exterior concretizadas por elementos fusíveis em porcelana, que estão dimensionados para resistir a forças horizontais até determinado valor, a partir do qual se quebram, permitindo a vibração livre da estrutura sobre os seus apoios (Meireles, 2011).

O aparecimento e o desenvolvimento dos apoios em borracha, neoprene ou outros elastómeros também contribuiu para a expansão da aplicação de sistemas de isolamento de base. Um aumento significativo na aplicação de isolamento de base deu-se em janeiro de 1995, devido ao bom desempenho do edifício “West Japan Postal Savings Computer Center (West-1)” durante o sismo de Kobe, no Japão. O registo de edifícios licenciados com isolamento de base nos anos seguintes aumentou exponencialmente.

Importa referir alguns edifícios com isolamento de base que tiveram maior projeção mundial, tais como: “Foothill Communities Law and Justice Center”; “Fire Command and Control Facility” e o hospital da Universidade da Califórnia do Sul, na Califórnia e “William Clayton Building” e “Te Papa – Museum of New Zealand” em Wellington (Guerreiro 2006).

Em Portugal, destaca-se aplicação deste sistema no Hospital da Luz em Lisboa, que tem 66.000 m² de pavimento com 195 apoios do tipo HDRB. Estes apoios estão intercalados entre os pilares e as fundações, tendo-se criado, no local de implantação dos blocos de borracha, um piso técnico, de modo a permitir a manutenção dos aparelhos (Meireles, 2011).

2.3 Tipos de Sistemas de Isolamento de base

O sistema de isolamento de base divide-se três tipos:

- 1 - Apoios elastoméricos,
- 2 - Apoios deslizantes,
- 3 - Sistemas do tipo mola.

Os apoios elastoméricos são agrupados em apoios de borracha de baixo amortecimento (LDRB do inglês Low Damping Rubber Bearings), apoios de borracha de alto amortecimento (HDRB do inglês High Damping Rubber Bearings) e apoios de borracha com núcleo de chumbo (LRB do inglês Lead Rubber Bearings). Os sistemas deslizantes de isolamento de base podem ser planos ou esféricos, dependendo da geometria da superfície de deslizamento utilizada. Alguns autores classificam os sistemas deslizantes de acordo com a capacidade (ou não) de restituir o sistema à posição inicial. São estes os apoios pendulares com atrito (FPB do inglês Friction Pendulum Bearings) utilizam uma superfície de deslizamento esférica e são o sistema de isolamento deslizante mais utilizado no Mundo. E os apoios planos deslizantes (FSB do inglês Flat Sliding Bearings) com superfícies deslizantes de baixa fricção e são sempre usados em combinação com outros dispositivos sísmicos como isoladores e/ou amortecedores. Os sistemas do tipo mola caíram em desuso (Amaral, 2013).

Atualmente existem diversas propostas de soluções de isolamento de base. No entanto, no mercado está disponível uma seleção dos aparelhos mais simples e económicos, dos quais será de destacar os blocos de borracha de alto amortecimento (HDRB), os blocos de elastómero com núcleo de chumbo (LRB) e os apoios pendulares com atrito (FPB) que por serem aqueles com maior número de aplicações serão os únicos explorados neste estudo.

2.3.1 Apoios de Borracha de Alto Amortecimento (HDRB)

Os apoios de borracha de alto amortecimento são os mais adotados nos sistemas de isolamento de base de edifícios. São constituídos por camadas finas de borracha (elastómero) alternadas com placas de aço. Apresentam, geralmente, forma circular, como se pode observar na Figura 10, mas podem ser fabricados em seção quadrada ou retangular. Estes dispositivos são caracterizados por terem baixa rigidez horizontal, elevada rigidez vertical e boa capacidade de amortecimento. Essas características permitem aumentar o período fundamental de vibração da estrutura, resistir a cargas verticais sem grandes ajustes e limitar deslocamentos horizontais em estruturas isoladas. Os parâmetros que determinam a rigidez vertical e horizontal estão relacionados com as características geométricas do isolador (dimensões globais, espessura de camada única, etc.) e as características mecânicas do seu elastómero. A capacidade de amortecimento dos isoladores depende da composição do elastómero utilizado. Os compostos contêm aditivos antienvelhecimento adequados que garantem uma variação limitada das características físicas e mecânicas no tempo. Podem ser projetados conforme os valores diferentes de deslocamento máximo.



Figura 10 - Apoios de borracha de alto amortecimento (HDRB) (FIP Industriale, 2016)

Os compostos de borracha utilizados na produção de isoladores elastoméricos são caracterizados por um módulo de distorção entre 0,4 MPa e 1,4 MPa e por fator de amortecimento na gama dos 10% ou 15%, que lhes garante elevada capacidade de dissipação de energia (FIP Industriale, 2016). Esta capacidade de recuperação permite acumular mais energia do que qualquer outro material. Por terem baixo módulo de elasticidade conseguem atingir grandes deformações mesmo para um nível baixo de tensões. Este material caracteriza-se pela sua grande deformabilidade e elasticidade.

Sendo o elastómetro praticamente incompressível, a sua deformação é maioritariamente por alteração da forma e minimamente por variação de volume, Figura 11.



Figura 11 – Modo de deformação de Apoios de borracha de alto amortecimento. (FIP Industriale, 2016)

Um fator determinante na capacidade de deformação de um bloco de elastómero é o seu “fator de forma”, S , que se define pela expressão (1) e ilustrada pela Figura 12 (Guerreiro, 2003):

$$S = \frac{\text{Area carregada}}{\text{Area livre}} \quad (1)$$

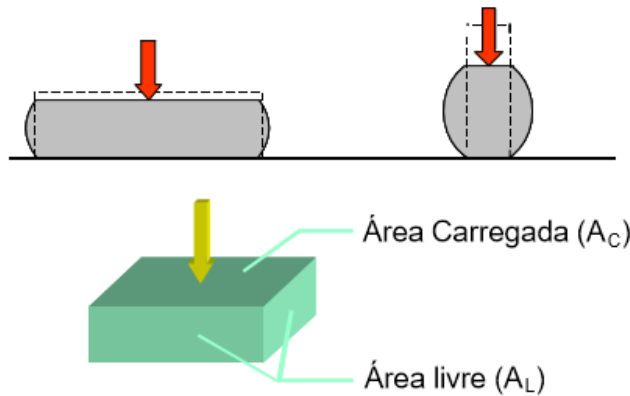


Figura 12 - Ilustração do significado do fator de forma (adaptado de Guerreiro, 2003)

Assim a deformação vertical duma lâmina de elastómero é composta pela soma de duas componentes de deformação de origem distinta. Uma primeira deve-se à deformação por distorção, γ , e a segunda componente resulta da variação de volume da camada de elastómero, ν .

A rigidez vertical depende destas duas componentes e pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$K_v = \frac{K_v(\gamma) K_v(\nu)}{K_v(\gamma) + K_v(\nu)} \quad (2)$$

em que,

$$K_v(\gamma) = b_2 \frac{GS^2A}{h_{el}} \quad (3)$$

$$K_v(\nu) = b_2 \frac{E_b A}{h_{el}} \quad (4)$$

com:

E_b , módulo de compressibilidade do elastómero;

G , módulo de distorção do elastómero;

S , fator de forma;

h_{el} , espessura da camada de elastómero;

A , secção transversal da camada de elastómero;

b_2 , coeficiente que depende da forma da secção.

Note-se que a deformação devido à distorção só acontece se não houver qualquer restrição à deformação lateral da camada ao longo da sua espessura apenas estejam impedidas de se deformar lateralmente nas superfícies superior e inferior, como se pode observar na Figura 13.

Observa-se que só as superfícies de topo se encontram impedidas de expandir lateralmente devido à presença das chapas de aço de reforço o que introduz tensões nas chapas. As chapas de aço aumentam a rigidez vertical dos blocos pois assim considera-se o bloco de apoio como uma sobreposição de camadas de menor espessura (logo com maior fator de forma).

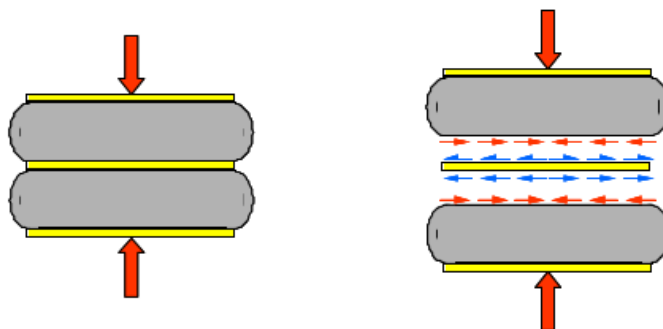


Figura 13 - Modo de deformação vertical do bloco de elastômero (Guerreiro, 2003)

Quanto à rigidez horizontal, esta pode ser calculado a partir do valor do módulo de distorção (G). Como cada bloco é constituído pela justaposição de camadas de elastômero, a deformação horizontal do conjunto é o somatório das deformações individuais de cada camada. Por seu lado, a deformação de cada camada, devido à sua pequena espessura, é essencialmente por corte. Desta forma a relação entre a rigidez do bloco e o módulo de distorção obedece à seguinte expressão:

$$K_h = \frac{GA}{h_{el}} \quad (5)$$

A distorção máxima, γ , calcula-se através da relação entre o deslocamento horizontal máximo e altura total da camada de elastomero, apresentada na expressão seguinte (Mayes & Naeim, 2014):

$$\gamma = \frac{D}{h_{el}} \quad (6)$$

Em que:

D , diâmetro do aparelho.

Este tipo de aparelhos pode apresentar distorções na ordem dos cerca de 200%.

Os HDRB são caracterizados por uma variação significativa do módulo de distorção, G quando a distorção, γ é inferior a 0,5, como se pode analisar na Figura 14. Isso permite evitar deslocamentos excessivos sob excitação dinâmica de baixa intensidade, como cargas de vento. O valor G permanece praticamente constante para valores γ entre 1 e 2, correspondendo a deslocamentos de projeto sísmico (FIP Industriale, 2016).

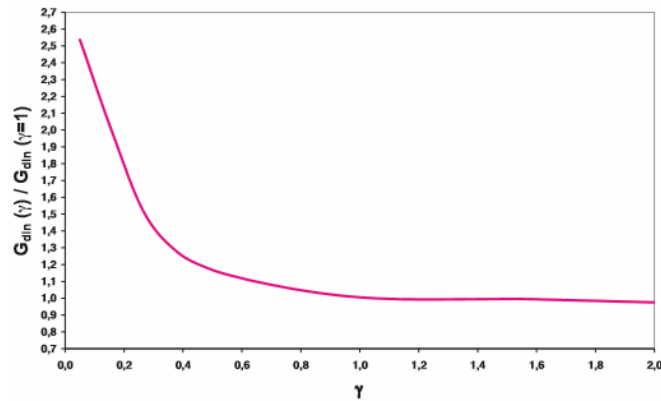


Figura 14 - Variação do módulo de distorção, G , em função da distorção, γ (FIP Industriale, 2016)

O coeficiente de amortecimento viscoso, ζ também varia em função da distorção, γ . A Figura 15 mostra o andamento de G e ζ , normalizado para valores de $\gamma = 1$.

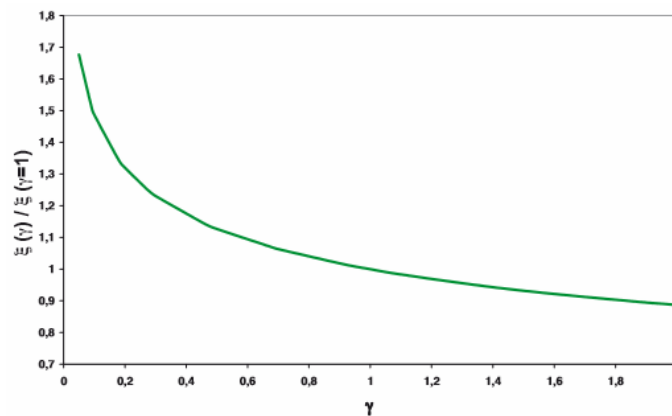


Figura 15 - Variação do amortecimento, ζ , em função da distorção, γ (FIP Industriale, 2016)

A energia nos aparelhos de apoio dissipa-se de uma forma cíclica devido ao seu comportamento histerético, Figura 16. Este comportamento também pode ser representado por um modelo linear equivalente, em que a dissipação de energia do sistema de isolamento expressa-se em termos de um amortecimento viscoso equivalente, dito “amortecimento efectivo” (ζ_{eff}).

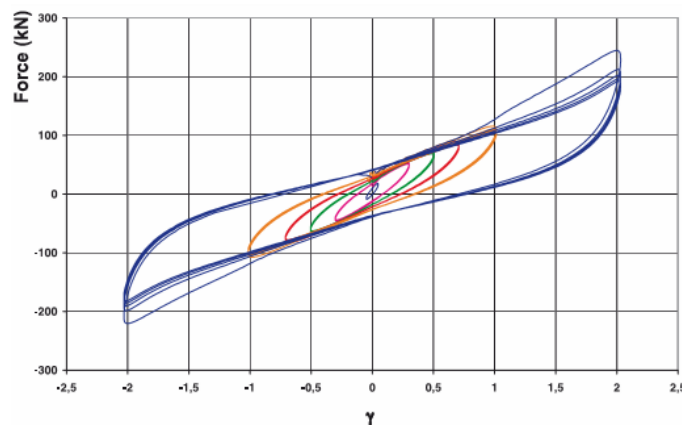


Figura 16 - Curva histerética típica dos apoios de borracha de alto amortecimento, relação força-distorção (FIP Industriale, 2016)

Pela análise do gráfico da Figura 16, que representa o diagrama força-distorção para o comportamento elástico de um bloco em borracha de alto amortecimento, observa-se a existência de diferentes patamares de variação da rigidez horizontal. Começa com uma rigidez horizontal elevada, que posteriormente diminui consideravelmente para praticamente toda a sua variação para valores de deformação. E voltando a aumentar para grandes distorções.

2.3.2 Blocos de Borracha com Núcleo de Chumbo (LRB)

O segundo tipo de apoios elastoméricos apresentados são os Blocos de Borracha com Núcleo de Chumbo, Figura 17. Estes aparelhos são muito semelhantes aos HDRB, exceto o fato de possuírem um núcleo de chumbo com cilindro central. 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 à alta capacidade de dissipação de energia, é possível reduzir o deslocamento horizontal, em comparação com o de um sistema de isolamento com a mesma rigidez equivalente.

Os elastômetros normalmente utilizados na produção de LRB são caracterizados por um módulo de distorção, G , entre 0,4 MPa a 0,6 MPa mas podem ser encomendados elastômetros com valores mais elevados de G até 1,4 MPa. O chumbo utilizado tem alta pureza, superior a 99,85%. Os LRB são projetados para diferentes valores de deslocamento máximo (FIP Industriale, 2016).



Figura 17 - Blocos de Borracha com Núcleo de Chumbo (LRB) (FIP Industriale, 2016)

A dissipação de energia deve-se exclusivamente ao comportamento histerético dos LRB. A relação força–deslocamento típica desses aparelhos apresenta-se na Figura 18, onde é possível verificar a não linearidade característica destes dispositivos, Figura 18(A). Contudo, a aproximação do seu comportamento a um modelo de comportamento bilinear, Figura 18(B), mostra-se bastante adequada dado que permite, de forma simplificada, descrever o funcionamento destes apoios sem incorrer em erros significativos (Figueiredo, 2007).

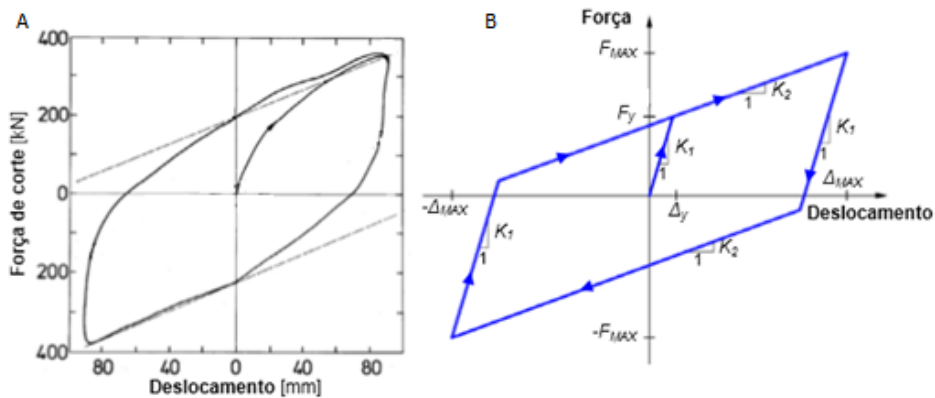


Figura 18 – Relação força–deslocamento de um apoio LRB sob ensaio cíclico de corte (A). Definição do modelo bilinear de aproximação ao comportamento do apoio LRB (B) (Figueiredo, 2007)

Característico do comportamento bilinear é a existência de dois patamares de rigidez horizontal completamente distintos. Uma rigidez inicial de pré-plastificação, K_1 , bastante elevada, para pequenas deformações, que se deve principalmente ao comportamento elástico do núcleo de chumbo. E o segundo patamar de rigidez, de pós-plastificação, K_2 , que surge devido à plastificação do núcleo de chumbo, passando o apoio a apresentar uma rigidez bastante mais baixa.

Como se pode verificar através da Figura 19, 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 (Figueiredo, 2007).

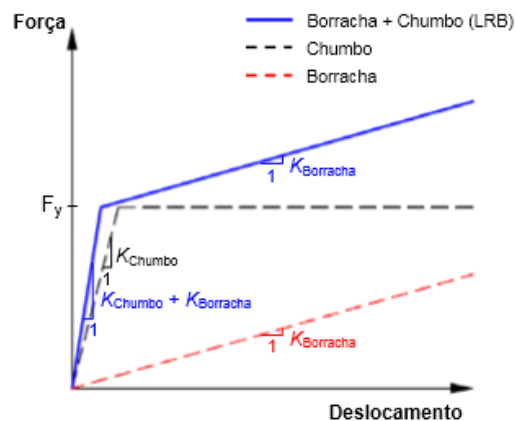


Figura 19 - Relação força–deslocamento de um apoio LRB sob ensaio cíclico de corte (Figueiredo, 2007)

A componente de amortecimento de um aparelho LRB provém principalmente do comportamento histerético do núcleo de chumbo, sendo a componente de amortecimento viscoso desprezável. Deste modo, na fase elástica considera-se que o dispositivo LRB não exhibe características de amortecimento relevantes. Durante a fase plástica, o apoio de borracha com núcleo de chumbo apresenta o desenvolvimento de uma força de restituição não linear, que é caracterizada pelo facto do valor da rigidez horizontal ser dependente do nível de deformação evidenciado pelo aparelho (FIP Industriale, 2016).

O facto da rigidez elástica (pré-plastificação) dos apoios LRB ser elevada confere a estes

dispositivos uma boa capacidade para limitar os deslocamentos originados por ações laterais de serviço. Deste modo, um sistema de isolamento composto por apoios LRB consegue ser suficientemente rígido, para que não ocorram deslocamentos significativos, sob a atuação de carregamentos de serviço, e consegue também fornecer a flexibilidade horizontal necessária, para conferir o isolamento das estruturas, para a atuação de ações sísmicas de grande intensidade. O fator que define a mudança do nível de rigidez elevada para o nível de rigidez baixa é a plastificação do núcleo de chumbo. A força de corte necessária para provocar a plastificação do núcleo de chumbo é determinada através da definição da dimensão transversal do respetivo núcleo (Figueiredo, 2007).

Um apoio LRB funciona como um aparelho híbrido, pois combina as propriedades do elastómero de borracha com as propriedades do chumbo, permitindo a obtenção de um dispositivo que fornece todas as características essenciais a um sistema de isolamento sísmico, tais como: suporte estrutural, flexibilidade horizontal, amortecimento e capacidade de restituição à posição inicial.

2.3.3 Apoios Pendulares com Atrito (FPB)

Os últimos sistemas de isolamento apresentados são os apoios pendulares com atrito, Figura 20. Esses aparelhos são compostos por dois elementos de aço sobrepostos. Um dos elementos apresenta no seu interior uma superfície côncava, sobre esta superfície desliza a outra peça contendo uma ponta de aço com a extremidade articulada e revestida por um material compósito de baixo atrito. O dispositivo pode ser instalado com a superfície côncava voltada para cima ou para baixo não alterando o seu funcionamento.



Figura 20 - Apoios pendulares com atrito (FPS) (FIP Industriale, 2016)

Sempre que o apoio se desloca da posição central a curvatura gera a força de restituição, induzida pela ação vertical do peso da estrutura, que promove um movimento de recuperação à posição inicial, similar ao movimento de um pêndulo.

Esses aparelhos desenvolvem uma força lateral igual à combinação da força de atrito mobilizada e da força de restauração desenvolvida ao longo da superfície côncava esférica (Gencoglu & Daskiran, 2017).

A rigidez horizontal nesse tipo de aparelhos depende da localização do isolador e é diretamente proporcional ao peso aplicado e ao coeficiente de atrito das superfícies deslizantes, proporcionando

uma resposta uniforme em todo o plano, independentemente da excentricidade de carregamento. A curvatura das superfícies deslizantes proporciona uma força de restauração para recentrar os isoladores após um evento de sismo (Lanning et al, 2017).

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.

Assim, procura-se que a seleção do material da superfície apresente um bom comportamento em termos de capacidade de carga, coeficiente de atrito e, conseqüentemente, dissipação de energia.

O coeficiente de atrito é o parâmetro mais importante e depende da velocidade e da pressão. No entanto, a dependência da velocidade não é significativa na faixa de velocidade associada à excitação do sismo de uma estrutura isolada. Por outro lado, a relação com a carga vertical tem um valor acrescentado. De uma forma geral, o coeficiente de atrito diminui com o aumento da carga vertical.

O modelo matemático que melhor se assemelha ao funcionamento dos FPS é apresentado na Figura 21, onde se regista um andamento bilinear para a relação força-deslocamento (FIP Industriale, 2016).

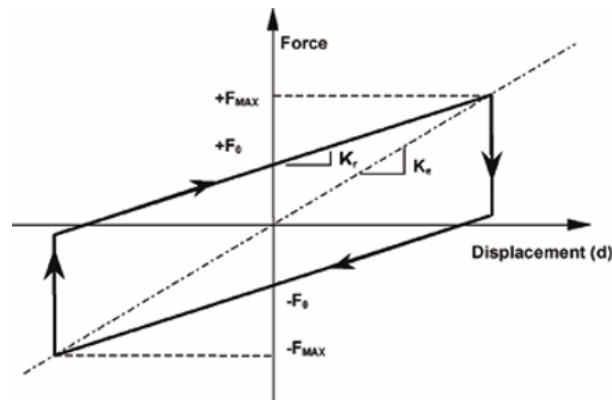


Figura 21 - Relação bilinear força-deslocamento de apoios FPS (FIP Industriale, 2016)

Importante referir que é possível modelar este sistema de isolamento considerando que tem um comportamento linear. Para tal deve ser aplicado um procedimento iterativo para obter os parâmetros de rigidez efetiva e de amortecimento efetivo.

A principal vantagem provém da dependência que existe entre a rigidez efetiva e a carga vertical, permitindo assim o centro de massa e o centro de rigidez do sistema de isolamento coincidirem no plano e que os efeitos de torção produzidos por estruturas assimétricas sejam diminuídos.

2.4 Modelo de Análise

Antes de mais é necessário caracterizar o tipo de comportamento do sistema de isolamento, para identificar quais os tipos de modelos e métodos de análise que são permitidos utilizar.

Nos sistemas de isolamento cujo comportamento pode ser modelado através de um modelo linear equivalente, pode-se utilizar a análise modal ou mesmo uma análise linear, dependendo da

complexidade da estrutura e da sua localização. 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) podem ou não, dependendo das dimensões do aparelho. Para sistemas de isolamento que apresentam comportamento não linear, como sistemas de isolamento do tipo pendular com atrito (FPS) é necessário recorrer à análise no domínio do tempo (Guerreiro, 2004).

Uma vez que os aparelhos utilizados posteriormente no caso de estudo são do tipo HDRB, o subcapítulo seguinte debruça-se apenas sobre a análise linear equivalente.

2.4.1 Comportamento dos aparelhos

Segundo o EC8, um sistema de isolamento pode ser modelado com um comportamento viscoelástico linear equivalente, se for constituído por dispositivos, tais como apoios de elastómero laminado, o caso dos HDRB, ou se for constituído por dispositivos de tipo elastoplástico que apresentam um comportamento histerético bilinear. Além disso, devem respeitar as seguintes condições:

- a) a) a rigidez efetiva do sistema para o deslocamento de cálculo total não seja inferior a 50 % da rigidez efetiva para um deslocamento de 20% do deslocamento máximo de cálculo. A rigidez efetiva, K_{eff} , do sistema de isolamento corresponde a soma das rigidezes efetivas dos isoladores, sendo que a rigidez efetiva de cada isolador é o valor secante da rigidez relativa ao deslocamento máximo de cálculo;
- b) o coeficiente de amortecimento efetivo do sistema de isolamento não seja superior a 30 %.
- c) a relação entre a força-deslocamento, a velocidade do carregamento ou do valor das cargas verticais do sistema de isolamento não variem mais de 10 %;
- d) o aumento da força de restituição que ocorre no sistema de isolamento entre 50% do deslocamento máximo e o deslocamento máximo, não seja inferior a 2,5 % da força gravítica total acima do sistema de isolamento.

Se o isolamento puder ser simulado por modelos lineares, então o EC8 indica que, na análise da estrutura, poderá ser utilizada a análise modal ou uma análise linear equivalente.

2.4.2 Análise linear equivalente (análise linear simplificada)

O EC8 fornece ainda um método simplificado de análise linear para sistemas de isolamento com comportamento linear amortecido equivalente. Esta análise linear simplificada assume a superestrutura como um sólido rígido em translação acima do sistema de isolamento e pode ser aplicada se se verificarem todas as condições seguintes:

- a) a distância entre o local onde se situa a estrutura e a falha potencialmente ativa de magnitude $M_s \geq 6,5$ mais próxima seja superior a 15 km;
- b) não se verifique nenhuma dimensão em planta da superestrutura superior a 50 m;
- c) a subestrutura tenha rigidez suficiente de modo a minimizar os efeitos dos deslocamentos diferenciais do terreno;

d) todos os dispositivos os elementos acima da subestrutura apresentem capacidade de suporte às cargas verticais;

e) o período efetivo T_{eff} respeite a seguinte condição:

$$3T_f \leq T_{eff} \leq 3s \quad (7)$$

Sendo T_f o período fundamental da estrutura de base fixa e T_{eff} calculado através da seguinte expressão:

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{eff}}} \quad (8)$$

Com:

M , massa da superestrutura;

K_{eff} , rigidez horizontal efetiva do sistema de isolamento.

f) o sistema de contraventamento da superestrutura apresente uma forma regular e esteja disposto simetricamente segundo dois eixos principais da estrutura em planta;

g) a rotação de corpo rígido na base da subestrutura seja desprezável;

h) a relação entre a rigidez vertical e a rigidez horizontal do sistema de isolamento satisfaça a seguinte relação:

$$\frac{K_v}{K_{eff}} \geq 150 \quad (9)$$

i) o período fundamental na direção vertical, T_v , não possa ser superior a 0,1 s, sendo calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$T_v = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_v}} \quad (10)$$

Se se verificarem todos esses pontos, o deslocamento do centro de rigidez devido à ação sísmica em cada direção horizontal, pode ser obtido a partir da seguinte expressão:

$$d_{dc} = \frac{M S_e(T_{eff}, \zeta_{eff})}{K_{eff,min}} \quad (11)$$

Em que:

$S_e(T_{eff}, \zeta_{eff})$, é a aceleração espectral, tendo em conta o valor adequado do amortecimento efetivo, ζ_{eff} .

As forças horizontais aplicadas em cada nível da superestrutura, em cada direção horizontal são calculadas utilizando a expressão seguinte:

$$f_j = m_j S_e(T_{eff}, \zeta_{eff}) \quad (12)$$

Sendo:

m_j é a massa no nível j .

As recomendações referidas são idênticas às presentes no capítulo sobre isolamento de base, do regulamento dos Estados Unidos para a construção de edifícios resistentes aos sismos, documento elaborado por engenheiros da Califórnia. Além destas indicações, este documento acrescenta uma limitação relacionada com a altura do edifício isolado, não permitindo a aplicação do método estático equivalente a edifícios cuja superestrutura tenha uma altura superior a 20 metros. Assim, a aplicação do método estático equivalente está limitada a estruturas compactas, regulares e cujo comportamento dinâmico não seja afetado pelos movimentos verticais.

Uma medida da eficácia do sistema de isolamento pode ser dada pela relação entre o período da estrutura isolada e o período da estrutura com base fixa. Como mostra a Figura 22, para valores da relação superiores a 3, a estrutura isolada comporta-se praticamente como um corpo rígido e há uma redução significativa dos esforços. Já para valores da relação próximos da unidade a deformação da estrutura isolada tem uma configuração semelhante à da deformação da estrutura sem isolamento e os esforços permanecem quase inalterados (Guerreiro, 2004).

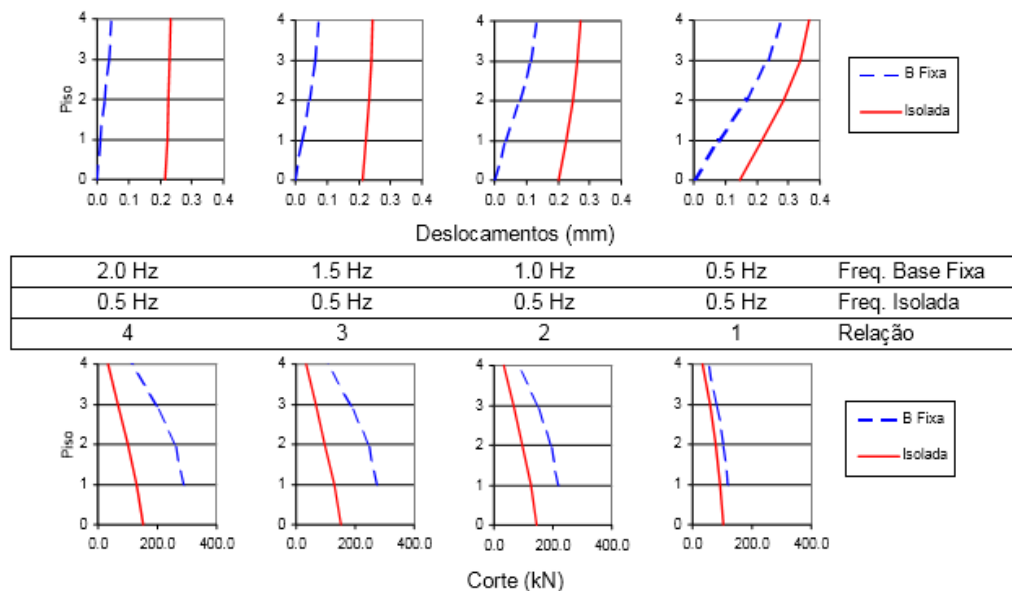


Figura 22 - Influência da relação de períodos na eficácia do comportamento da estrutura com isolamento (Guerreiro 2004)

2.4.3 Análise Modal

Este tipo de análise deve ser aplicado para dispositivos com comportamento elástico linear.

A utilização desta análise para o cálculo da resposta sísmica de estruturas com isolamento levanta um problema devido à discrepância entre os níveis de amortecimento para os diferentes elementos estruturais. Para se conseguir considerar, simultaneamente, por exemplo, estruturas de betão e dispositivos de isolamento com alto amortecimento a solução é utilizar-se um espectro de resposta equivalente. Este espectro deve reunir valores espectrais correspondentes ao amortecimento do isolamento (períodos mais altos) e valores espectrais relativos ao amortecimento estrutural (períodos mais baixos). É necessário haver um período de transição que deve ser escolhido de modo a conseguir separar modos que correspondem essencialmente à deformação dos dispositivos de isolamento dos modos que correspondem à deformação da estrutura. Assim, admite-se que nos modos de vibração onde a deformação do isolamento de base é predominante, a deformação da estrutura é insignificante. Contudo, caso a deformação da estrutura nestes modos seja considerável, a resposta da estrutura não está adequadamente representada. Note-se que, para 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 garante. Na Figura 23 está representado um espectro de resposta equivalente, no qual o período de transição corresponde a 1,20 segundos e o isolamento tem um amortecimento de 10% (Guerreiro, 2004).

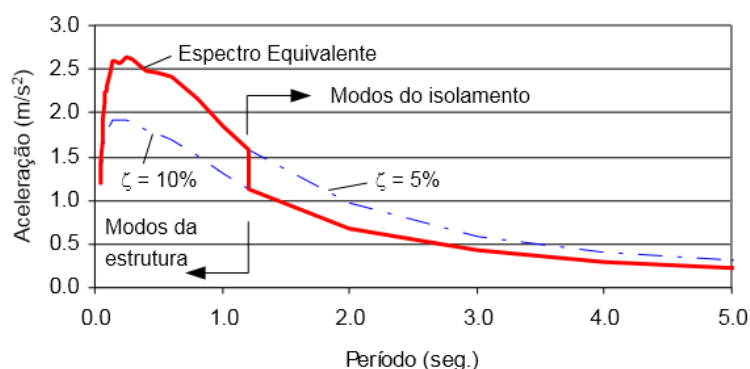


Figura 23 – Espectro de resposta equivalente (Guerreiro, 2004)

2.5 Dimensionamento do sistema de isolamento

No EC8 apenas são apontadas as características globais exigidas aos sistemas de isolamento de modo a obter uma maior fiabilidade do sistema de isolamento face à exigida à estrutura. Para obter uma maior fiabilidade deve-se aplicar um fator de majoração, γ_x , aos esforços e deslocamentos sísmicos, sendo o valor recomendado a utilizar no caso dos edifícios de 1,2.

Os dispositivos abrangidos por esta secção são os apoios elastoméricos, dispositivos elastoplásticos, amortecedores viscosos ou de atrito e pendulares. Estes devem possuir uma ou mais das características seguintes:

- Capacidade resistente a cargas verticais combinada com uma flexibilidade lateral acrescida e

uma rigidez vertical elevada;

- Dissipação de energia, histerética ou viscosa;
- Capacidade de recentragem;
- Resistência lateral (rigidez elástica suficiente) às cargas laterais de serviço não sísmicas.

Apresentam-se de seguida alguns pontos dum conjunto de parâmetros que constituem regras de boa prática para otimização do comportamento da estrutura isolada.

2.5.1 Critérios de conformidade

Devem-se verificar os estados limites últimos e os estados limites de danos para cumprimento dos requisitos fundamentais. Quanto ao estado de limitação de danos nos edifícios salienta-se a preocupação com o deslocamento relativo entre pisos, que deve ser limitado segundo:

Para os edifícios com elementos não estruturais constituídos por materiais frágeis fixos à estrutura:

$$d_r v \leq 0,005h \quad (13)$$

Para os edifícios com elementos não estruturais dúcteis: $d_r v \leq 0,075h$

Para os edifícios com elementos não estruturais fixos de forma a não interferir com as deformações estruturais ou sem elementos não estruturais: $d_r v \leq 0,010h$

Em que:

d_r , valor de cálculo do deslocamento entre pisos

h , altura entre pisos;

v , coeficiente de redução que tem em conta o mais baixo período de retorno da ação sísmica associada ao requisito de limitação de danos.

No que toca ao estado limite último, a capacidade última dos dispositivos de isolamento em termos de resistência e de deformabilidade não deve ser excedida. Os dispositivos de isolamento poderão atingir a sua capacidade última. No entanto, considera-se que a superestrutura e a subestrutura permanecem no domínio elástico. Assim sendo, o dimensionamento por capacidade resistente e as disposições construtivas para assegurar a ductilidade não são aplicáveis, quer na superestrutura quer na subestrutura.

No EC8, atendendo a §10.10(5), que os esforços sísmicos, considerados para o dimensionamento de edifício com isolamento de base, sejam divididos por um coeficiente de comportamento de valor 1,5.

Por último, no estado limite de danos salvaguarda-se que as tubagens de gás e outras redes que atravessam as juntas entre a superestrutura e o terreno ou as construções circundantes sejam projetadas para absorver com segurança esses deslocamentos.

Para além destas disposições deve existir um espaço entre a superestrutura e a subestrutura suficiente para permitir a inspeção, a manutenção e a substituição dos dispositivos durante o tempo de vida da estrutura. Caso se justifique, os dispositivos devem ser protegidos de efeitos potencialmente

perigosos, como, o incêndio e ataques químicos ou biológicos.

2.5.2 Controlo de movimentos

Para controlo de movimentos indesejáveis como os efeitos de torção, deve-se aproximar o máximo possível o centro de rigidez efetivo e o centro de amortecimento do sistema de isolamento, da projeção do centro de massa na interface de isolamento. De forma a minimizar comportamentos diferentes entre os aparelhos de apoio, a tensão de compressão devido às ações permanentes deve ser distribuída o mais uniforme possível. Os dispositivos devem ser fixados à superestrutura e à subestrutura. É importante que o sistema de isolamento esteja provido de dispositivos para controlar potenciais movimentos de torção e evitar que ocorram choques.

De modo a controlar os movimentos sísmicos diferenciais do terreno, os elementos estruturais localizados acima e abaixo da interface de isolamento devem ser suficientemente rígidos tanto na direção horizontal como vertical, para que sejam minimizados os efeitos dos deslocamentos sísmicos diferenciais do terreno. Isto pode ser conseguido se existir um diafragma rígido por cima e por baixo do sistema de isolamento, constituído por uma laje de betão armado ou por uma grelha de vigas de travamento, projetadas tendo em conta todos os modos de encurvadura global e local aplicáveis. Importante será garantir que entre a superestrutura isolada e o terreno ou as construções circundantes exista espaço suficiente de modo a permitir o seu deslocamento em todas as direções.

2.5.3 Propriedades do sistema de isolamento

Os valores das propriedades físicas e mecânicas do sistema de isolamento a utilizar devem ser os mais desfavoráveis que se verificam durante o tempo de vida da estrutura e devem ter em conta a influência:

- da velocidade do carregamento;
- do valor da carga vertical simultânea;
- do valor da carga horizontal simultânea na direção transversal;
- da temperatura;
- da alteração de propriedades ao longo do período de utilização previsto.

As acelerações e as forças de inércia induzidas pelo sismo devem ser avaliadas considerando o valor máximo da rigidez e o valor mínimo dos coeficientes de amortecimento e de atrito.

Os deslocamentos devem ser avaliados considerando o valor mínimo da rigidez e dos coeficientes de amortecimento e de atrito.

Nos edifícios das classes de importância I ou II, poderão utilizar-se valores médios das propriedades físicas e mecânicas, desde que os valores extremos não difiram mais de 15 % dos valores médios.

2.5.4 Verificações da segurança no estado limite último

Deve-se verificar a subestrutura às forças de inércia que lhe são diretamente aplicadas e aos esforços que lhe são transmitidos pelo sistema de isolamento.

A segurança ao estado limite último da subestrutura e da superestrutura deve ser verificada utilizando os valores de coeficiente parcial e da propriedade do material, γ_M .

Nos edifícios, as verificações da segurança relativas ao equilíbrio e à resistência da subestrutura e da superestrutura devem ser efetuadas de acordo com as verificações de segurança sem ser necessário satisfazer o dimensionamento pela capacidade resistente ou das condições de ductilidade global ou local.

Devido à possibilidade de rotura por instabilidade dos dispositivos de isolamento, a resistência do sistema de isolamento deve ser avaliada considerando o fator de majoração γ_x .

De acordo com o tipo de dispositivo, a resistência dos isoladores na verificação da segurança ao estado limite último deve ser avaliada segundo:

a) as forças, nas quais se englobam as forças verticais e horizontais máximas da situação de dimensionamento sísmico;

b) o deslocamento relativo horizontal total entre as faces inferior e superior do isolador, no qual se inclui a deformação devida à ação sísmica de cálculo e os efeitos da retração, da fluência, da temperatura e do pré-esforço.

3 Reabilitação Sísmica através da aplicação da Técnica de Isolamento de Base

O isolamento de base também pode ser aplicado como reabilitação sísmico. A referida técnica tem um grande potencial para reabilitar edifícios de habitação, escolas, hospitais e pontes uma vez que a instalação dos aparelhos pode ser feita sem que seja necessário interromper as funcionalidades dos mesmos. Também pode ser usado para a reabilitação de edifícios históricos pois a sua intervenção pode não provocar quaisquer alterações significativas a nível arquitetónico.

Neste capítulo apresentam-se as vantagens da referida técnica em comparação com as alternativas tradicionais de reforço sísmico. Realçam-se as diferenças existentes entre aplicar isolamento de base num edifício novo ou num edifício existente. Abordam-se brevemente as questões que se devem colocar quando se tenciona aplicar isolamento de base como técnica de reforço e alguns cuidados a ter. Esquematiza-se o processo de intervenção distinguindo os processos de intervenção apropriados para estruturas de alvenaria e para estruturas de betão e apresenta-se uma coletânea de procedimentos possíveis para aplicação dessa técnica como reforço. Refere-se a importância do reforço de edifícios históricos e, por fim, mostram-se alguns casos de aplicação desta técnica.

3.1 Vantagens do isolamento de base em relação a outras técnicas

Em comparação com os métodos de reforço convencionais, a alternativa de isolamento sísmico é benéfica por várias razões. As técnicas mais convencionais de reforço sísmico procuram o aumento global da rigidez e resistência das estruturas por adição de novos elementos estruturais e/ou da substituição de outros, sendo necessário a execução de trabalhos de reforço que implica uma interrupção nas atividades do edifício durante um determinado período de tempo. Além disso, estes métodos não eliminam por completo a possibilidade de ocorrência de danos, sendo que, após um sismo pode ser necessário reparar elementos da estrutura e torna-se necessário desocupar do edifício.

Se se optar por reforço utilizando um sistema de isolamento de base é possível que os trabalhos decorram apenas ao nível da base, enquanto os métodos convencionais geralmente requerem a adição de elementos estruturais a todos os níveis do edifício. Isto permite que não haja a necessidade de interromper as atividades da restante estrutura, sendo um fator de grande importância, para estruturas em que o uso continuado da instalação é desejado, como em hospitais, apartamentos, escolas ou centros de comando.

Outra vantagem da utilização de isolamento de base como técnica de reforço sísmico é o facto de que a estrutura permanece inalterada, sem nenhuma mudança na estética do edifício, o que é bastante relevante no caso de monumentos históricos, pois permite preservar a integridade arquitetónica (Matsagar & Jangid, 2008).

3.2 Projeto de Reforço Sísmico com Isolamento de Base

O dimensionamento de um sistema de isolamento de base como técnica de reforço sísmico para um edifício existente é substancialmente diferente do de um edifício novo. No último caso, os principais parâmetros como a frequência fundamental e o amortecimento são predefinidos e a superestrutura é projetada, de acordo com as configurações induzidas pelo sistema de isolamento, de modo a que a sua capacidade resistente seja superior às forças de dimensionamento. Na aplicação de um sistema de isolamento de base numa estrutura existente procura-se limitar ao máximo trabalhos de reforço de elementos estruturais, sendo que o primeiro passo consiste em avaliar a capacidade resistente da estrutura à ação sísmica e então de seguida, procede-se à determinação das características do sistema de isolamento (Mezzi & Vetturini, 2012). Tendo em conta que, embora o isolamento de base reduza as forças sísmicas, não as elimina por completo, deve-se procurar calibrar o sistema de isolamento de modo a que força e a ductilidade de uma estrutura existente sejam suficientes para resistir às forças reduzidas que resultam da aplicação do isolamento (Mayes & Naeim, 2014).

A preocupação no dimensionamento não se deve prender só em termos de resistência, mas também em termos de rigidez. O edifício deve apresentar rigidez necessária para um bom desempenho aquando de uma ocorrência sísmica. Caso contrário, podem-se registar deformações excessivas, principalmente entre pisos, que levariam a danos nos elementos não estruturais (Oliveto & Marletta, 2005).

Na prática, ao passar de um edifício de base fixa para um de base isolada, como há uma redução da frequência e, conseqüentemente, das acelerações espectrais, há também uma diminuição das forças de inércia. Além disso, com a mudança do comportamento dinâmico da estrutura que leva quase à eliminação de deformações, resulta, de uma maneira geral, uma redução nos esforços dos elementos estruturais. Ora, a preocupação prende-se então com a técnica e esquema de montagem dos aparelhos, que pode levar a grandes variações de esforços. Essa questão será abordada no capítulo 4.

Quando se propõe um reforço sísmico através da aplicação de um sistema de isolamento de base existem algumas questões importantes que se devem colocar para à partir saber se essa é a escolha mais correta. Essas questões são:

- Existe espaço suficiente entre o edifício em causa e os edifícios adjacentes para permitir um movimento?
- O edifício e as suas fundações existentes têm resistência e ductilidade suficientes para resistir às forças sísmicas reduzidas?
- Qual é o nível apropriado para o plano de isolamento: nível de fundação, nível do solo ou a parte superior, inferior ou média das colunas?

A escolha do plano onde se instala o isolamento pode trazer algumas vantagens, por exemplo qualquer estrutura com uma cave que possa ser temporariamente interrompida é um bom candidato ao isolamento, uma vez que o trabalho pode ser confinado a essa área. Já se se optar por colocar o

isolamento na parte superior, inferior ou média das colunas requer uma avaliação detalhada das capacidades das colunas. Caso a capacidade resistente da coluna não seja suficiente para resistir às forças de isolamento reduzidas, é necessário reforçar-se a coluna ou em alternativa, construir um novo sistema de vigas no plano do isolamento para reduzir os esforços na coluna.

3.3 Intervenção

Pode-se resumir, de uma forma sucinta, o processo de implementação do sistema de isolamento de base nos seguintes passos:

- 1º. Avaliação das características dinâmicas a capacidade resistente da estrutura existente;
- 2º. Estudos numéricos necessários para chegar às decisões importantes em relação à localização dos isoladores e à determinação do sistema de isolamento;
- 3º. Escolha do procedimento a tomar na inserção dos aparelhos na estrutura.

A escolha do procedimento a adotar para aplicação do sistema de isolamento de base sísmico depende do tipo de estrutura em que será feita a intervenção. As estruturas podem-se dividir em dois tipos, as de alvenaria e de betão armado. De seguida, explicitam-se as diferenças e apresentam-se alguns tipos de procedimentos que podem ser aplicados a ambos os casos.

3.3.1 Procedimentos para estruturas em alvenaria

A maioria dos projetos de reforço sísmico realiza-se em edifícios antigos em que as estruturas são construídas em alvenaria de pedra ou tijolo com argamassa de cal ou cimento. Essas estruturas transmitem o peso próprio ao solo através das próprias paredes de alvenaria. Para incorporar os aparelhos do sistema de isolamento de base, primeiro é necessário conceber um sistema de suporte temporário para impedir o desmoronamento da parede de alvenaria. A técnica mais usual para esse tipo de estrutura é ir abrindo progressivamente orifícios na parede para colocar os aparelhos e ir simultaneamente construindo uma viga (“needle-beam”) sobre os isoladores, abaixo da parede de alvenaria, Figura 24. Depois os suportes temporários são removidos, transferindo a carga vertical da estrutura para a base através da viga para os isoladores de base. De seguida esquematizam-se mais ao detalhe esses procedimentos e apresentam-se outras alternativas de intervenção (Matsagar & Jangid, 2008).

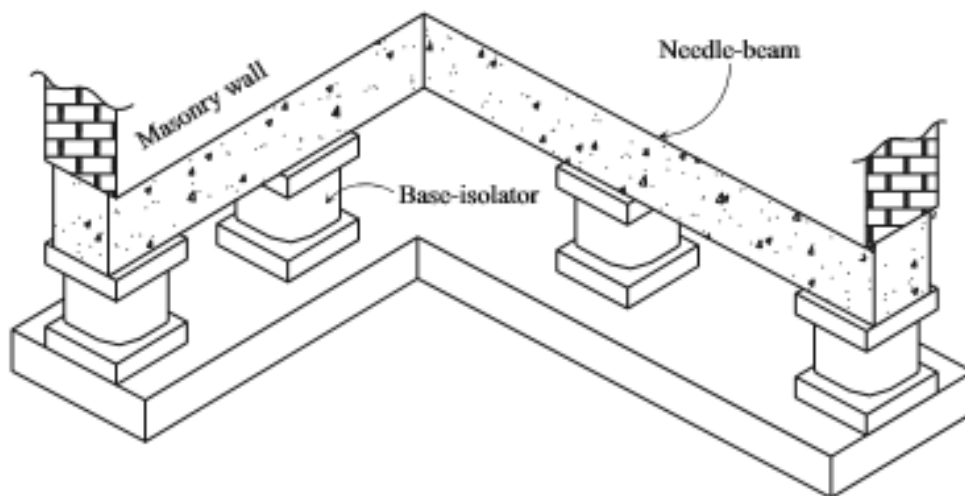


Figura 24 – Isolamento de base em estruturas de alvenaria (Matsagar & Jangid, 2008)

É importante salvaguardar as funções da viga construída acima do plano de isolamento. Durante a fase inicial da instalação dos aparelhos, em que se vão abrindo os orifícios na parede, a viga é responsável pelo suporte de cargas. Após a conclusão da instalação do sistema, a viga acumula duas funções. A primeira é a responsabilidade de distribuir de forma uniforme as cargas para os aparelhos isoladores. A segunda função tem a ver com a contenção das paredes de alvenaria existentes. Esta última apresenta uma mais-valia na aplicação desta técnica de reforço para estruturas de alvenaria. Tratando-se muitas vezes de construções antigas observa-se, recorrentemente, a existência de fendas que são responsáveis pela degradação da capacidade resistente e rigidez, constituindo uma limitação desse tipo de estruturas em zonas sísmicas. A construção de uma viga abaixo das paredes de alvenaria confere-lhes tração, limitando a extensão e a largura da fenda, reduzindo, ou até mesmo extinguindo esse problema.

Nesta secção apresentam-se três procedimentos diferentes para reforçar estruturas de alvenaria utilizando a técnica de isolamento de base.

O primeiro caso ilustra o procedimento referido anteriormente, em que a intervenção é feita ao nível acima das fundações, onde a ideia é cortar gradualmente a parede e contruir vigas para ir posicionando os isoladores. O segundo procedimento refere-se a uma intervenção feita ao nível das fundações e que implica a construção de sub-fundações. O último caso esquematiza o procedimento que se deve seguir quando o isolamento é inserido nas colunas.

Os vários procedimentos encontram-se ilustrados abaixo, através de figuras, e, por sua vez, a enumeração dos passos de cada procedimento corresponde à enumeração apresentada nas figuras. Ou seja, ao passo 1 do procedimento 1, corresponde a ilustração 1 da figura 1 e assim sucessivamente.

Procedimento 1 – Fundações

1. Repara-se a alvenaria e coloca-se um escoramento vertical;
2. Executam-se duas vigas de escoramento, uma de cada lado da parede. A ligação das vigas à parede é feita através de tirantes horizontais;
3. Procedem-se à escavação na base das paredes e das vigas realizadas anteriormente. Constroem-se as bases de betão para acomodar os aparelhos. Coloca-se o aparelho e debaixo deste um macaco plano. Após a cura das bases de betão o macaco é colocado em pressão e em seguida injeta-se resina epóxi;
4. Coloca-se argamassa fluida para compensar o espaço abaixo da placa inferior do isolador e para selar os parafusos de ancoragem. A carga vertical é efetivamente transmitida pelo isolador e retira-se o sistema de suporte.

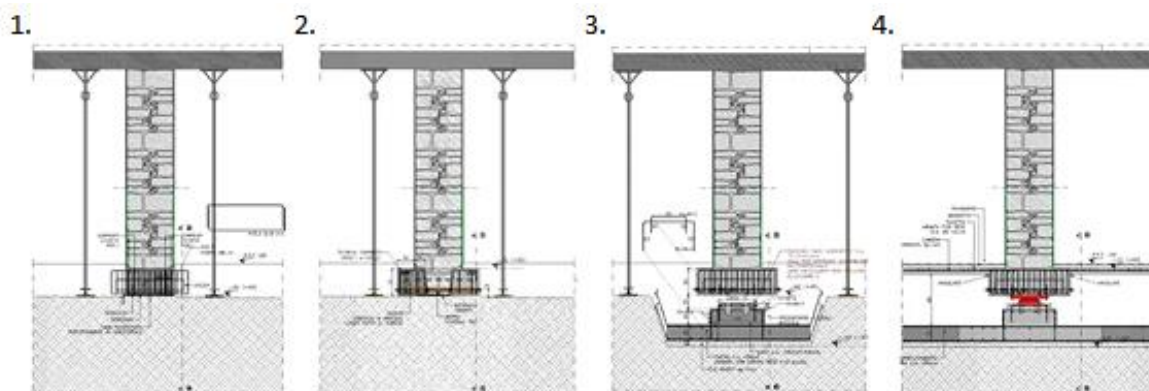


Figura 25 - Procedimento de instalação de isoladores em fundações de alvenaria (adaptado de Mezzi et al., 2012)

Procedimento 2 – Paredes

Nota: a este procedimento acrescentam-se também as imagens da Figura 27.

1. Faz-se uma abertura na parede e uma vez que esta apresenta resistência suficiente para evitar a queda, não é necessário colocar quaisquer sistemas de suporte (Figura 27.1);
2. Coloca-se a armadura para a base inferior do aparelho;
3. Insere-se a chapa de base do aparelho que contém parafusos que permitirem a sua fixação (Figura 27.2);
4. Acrescenta-se uma armadura, que intersecta a armadura da base inferior, para formar duas vigas de ambos os lados da parede que servem para conter a parede e impedir que esta se desmorone (Figura 27.3);
5. Posiciona-se o isolador;
6. Betona-se a base inferior (Figura 27.4);
7. Insere-se a chapa superior;
8. Coloca-se a armadura para a base superior e para as vigas superiores;
9. Betona-se a base superior;
10. Acrescentam-se armaduras para formar vigas contínuas de modo a unirem todos os aparelhos instalados;

11. Betonam-se as vigas que asseguraram o encaminhamento das cargas diretamente para os apoios;
12. Corta-se e remove-se a alvenaria existente entre as vigas (Figura 27.5).

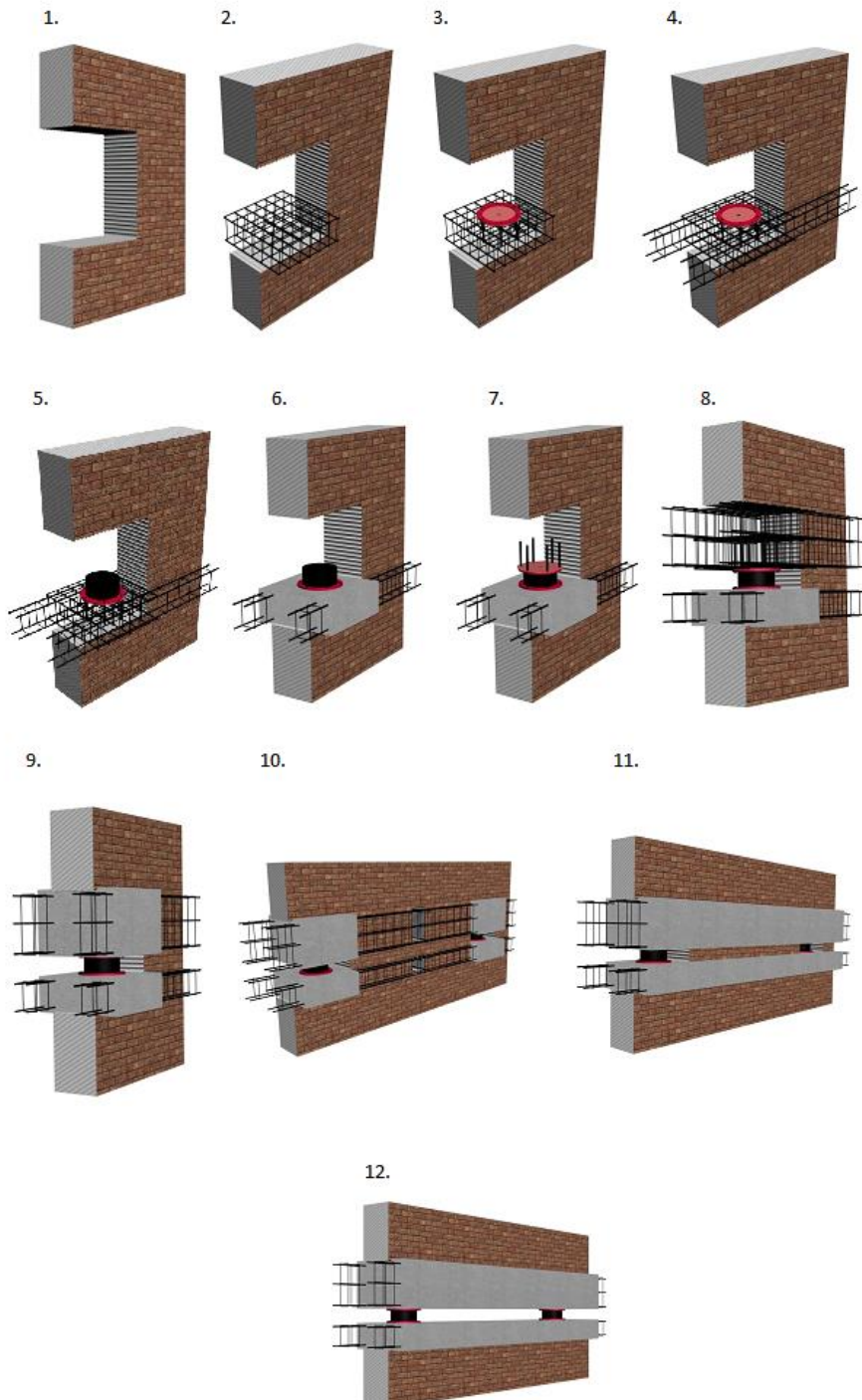


Figura 26 - Procedimento de instalação de isoladores em paredes de alvenaria (adaptado de Melkumyan et al., 2011)



1 – Abertura do buraco na parede de alvenaria



2 – Colocação da chapa de base do aparelho



3– Armadura das vigas



4 – Posicionamento do aparelho



5 - Resultado final

Figura 27 – Imagens ilustrativas do procedimento 2 (adaptado de Melkumyan et al., 2011)

Procedimento 3 - Colunas

1. Reforça-se a coluna com uma camada de revestimento de betão;
2. Após a cura do betão, corta-se parte da coluna para inserir o aparelho. As cargas verticais estão asseguradas pelo reforço de betão;
3. Coloca-se armaduras para as bases de betão e instala-se o aparelho;
4. Procede-se à betonagem e elimina-se o revestimento de betão na zona adjacente ao aparelho. As cargas verticais são assim transmitidas por estes pelos isoladores.

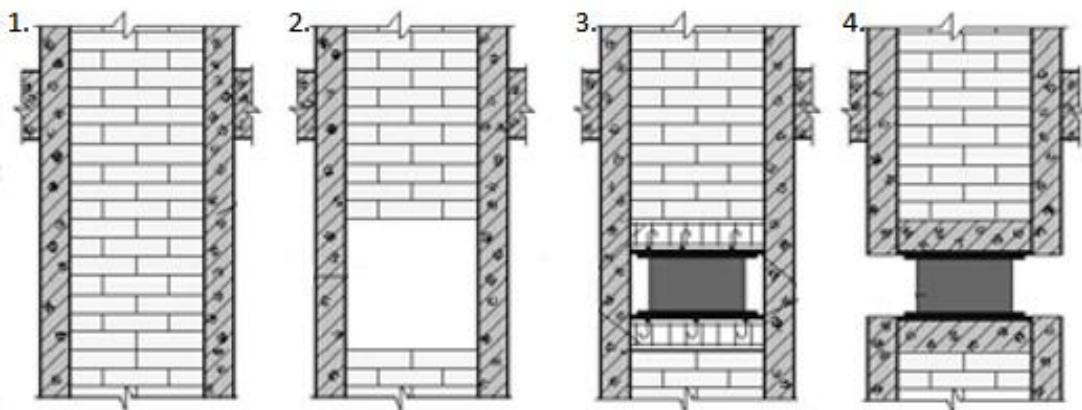


Figura 28 - Procedimento de instalação de isoladores em colunas de alvenaria (adaptado de Melkumyan, 2014)

3.3.2 Procedimentos para estruturas de betão armado

No caso de estruturas betão constituídas por vigas e colunas a localização preferencial para o posicionamento dos aparelhos seria na junção entre a coluna e a fundação. Isto é possível se se criar um piso adicional. Para tal, primeiro é necessário cortar a coluna, para criar espaço suficiente para inserir os aparelhos e depois controí-se uma laje (“base-raft”) por cima, como se pode observar na Figura 29. Uma alternativa mais usual consiste em utilizar a laje do primeiro andar e colocar os isoladores no topo das colunas. Note-se que colocar a camada de isolamento no primeiro piso é menos eficaz do que o caso em que os isoladores de base são colocados próximos do nível do solo. (Matsagar & Jangid, 2008). Existem outros métodos de intervenção que também podem ser aplicados no caso de estruturas de betão, que serão seguidamente esquematizados.

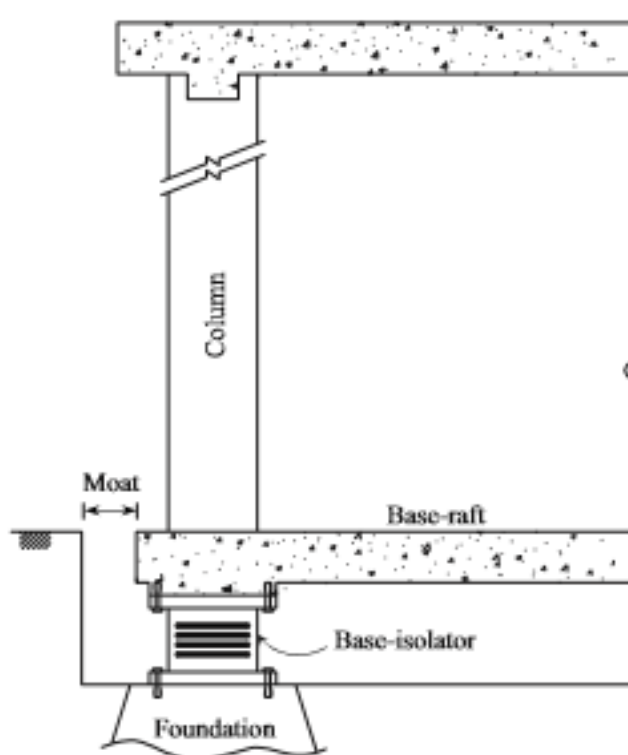


Figura 29 - Isolamento de base em estruturas de betão armado (Matsagar & Jangid, 2008)

Apresenta-se uma síntese de vários procedimentos de reforço sísmico com isolamento de base aplicáveis as estruturas de betão armado. Podem-se distinguir duas técnicas diferentes. A primeira está relacionada com as colunas, “column cut”, em que efetua um corte no seu topo para colocar os isoladores. A outra técnica é denominada de “lift-up” e intervém ao nível das fundações e consiste em separar a estrutura das fundações, envolvendo a necessidade de construção de uma nova laje acima dos isoladores.

Procedimento 1 - Topo de colunas ("column cut")

1. Reforça-se a coluna por encamisamento em betão armado;
2. Fixam-se na coluna capitéis para servir de suporte à colocação dos macacos hidráulicos;
3. Faz-se um corte horizontal na coluna com uma serra adiamantada. Aplica-se nos macacos uma força equivalente à carga vertical que atua em cada coluna, para que a transmissão de cargas verticais passe a ser feita por estes;
4. Fixam-se chapas de topo e de base do aparelho, na secção acima e abaixo da coluna onde foi efetuado o corte;
5. Inserem-se os aparelhos e colocam-se em carga com a tensão necessária e preenche-se o espaço entre o aparelho e as chapas com argamassa epoxídica, garantido assim que a carga vertical é encaminhada através dos aparelhos.
6. Removem-se os macacos hidráulicos e os equipamentos de suporte.

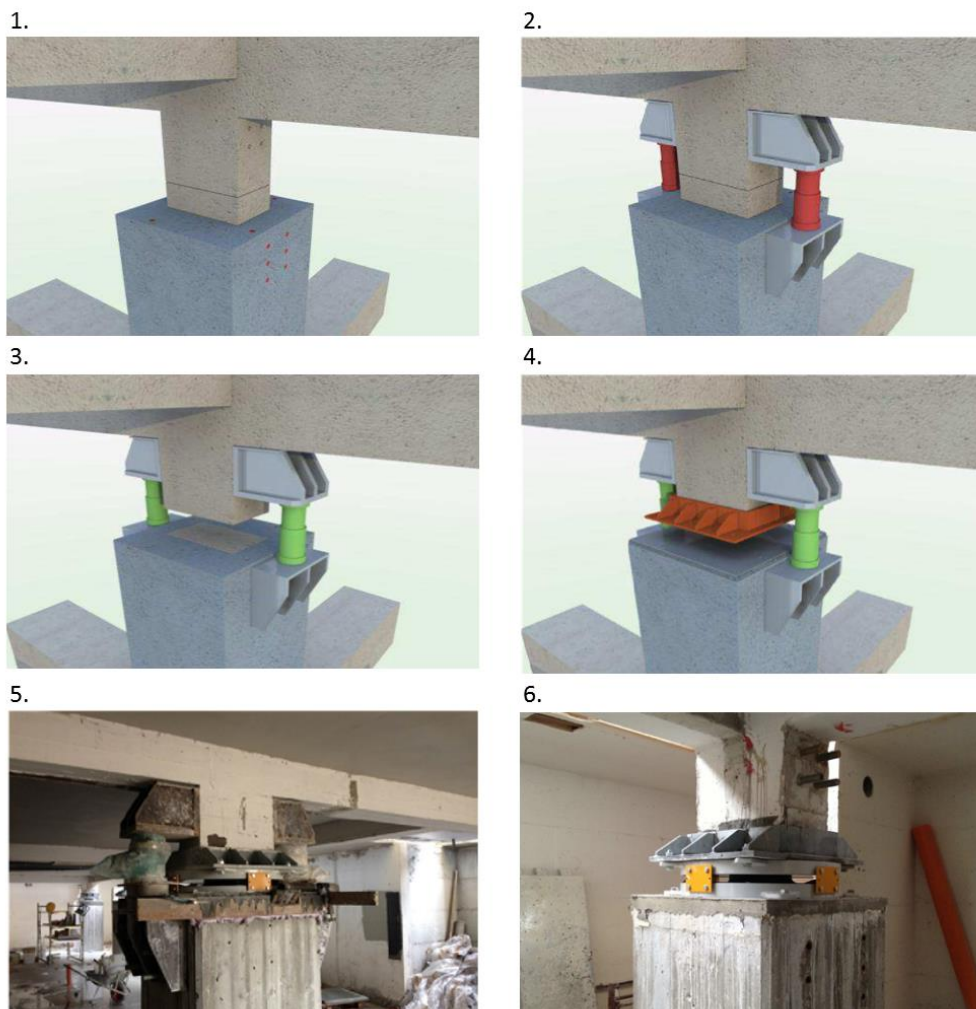


Figura 30 - Procedimento de instalação de isoladores em colunas de betão armado (adaptado de Luca Trombetta et al, 2014)

Procedimento 2 - Topo de colunas ("column cut")

1. Reforça-se a coluna por encamisamento em betão armado;
2. Monta-se um sistema de suporte constituído por perfis metálicos para apoiar os macacos hidráulicos. Por vezes é necessário construir blocos de betão para apoiar os perfis caso a laje não apresente capacidade suficiente. Corta-se a coluna horizontalmente e ativam-se os macacos hidráulicos;
3. Insere-se o aparelho com um macaco plano debaixo e aparafusa-se a parte superior. Ativa-se o macaco plano e fixa-se a parte inferior com argamassa de cimento;
4. Removem-se os macacos hidráulicos.

1.



2.



3.



4.



Figura 31- Procedimento de instalação de isoladores em colunas de betão armado (adaptado de Luca Trombetta et al, 2014)

Procedimento 3 - Fundações (“Lift up”)

1. Começa-se por demolir todos os elementos não estruturais e escava-se até às fundações;
2. Fixam-se suportes metálicos nas colunas;
3. Inserem-se os macacos hidráulicos entre os suportes metálicos e a fundação;
4. Efetua-se um corte horizontal na coluna e ativam-se os macacos hidráulicos, para que as cargas verticais sejam transmitidas por estes e remove-se parte da coluna;
5. Insere-se o aparelho, colocam-se os aparelhos em carga, e aparafusa-se a parte superior. Sela-se a parte inferior com argamassa e retiram-se os macacos hidráulicos;
6. Constrói-se uma nova laje acima dos suportes metálicos.

1.



2.



3.



4.



5.



6.



Figura 32 - Procedimento de instalação de isoladores em fundações de betão armado (adaptado de Luca Trombetta et al, 2014)

Procedimento 4 - Fundações (“Lift up”)

1. Escava-se até as fundações;
2. Executam-se estacas entre cada coluna e forma-se uma superfície rugosa nas colunas;
3. Constrói-se uma viga de distribuição de cargas;
4. Posicionam-se os macacos hidráulicos em cima das estacas e colocando-os em carga asseguram a transferência das cargas verticais;
5. Removem-se as fundações existentes;
6. Penduram-se isoladores debaixo das colunas existentes;
7. Constroem-se novas fundações debaixo dos aparelhos e coloca-se os macacos planos. Depois de estes estarem ativados retira-se os macacos hidráulicos;
8. As cargas verticais são permanentemente transmitidas para os isoladores.

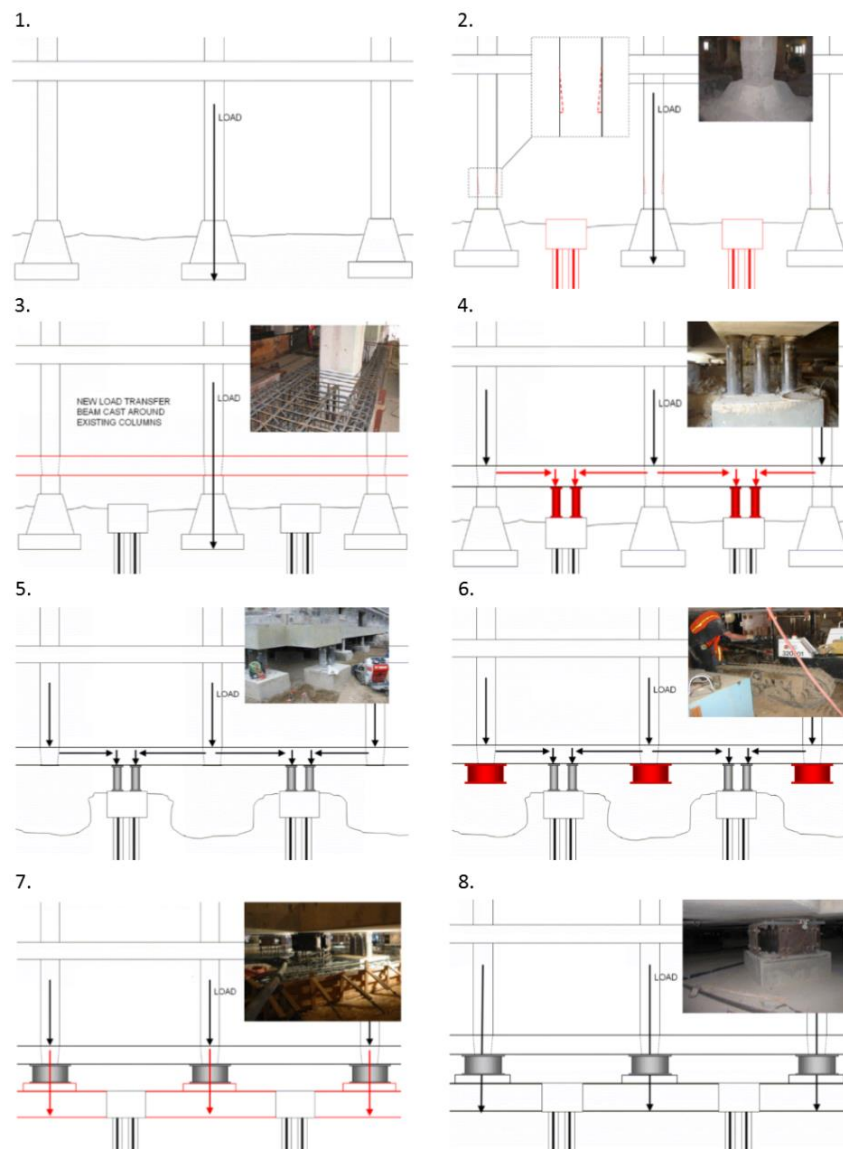


Figura 33 - Procedimento de instalação de isoladores em fundações de betão armado (adaptado de Johnson, 2012)

Procedimento 5 - Fundações ("Lift up")

1. Constroem-se duas bases de betão, uma de cada lado dos pilares, para colocar os macacos hidráulicos. Instala-se também um sistema de suporte. Efetua-se um corte nas colunas e ativam-se os macacos para que cargas verticais sejam transmitidas por estes;
2. Procede-se à demolição da coluna de modo a criar um espaço para inserir o isolador;
3. Colocam-se as armaduras para o alargamento da fundação e posicionam-se os aparelhos em carga;
4. Procede-se à betonagem e retiram-se os sistemas de suporte;
5. Betona-se também a base superior.

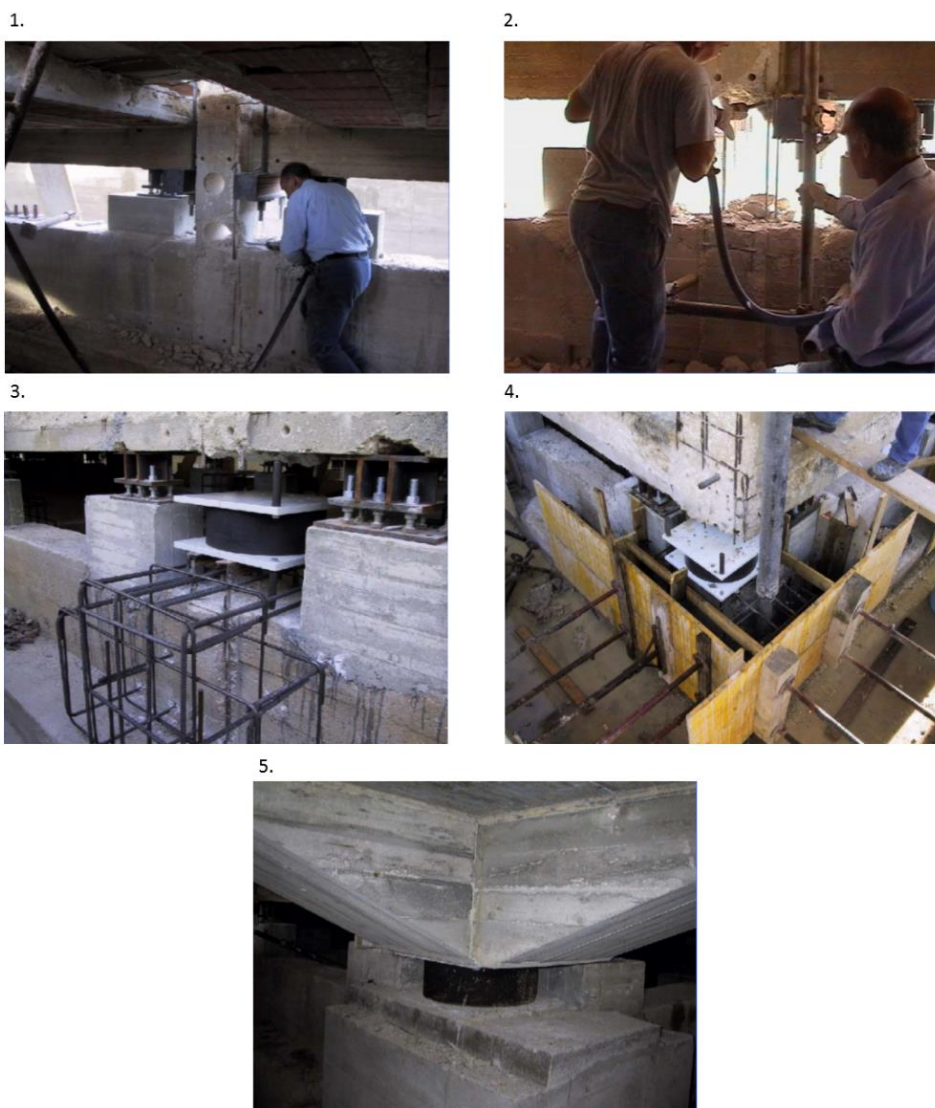


Figura 34 - Procedimento de instalação de isoladores em fundações de betão armado (adaptado de Oliveto et al, 2014)

Procedimento 6 - Fundações (“Lift up”)

1. Constrói-se uma laje de fundação nova;
2. Executa-se uma viga acima desta, que irá absorver os momentos provocados devido à excentricidade criada pela posição dos isoladores;
3. Instala-se o sistema de suporte e remove-se parte da laje nova;
4. Colocam-se os aparelhos e remove-se o sistema de suporte.

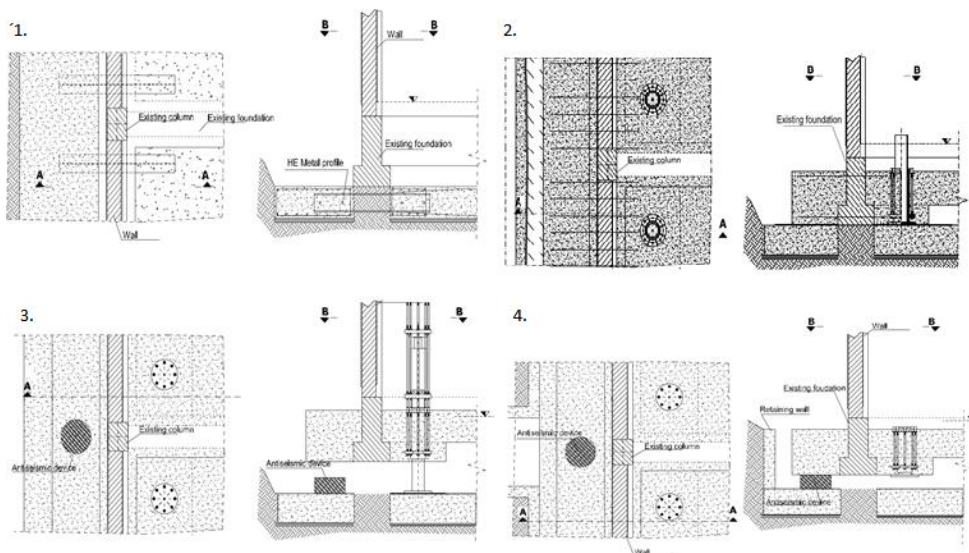


Figura 35 - Procedimento de instalação de isoladores em fundações de betão armado (adaptado de Briseghella et al., 2012)

3.4 Configurações de isolamento sísmico

Para além do dimensionamento dos aparelhos e da escolha do esquema de montagem existem outros pormenores a ter em conta na elaboração de um projeto de reforço através da aplicação de um sistema de isolamento. Em primeiro lugar, é preciso provisionar um sistema de suporte temporário para assegurar o encaminhamento das cargas na fase de instalação dos aparelhos. Outro aspeto importante é garantir que existe distância suficiente entre o edifício a ser reabilitado e os edifícios adjacentes, de modo a acomodar os deslocamentos adicionais que ocorrem através da camada de isolamento, sem que ocorra colisão entre as estruturas. Outras configurações, tais como: a entrada para o edifício e os detalhes relacionados com serviços que passam pelo plano de isolamento, por exemplo, linhas de gás, linhas de abastecimento de água, etc. devem ser pensados de forma a não falharem durante um sismo e também não devem interferir no funcionamento do sistema de isolamento (Matsagar & Jangid, 2008).

Em seguida, apresentam-se esses e outros detalhes que podem auxiliar, de uma forma geral, na elaboração do projeto.

3.4.1 Sistema de segurança

A escolha do sistema de segurança depende da localização e configuração do aparelho de apoio. A Figura 36(A) mostra um sistema de suporte para os casos em que o aparelho de apoio é colocado na parte superior das colunas. Este sistema proporciona um meio de transferência de carga vertical e uma maneira de limitar os deslocamentos laterais. Outra alternativa, é apresentada na Figura 36(B), quando o aparelho se localiza na base das colunas (Mayes & Naeim, 2014).

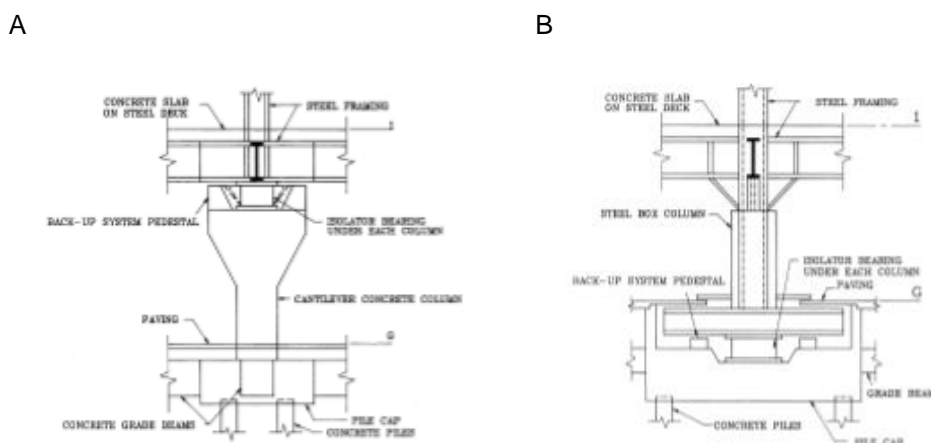


Figura 36 - Sistema de suporte para: aparelhos no topo das colunas, (A); aparelhos na base das colunas, (B) (Mayes & Naeim, 2014)

3.4.2 Distribuição geométrica dos aparelhos

A localização dos aparelhos deve permitir o acesso para inspeção e substituição, caso isso seja necessário. É preferível que haja um diafragma rígido acima ou abaixo dos isoladores para distribuir cargas laterais uniformemente para cada aparelho e para que sejam minimizados os efeitos dos deslocamentos sísmicos diferenciais do terreno. Se a distribuição for feita por uma grelha de vigas de travamento (tie-beams), os aparelhos devem ser dispostos em proporção à carga lateral de cada elemento, colocando aparelhos maiores em elementos mais rígidos. Deve estar disponível um espaço livre suficiente para acomodar o deslocamento horizontal máximo previsto (Mayes & Naeim, 2014).

3.4.3 Ligações do edifício ao exterior

As escadas e os elevadores que atravessam o plano de isolamento geralmente são um problema no reforço de edifício. As principais ligações entre o edifício e o solo, como escadas, entradas, elevadores e condutas precisam ser intercetadas no plano de isolamento ou projetadas para acomodar o deslocamento do sistema de isolamento (Ferraioli & Mandara, 2017).

Uma ampla gama de soluções para ligações de redes de esgotos, Figura 37(A), rede de gás, Figura 37(B) e rede de incêndios, Figura 37(C) foi criada para garantir que esses elementos pudessem se mover independentemente e sem obstrução acima do solo. Como ilustrado na Figura 38, as escadas e os elevadores geralmente são suspensos e apoiados abaixo do nível do piso térreo para se mover dentro ou acima do nível do porão.



Figura 37 - Ligação flexível em tubagens de rede de esgoto (A), rede de incêndios(B) e rede de gás (C) (adaptado de Guerreiro, 2011)

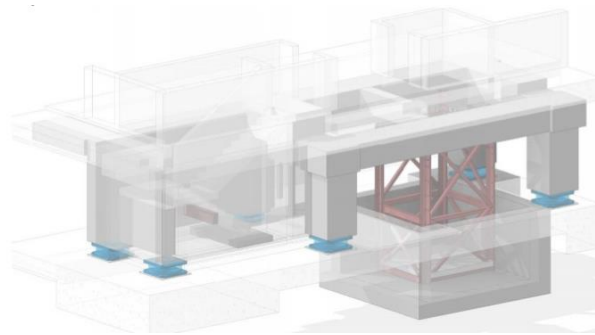


Figura 38 - Elevadores e escadas projetados de forma a se movimentarem em conjunto com a estrutura aquando de um sismo (Lanning et al ,2017)

3.4.4 Detalhes da ligação

Embora os detalhes de ligação, Figura 39, variem de projeto para projeto os princípios de dimensionamento permanecem os mesmos. O aparelho deve estar livre para deformar por corte, isto é, a superfície superior do aparelho deve poder mover-se livremente horizontalmente. As ligações devem ter a capacidade suficiente para transferir forças sísmicas máximas entre a subestrutura e a superestrutura. A facilidade de construção deve ser mantida em mente para garantir o acesso à instalação dos aparelhos e à instalação do suporte temporário para a superestrutura (Mayes & Naeim, 2014).

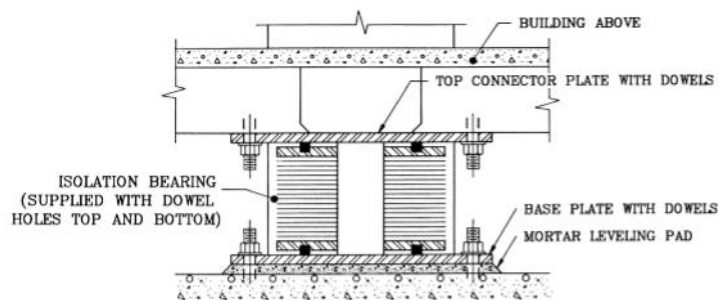


Figura 39 - Detalhe de uma possível ligação (Mayes & Naeim, 2014)

3.4.5 Previsão de remoção dos aparelhos

Sempre que seja possível, deve-se providenciar um plano de remoção e substituição dos aparelhos de apoio. Para isso é necessário promover um meio para apoiar o edifício enquanto o aparelho é removido e um método de retirar o aparelho sem provocar danos nas ligações. O primeiro requisito dependerá da localização dos aparelhos e pode-se usar o mesmo sistema de suporte utilizado na aplicação dos mesmos, geralmente usados os macacos hidráulicos. A remoção dos aparelhos, uma vez que a carga é transferida pelo sistema de suporte, é relativamente simples se forem usadas ligações aparafusadas à estrutura (Mayes & Naeim, 2014).

3.5 Exemplos de Reforço Sísmico em edifícios existentes utilizando isolamento de base

As estruturas antigas como os monumentos e os edifícios históricos tradicionais são caracterizadas pelo valor inerente que possuem devido às características arquitetônica, estética e cultural, representativas de sua era na história. No presente, devem ser preservadas, pois representam uma identidade social e cultural. A maioria desses edifícios foi construída usando estruturas de alvenaria rígidas, pesadas e de baixa resistência, de modo que são particularmente vulneráveis a fenômenos sísmicos e, conseqüentemente, maiores danos (Mezzi & Vetturini, 2012).

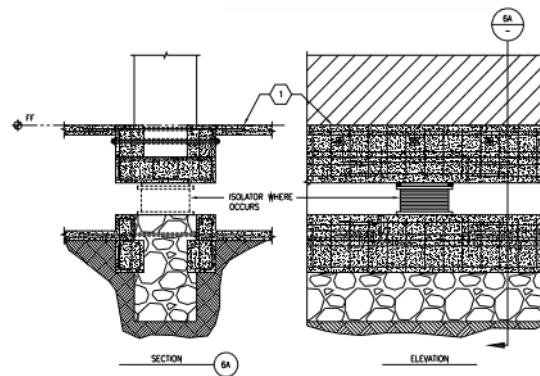
Esses edifícios são construídos principalmente no período anterior ao amplo uso de betão armado, com elementos e tecnologia baseados na experiência dos construtores, desprovidos de qualquer projeto estrutural sísmico. Além disso, o envelhecimento desse tipo de estruturas e o seu desgaste por várias causas, como a humidade, os assentamentos do solo, a poluição, sismos anteriores, bem como a falta de manutenção, tornam essas estruturas muito mais vulneráveis à ação do terremoto do que as construções mais recentes. Portanto, a melhoria do desempenho sísmico dos edifícios históricos tradicionais é considerada necessária e fundamental, especialmente para aqueles localizados em regiões de grande sismicidade. O reforço sísmico utilizando o isolamento da base torna-se uma escolha óbvia na medida que as características arquitetônicas históricas do edifício permanecem preservadas (Matsagar & Jangid, 2008).

Existem diversas estruturas reforçadas sismicamente através do uso de isolamento de base, das quais interessa destacar o "Iasi City Hall" na Roménia, Figura 40(A). Foi construído na década de 1810 e é considerado um património cultural. O edifício é composto por paredes de alvenaria com fundações de alvenaria de pedra. Sofreu danos durante o terramoto de 1977 em Bucareste. No projeto de reforço o plano de isolamento foi projetado para se localizar logo acima do solo, implicando que as paredes da cave do edifício estariam situadas acima do plano de isolamento como se pode ver na Figura 40(B). Os isoladores consistiram numa combinação de LRBs e aparelhos deslizantes. A disposição dos aparelhos pode ser apreciada na Figura 40(C). As paredes existentes foram reforçadas de cada lado por vigas de contenção permanentes, acima e abaixo do plano de isolamento. Em seguida, uma seção de parede foi removida e os isoladores instalados. Finalmente, a parede restante foi cortada finalizando o processo (Gilani & Miyamoto, 2012).

A



B



C

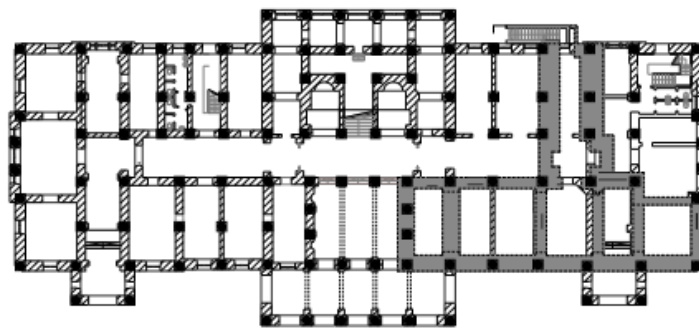


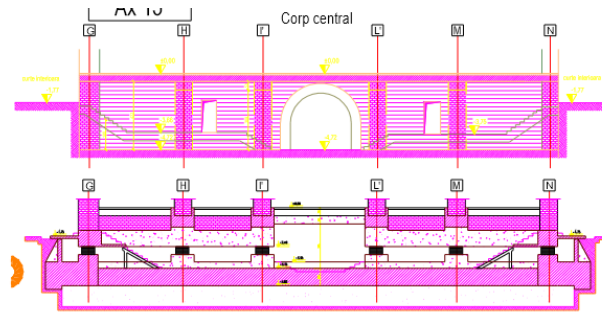
Figura 40 - Edifício “Iasi City Hall” (A), Detalhe do plano de isolamento (B), Distribuição dos aparelhos de apoio (C), (Gilani & Miyamoto, 2012)

Outro exemplo trata-se do “The Bucharest City Hall Building”, Figura 41(A). O edifício foi erguido entre 1906 e 1911 e é composto por parede de alvenaria de tijolos e lajes de betão. Após ter sido sujeito a quatro sismos de magnitudes entre 6,7 a 7,4, foi considerado inseguro. A solução de reforço passou pelo método de isolamento de base com a vantagem de não ter sido necessário evacuar o edifício durante a intervenção (Iordachescu & Iordachescu, 2012). Na Figura 41(B) pode-se consultar a proposta de intervenção com a localização dos aparelhos. Foi construído um novo elemento, uma viga de contenção em betão armado, para permitir a instalação correta dos aparelhos, Figura 41(C).

A



B



C



Figura 41 - Edifício "The Bucharest City Hall Building" (A), proposta de intervenção (B), viga de contenção e aparelhos de apoio (lordachescu & lordachescu, 2012)

O primeiro reforço com isolamento de um bloco de apartamentos foi executado em 1996 na cidade de Vanadzor na Arménia (Melkumyan, 2014). O reforço consistiu na colocação de 60 aparelhos HDRBs num edifício de 5 andares, Figura 42, e sendo a primeira vez que se instalou um sistema de isolamento de base sem realojamento dos moradores. A partir daí, procedimentos similares foram aplicados em todos o mundo (Melkumyan, 2014).



Figura 42 -Edifício de apartamentos reforçados com isolamento de base (Melkumyan, 2014)

Mais tarde, também em Vanadzor, uma escola de 3 andares foi reforçada sismicamente com a mesma técnica, Figura 43(A). Esta escola, com mais de 60 anos, sobreviveu ao sismo de 1988, Spitak, tendo contudo o edifício ficado danificado com fendas nas paredes da caixa de escadas. Sendo um edifício não só com significado histórico para a cidade, mas também com valor arquitetónico, a proposta mais adequada para reforço foi a aplicação de isolamento de base. A intervenção ocorreu em 2001/2002 e consistiu na instalação de 41 aparelhos de HBRD, disposto de acordo com a Figura 43(B), a na reconstituição da laje de esteira. Estas duas operações ocorreram em simultâneo sem que fosse necessário interromper as atividades do edifício (Melkumyan, 2014).

A



B

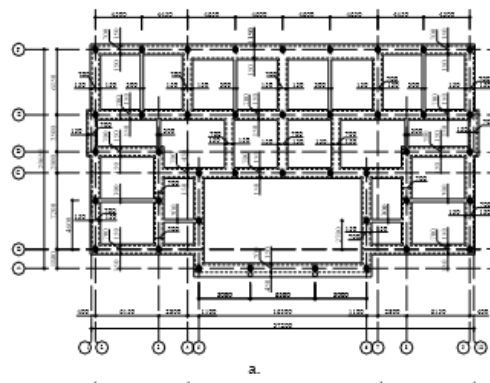


Figura 43– Escola reforçada com isolamento de base (A), distribuição dos aparelhos isoladores (B) (Melkumyan, 2014)

Como exemplo de reabilitação sísmica com isolamento de base aplicado em estruturas de betão apresenta-se um edifício da vila de Solarino, Figura 44(A) Sicília, Itália. Nestes edifícios, por apresentarem vulnerabilidade sísmica, considerou-se aplicar reforço sísmico. Observando as suas fundações originais, Figura 44(B), apercebeu-se que seria fácil instalar um sistema de isolamento entre a fundações e a laje do primeiro piso, através da técnica “column cut”. O edifício foi suportado por 12 HDRB e 13 LFSB disposto de acordo com a Figura 44(C) (Oliveto & Marletta, 2005).

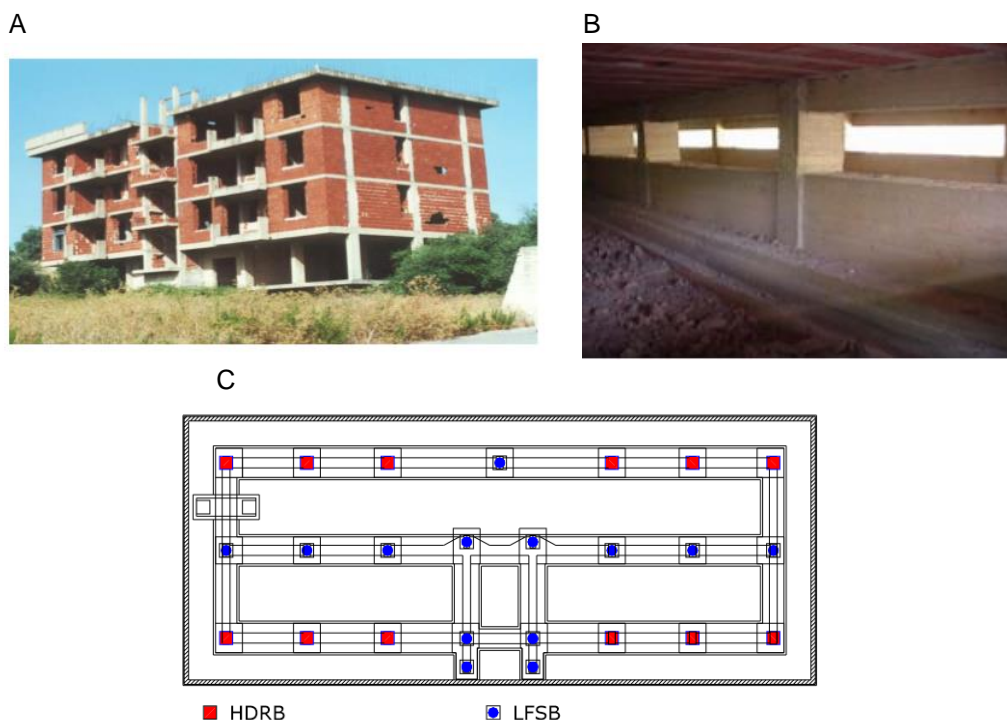


Figura 44 - Edifícios da vila de Solarino (A), fundações originais do edifício (B), distribuição dos aparelhos isoladores (C) (Adaptado de (Oliveto & Marletta, 2005))

Regista-se também o uso de isolamento de base para reforço de estruturas metálicas. Neste tipo de estruturas verifica-se que, os procedimentos utilizados nas intervenções são semelhantes aos procedimentos empregados nas estruturas de betão armado. Isto pode ser fundamentado com os exemplos apresentados de seguida.

O primeiro exemplo diz respeito ao edifício “Los Angeles City Hall”, Figura 45 , situado na Califórnia. É uma estrutura metálica, com 28 pisos, contruída em 1926. O edifício original foi projetado antes da promulgação da regulamentação sísmica e, portanto, não houve a preocupação em relação às forças geradas por um sismo.

Ao longo dos últimos 75 anos, a ocorrência de vários sismos causou danos ao edifício, sendo o mais desastroso o sismo Northridge, em 1994. Posto isso, surgiu a necessidade de reforçá-lo sísmicamente. Com alguns objetivos de desempenho estabelecidos como: garantir estabilidade do sistema estrutural, manter a integridade da fachada exterior do edifício, proteger o conteúdo histórico e preservar as funções básicas do edifício, a técnica de isolamento de base revelou-se a estratégia mais adequada. A operação de reabilitação terminou em 2001, sendo, atualmente, o edifício mais alto em que se aplicou isolamento de base. O sistema de isolamento é constituído por 416 aparelhos HDR e 90 FSP, e foi complementado com 52 amortecedores viscosos (Youssef & Hata, 2005).



Figura 45 – Edifício “Los Angeles City Hall” (Martin, s.d.)

Os aparelhos foram colocados nas colunas e debaixo de paredes, no plano abaixo da cave e acima das fundações. O procedimento de inserção destes apresenta-se esquematizado de seguida.

1. Começa-se por demolir a laje de esteira para facilitar o acesso às fundações e simplificar a instalação dos isoladores. Constroem-se paredes novas nas quais serão colocados os aparelhos, por baixo. Estas paredes têm como função redistribuir as forças e controlar os assentamentos diferenciais.
2. Terminada a construção das paredes, um sistema de macacos hidráulicos é instalado para suportar o edifício e a base das colunas é então removida. A transferência das cargas verticais está garantida pelo sistema de suporte e pelas paredes.
3. Colocam-se os aparelhos nas colunas e debaixo das paredes. Com uma serra corta-se a base das paredes, separando-as das fundações. As cargas voltam a ser transferidas também pelas colunas e passando pelos aparelhos de apoio.
4. Constrói-se um sistema de vigas que liga todos os aparelhos que garante a apropriada transferência de cargas da superestrutura para o sistema de isolamento. A laje de esteira original que foi demolida é agora substituída por uma laje mais fina.
5. Escava-se um fosso no perímetro exterior ao edifício para permitir que o edifício se movimente na ocorrência de um sismo.

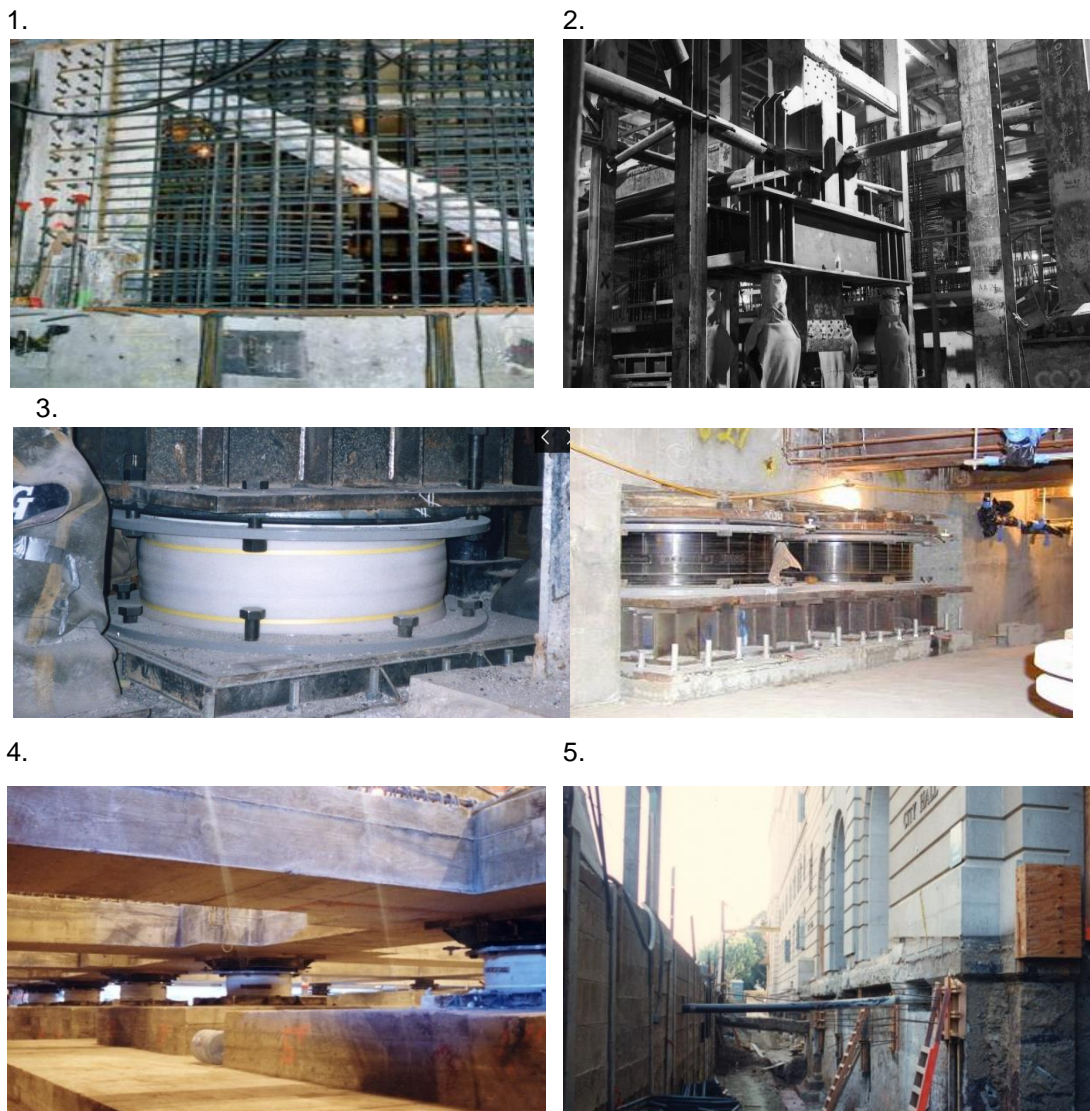


Figura 46 – Procedimento de instalação de aparelhos numa estrutura metálica com adição de paredes (adaptado de Martin, 2016 e de Youssef & Hata, 2005)

Um conjunto de sensores, Figura 47, foi instalado em todo o edifício com o intuito de fornecer, no futuro, dados sobre a resposta real do edifício durante um sismo. Esta informação será útil para compreender melhor o comportamento de estruturas de base isolada com amortecimento complementar (Youssef & Hata, 2005).

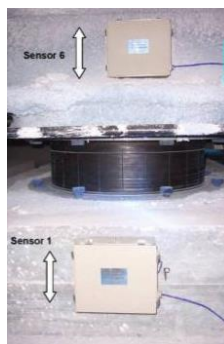


Figura 47 – Sensores (Youssef & Hata, 2005)

Os edifícios “Oakland City Hall” e “San Francisco City Hall” são outros exemplos de estruturas metálicas às quais foi aplicado um sistema de isolamento de base. Estas estruturas sofreram danos devido ao sismo Loma Prieta, em 1989. Em 1995 terminou-se a intervenção de reforço em “Oakland City Hall” e começou-se a reforçar o edifício de “San Francisco City Hall” (Naim & Kelly, 1999).

Quanto ao edifício “San Francisco City Hall”, Figura 48, este foi construído em 1912. A principal preocupação na escolha da estratégia de reforço prendeu-se com a preservação histórica do edifício, sendo por esta razão a técnica de isolamento de base escolhida de entre outras. A operação ficou concluída em 1998 (Naim & Kelly, 1999). O reforço do edifício incluiu um sistema de isolamento constituído por 530 apoios do tipo LRB (Kelly & Konstantinidis, 2011).



Figura 48 - Edifício “San Francisco City Hall” (Canfield, 2016)

A técnica utilizada para colocação dos aparelhos na estrutura foi a técnica da “column cut”, descrita e ilustrada de seguida:

1. Instala-se um sistema de suporte de macacos hidráulicos nos quais se aplica a carga equivalente à carga atuante em cada coluna.
2. Inserem-se os aparelhos e colocam-se em carga. Em alguns casos, devido à carga elevada que atuava algumas colunas foram suportadas em 4 isoladores, instalados numa forma metálica cruciforme.
3. Criou-se um espaço à volta do edifício com cerca de 0,5 metros de largura para acomodar os deslocamentos do edifício
4. Constrói-se uma viga de bordadura para controlar os assentamentos diferenciais.

1.



2.



3.



4.



Figura 49 - Procedimento de instalação de aparelhos numa estrutura metálica (adaptado de Canfield, s.d.)

Por último, o edifício “Oakland City Hall”, Figura 50(A), é constituído por uma estrutura metálica com paredes de alvenaria, foi construído em 1914 (Elsesser et al, 1995). Mais uma vez, a principal preocupação na escolha da técnica de reforço era a preservação histórica. Foram utilizados 110 apoios LRB, com diâmetros entre 737mm e 940mm e a colocação destes foi feita recorrendo à técnica “column cut”, Figura 50(B), à semelhança da intervenção feita em “San Francisco City Hall” (Naim & Kelly, 1999).

A



B



Figura 50 -Edifício “Oakland City Hall” (A), Técnica “column cut” utilizada na intervenção de reforço do edifício (B) (adaptado de (Forell / Elsesser Engineers, s.d.) e (Sheedy Drayage Co., s.d.)

4 Caso de Estudo

Neste capítulo apresenta-se o caso de estudo desenvolvido neste trabalho, que consiste na proposta de reabilitação sísmica utilizando a técnica de isolamento de base para o Laboratório Regional de Veterinária dos Açores (LRVA).

Esta proposta engloba o dimensionamento dos aparelhos de apoio e a definição da sequência pela qual estes serão inseridos na estrutura. Primeiro analisou-se a estrutura com base fixa e definiram-se as características do sistema de isolamento, como a frequência, rigidez horizontal total e deslocamento máximo. Em seguida, escolheu-se o conjunto de aparelhos que integra o sistema de isolamento. E, por último, elaborou-se um esquema de montagem dos aparelhos em que se procurou definir uma sequência que induzisse a menor variação de esforços possível nos elementos estruturais, nomeadamente nas vigas.

4.1 Caracterização da estrutura

O edifício que serviu de base para o caso de estudo foi o Laboratório Regional de Veterinária dos Açores (LRVA), à semelhança do caso de estudo utilizado na dissertação desenvolvida por Frederico Amaral (Amaral, 2013). A escolha deste edifício como exemplo prende-se com o facto de se dispor de informação e deste ter sido, anteriormente, alvo de um estudo com isolamento de base, e não pela necessidade de ser reforçado. Localizada em Angra do Heroísmo na Ilha Terceira, no Arquipélago dos Açores, a estrutura real possui um sistema de isolamento de base devido ao elevado risco de atividade sísmica do local e também por exigir nível zero de fendilhação, devido ao risco máximo de contaminação associado. No projeto original, o sistema de isolamento de base é composto por 28 apoios HDRB. Por motivos académicos, o estudo teve por base esse edifício, mas sem aparelhos de apoio. Em vez disto, todas as ligações ao exterior encontram-se encastradas, tratando-se, portanto, de uma estrutura de base fixa. O edifício é constituído por três pisos de planta aproximadamente quadrada. De piso para piso verifica-se uma variação da área da planta assim como do pé direito, cujas variações podem ser vistas mais detalhadamente na Tabela 1. A estrutura é porticada no contorno do edifício, com lajes dos pisos elevados fungiformes e possui um núcleo central e 8 pilares interiores. Entre o piso inferior e a fundação existem pilares quadrados com 1m de lado e 1,5m de altura, sendo esse o espaço adequado para instalar os aparelhos de apoios. Os aparelhos serão inseridos posteriormente, mais precisamente a 1,5m abaixo da laje do piso inferior, logo acima das fundações, ficando todos ao mesmo nível. As fundações são constituídas por uma malha de vigas que aumenta a rigidez do piso inferior uniformizando os deslocamentos nos apoios. A estrutura foi modelada utilizando o programa *SAP2000* (CSI, 2016). Uma representação do modelo pode ser observada na Figura 51, assim como a planta do primeiro piso. O betão utilizado foi o C25/30.

Tabela 1 - Resumo da variação das cotas e áreas do edifício

Piso	Cota	Área (m ²)
------	------	------------------------

0	0	24 x 23 = 552
1	3,7	26 x 26 = 676
2	7,9	24 x 26 = 624
Cobertura	11,4	26 x 26 = 676

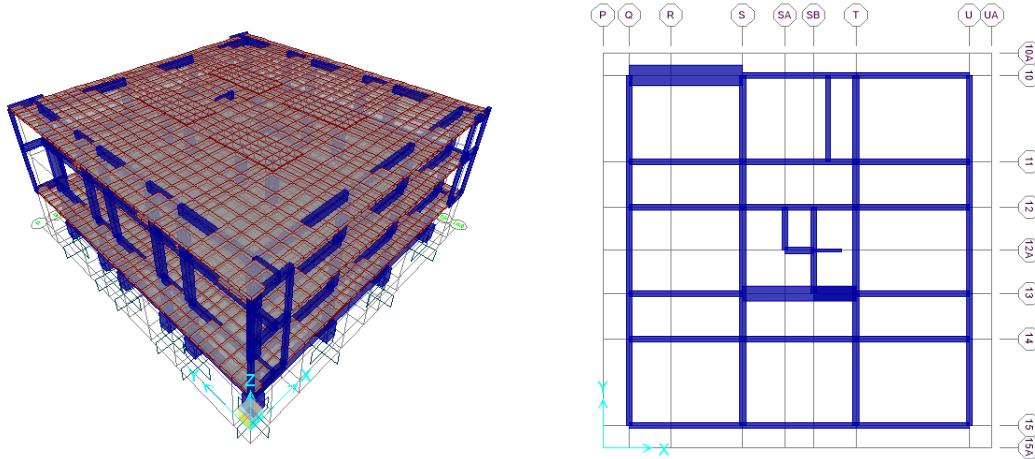


Figura 51 - Modelo estrutural (A), planta do primeiro piso (B)

Quanto às cargas aplicadas, temos o peso próprio, que é considerado diretamente através da volumetria dos elementos estruturais e do peso volúmico do material. As restantes cargas permanentes, RPC, e a sobrecarga, SC, variam em alguns pisos como se pode perceber na Tabela 2. e ainda foram aplicadas cargas de fachada, P_{ext} , para simular as paredes exteriores. A estrutura apresenta uma massa total de 3849,32 toneladas.

Tabela 2 - Síntese das cargas aplicadas

Piso	RCP [kN/m ²]	SC [kN/m ²]	P_{ext} [kN/m]
0	4,25	4	8,5
1	4,25	4	8,5
2	3	5	8,5
Cobertura	3	1	8,5

4.2 Caracterização da Ação Sísmica

A ação sísmica foi definida com base em acelerogramas artificiais. Esta é uma alternativa, apresentada pelo EC8, para a representação do movimento sísmico em termos da variação da aceleração à superfície do terreno em função do tempo. Os acelerogramas artificiais foram geradas de acordo com as características esperadas para a ação sísmica num determinado local e de modo a corresponderem aos espectros de resposta elásticos para 5 % de amortecimento ($\xi = 5\%$). Neste caso, utilizaram-se 7 acelerogramas artificiais representativos da zona de Lisboa, zona 1.3 e zona 2.3, para ação sísmica do tipo 1 e 2, respetivamente, e considerando um solo do tipo B. Estes podem ser

consultados no anexo A.

Posto isto, para efeito de dimensionamento dos apoios, efetuaram-se várias combinações das componentes horizontais da ação sísmica.

4.3 Análise da estrutura de base fixa

Como referido anteriormente, começa-se por considerar a estrutura do LRVA com base fixa. Para tal, utilizou-se o modelo computacional do edifício em questão, modelado em *SAP2000*, em que se colocaram encastramentos perfeitos em todos pontos de apoios.

Da análise modal da estrutura de base fixa resultaram os modos de vibração representados na Figura 52 e as frequências de vibração, períodos e o somatório da participação modal que se encontram apresentados na Tabela 3. Note-se que para realizar esta análise utilizaram-se os vetores Ritz, considerando os modos de vibração em torno de x e y.

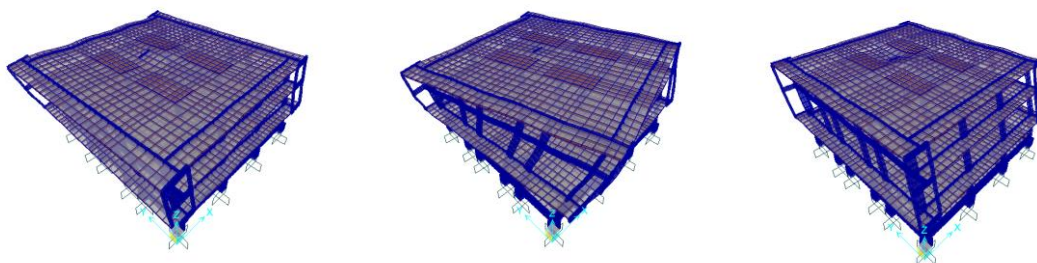


Figura 52 - Modos de vibração: segundo x (A), de torção (B), segundo y (C)

Tabela 3 - Resultados da análise modal da estrutura de base fixa

Modos	Frequência [Hz]	Período [s]	$\sum U_x$	$\sum U_y$
1	2,06	0,486	0,52	0,00
2	2,28	0,439	0,54	0,01
3	2,66	0,375	0,54	0,53
4	7,25	0,138	0,63	0,53
5	7,54	0,133	0,67	0,53
6	7,64	0,131	0,67	0,53
7	7,80	0,128	0,67	0,53
8	7,80	0,128	0,67	0,53
9	7,92	0,126	0,67	0,53
10	8,00	0,125	0,67	0,53
11	8,33	0,120	0,67	0,53
12	8,69	0,115	0,67	0,53

Dos resultados da análise modal salientam-se dois aspetos. O primeiro prende-se com o facto da estrutura apresentar uma frequência fundamental elevada para o tipo de edifício em causa e o outro

aspecto está relacionado com a realidade de que o segundo modo de vibração é um modo de torção. Estes dois fatores poderão levar a problemas na resposta da estrutura face à ação sísmica, tornando-se necessário uma intervenção para reforço sísmico da estrutura. O método escolhido para tal intervenção foi a aplicação de um sistema de isolamento de base constituído por aparelhos de apoio elastoméricos do tipo HDRB. Os aparelhos serão distribuídos em planta de acordo com a Figura 53. e para facilitar a análise serão denominados segundo a numeração apresentada na referida figura.

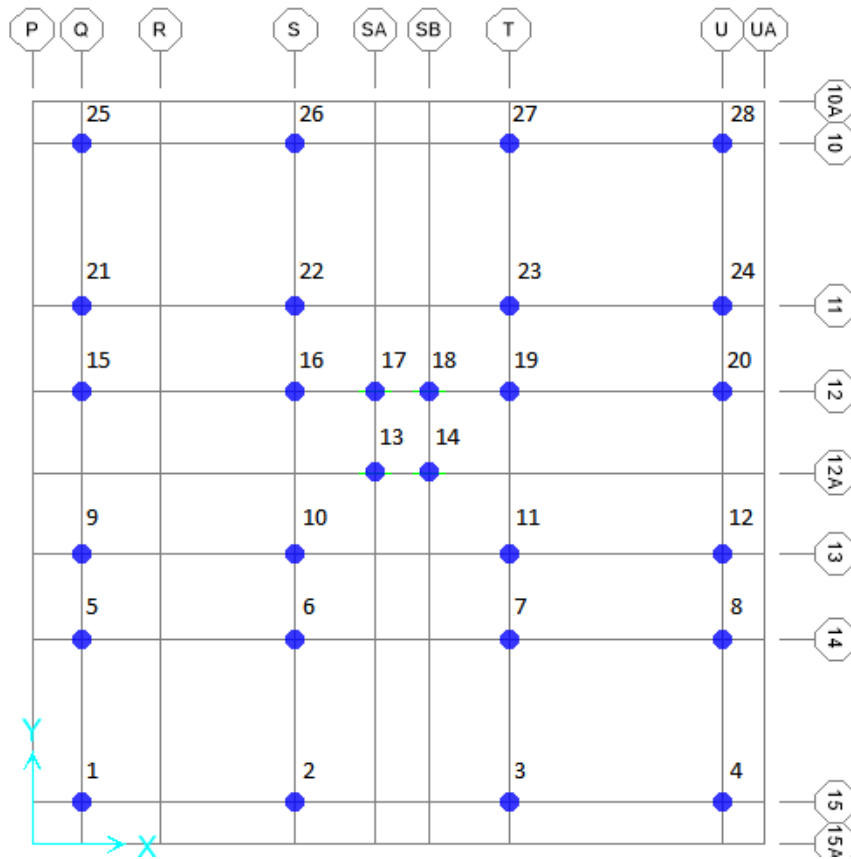


Figura 53 - Distribuição e numeração dos aparelhos de apoio

4.4 Dimensionamento dos aparelhos de apoio

Em primeiro lugar, definiu-se a frequência fundamental da estrutura de base isolada a partir da frequência própria do modelo de base fixa e de acordo com o pressuposto apresentado na Figura 22 em 2.4.1. Recorda-se que esta figura mostra que para um caso em que a frequência de base fixa ronda os 2 Hz, a relação entre esta frequência e a frequência de base isolada deverá ser de 4. Partindo desta relação, chega-se ao valor da frequência adequada para o sistema de base isolada:

$$\frac{f_{fixa}}{f_{isol}} = 4 \Leftrightarrow \frac{2,06}{f_{isol}} = 4 \Leftrightarrow f_{isol} = \frac{2,06}{4} = 0,515 \text{ Hz} \quad (14)$$

Assume-se um valor de 0,5 Hz. Este valor, como se pode constatar de seguida, respeita o intervalo

delimitado pelo EC8, referenciado em 2.4.1.

$$3T_f \leq T_{eff} \leq 3s \Leftrightarrow 3 \times 0,486 \leq \frac{1}{0,5} \leq 3s \Leftrightarrow 1,458 \leq 2 \leq 3s \quad (15)$$

Partindo da frequência fundamental desejada define-se o valor da rigidez horizontal total, K_h , do sistema de isolamento. Este é o critério principal na escolha dos aparelhos e que será depois repartido pelas rigidezes horizontais de cada um dos aparelhos de apoio.

Uma vez que se trata de aparelhos do tipo HBRD, segundo 2.4, o seu comportamento pode ser simulado através de um modelo linear equivalente e, assumindo que a superestrutura se comporta com um corpo rígido, de acordo com o referido em 2.4.1, a análise linear simplificada é a mais adequada. Assim, o valor da rigidez horizontal pode ser obtido pela dedução da expressão 16 apresentada no referido subcapítulo. O cálculo da rigidez apresentado de seguida depende da frequência do sistema de isolamento e da massa total de superestrutura.

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{eff}}} \Leftrightarrow \frac{1}{f_{isol}} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{eff}}} \Leftrightarrow K_{eff} = (2\pi f_{isol})^2 M = (2\pi \times 0,5)^2 \times 3849,32 = 37991,27 \text{ kN/m} \quad (16)$$

O segundo critério de seleção está relacionado com o deslocamento máximo. Uma vez mais, considerando uma análise linear simplificada, o valor do deslocamento pode ser calculado pela expressão (17), apresentada em 2.4.1:

$$d_{dc} = \frac{M S_e(T_{eff}, \xi_{eff})}{K_{eff,min}} \quad (17)$$

Como é possível observar-se, a expressão depende do valor da aceleração espectral. Para obtenção desse valor foram obtidos através do programa *SAP2000* os valores das acelerações espectrais, para um amortecimento de 12% sendo este o valor considerado para o isolamento, de cada um dos 7 acelerogramas utilizados na definição da ação sísmica. Em seguida, considerou-se uma média desses valores e produziu-se um espetro de resposta, que se encontra representado na Figura 54. No anexo B pode-se consultar os valores utilizados na construção do gráfico.

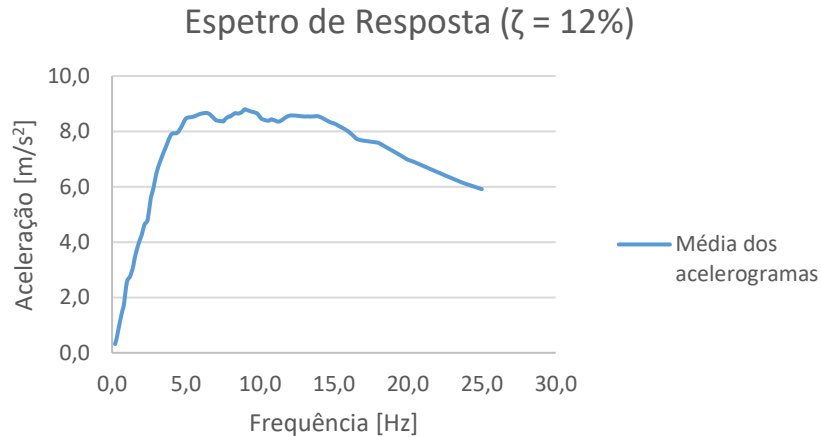


Figura 54 -Espectro de resposta relativo à média dos 7 acelerogramas adotados para um amortecimento de 12%

A partir do espectro de resposta retirou-se o valor da aceleração espectral correspondente à frequência de 0,5 Hz. Resulta o valor de $S_e(f_{isol} = 0,5, \zeta_{eff} = 12\%) = 1,1 \text{ m/s}^2$.

Com todos os parâmetros definidos, procedeu-se ao cálculo do deslocamento como se mostra de seguida:

$$d_{dc} = \frac{M S_e(T_{eff}, \zeta_{eff})}{K_{eff, min}} \Leftrightarrow d_{dc} = \frac{3849,32 \times 1,1}{37991,27} = 0,1115 \text{ m} = 111,5 \text{ mm} \quad (18)$$

O último critério está relacionado com a capacidade de carga vertical de cada aparelho. Para isso foi utilizada a combinação envolvendo a ação sísmica, de acordo com a EN 1990:2002, §6.4.3.4., expressão (6.12b):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (19)$$

Em que:

$G_{k,j}$, valor característico da ação permanente j;

P, valor representativo de uma ação de pré-esforço;

A_{Ed} , valor de cálculo de uma ação sísmica;

$\psi_{2,i}$, coeficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma ação variável i;

$Q_{k,i}$, valor característico da ação variável acompanhante i;

Atendendo ao quadro A1.1 da EN 1990, atribui-se o valor de 0,3 para $\psi_{2,i}$ tendo sido considerado o edifício de categoria B.

A Tabela 4 resume os valores máximos do esforço normal, em kN, para a combinação sísmica referida.

Tabela 4 - Valores máximos do esforço normal, em kN, para a combinação envolvendo a ação sísmica

Apoio 25 2184,15	Apoio 26 2050,25			Apoio 27 2157,56	Apoio 28 2305,05
Apoio 21 1438,49	Apoio 22 3071,01			Apoio 23 3250,8	Apoio 24 2891,06
Apoio 15 2362,11	Apoio 16 3312,86	Apoio 17 11192,13	Apoio 18 12045,51	Apoio 19 3914,92	Apoio 20 2757,13
		Apoio 13 16755,29	Apoio 14 15026,91		
Apoio 9 2268,82	Apoio 10 2500,42			Apoio 11 3019,75	Apoio 12 2709,81
Apoio 5 2548,73	Apoio 6 2708,9			Apoio 7 3001,39	Apoio 8 2973,88
Apoio 1 2347,8	Apoio 2 2029,62			Apoio 3 2082,39	Apoio 4 2158,16

Definidas essas três características, procedeu-se à escolha dos aparelhos. Para tal, foi utilizado o catálogo dos apoios elastoméricos da empresa FIP Industriale (FIP Industriale, 2016), cujo excerto se pode consultar no anexo C.

A principal preocupação na escolha dos aparelhos foi tentar que o valor total da soma das rigidezes horizontais destes se aproximasse, o máximo possível, do valor da rigidez horizontal do sistema de isolamento calculado anteriormente.

Para que isso fosse conseguido, face aos aparelhos de que se disponha, em alguns casos selecionaram-se apoios cuja capacidade de carga vertical era inferior à carga aplicada, para a combinação considerada. Tendo consciência de que a capacidade resistente nunca deve ser inferior às forças aplicadas, esta abordagem não seria a mais correta para um caso real. Nesta situação, uma solução passaria por encomendar os aparelhos com as dimensões e características desejadas que cumprissem todos os requisitos. No entanto, tratando-se de um exemplo académico e atendendo a que a diferença entre a capacidade resistente e a carga aplicada apresentava uma variação de apenas 5%, utilizaram-se os aparelhos que se tinham ao dispor.

Nos referidos catálogos, os aparelhos encontram-se agrupados por diferentes valores de deslocamento máximos. Foram usados valores de 200 e 250 mm, que são superiores ao calculado. De novo, escolheu-se esta opção em prol de se conseguir obter um valor de rigidez horizontal próximo do pretendido e tendo em conta que este aspeto não traz implicações no bom funcionamento do sistema.

A solução definida é constituída por cinco aparelhos diferentes, que se encontram discriminados na Tabela 5, assim como a sua capacidade de carga vertical e a respetiva rigidez horizontal e vertical. Na Figura 55 apresenta-se a disposição geométrica dos mesmos.

Tabela 5 - Aparelhos de apoio e respectivas características

n	Tipo de Aparelhos	N [kN]	d [mm]	K_e [kN/mm]	$n \times K_e$ [kN/mm]	K_v [kN/mm]
2	SI - N 1000/140	15350	250	4,49	8,98	4000
2	SI - S 1200 /144	12850	250	3,14	6,28	4013
12	SI - S 600/104	2230	200	1,09	13,08	1313
6	SI - S 650/108	2760	200	1,23	7,38	1424
6	SI - S 700/100	3110	200	1,54	9,24	1722
				$n \sum K_e = 44,96$		

Em que:

n, numero de aparelhos utilizado;

N, esforço axial para a combinação da ação sísmica;

d, deslocamento máximo;

K_e , rigidez horizontal efetiva.

Quando à designação do tipo de aparelho, explica-se por ordem os significados de cada variável:

SI, Seismic isolator

S ou N, tipo de composto (soft ou normal)

1000, diâmetro do aparelho

140, espessura total do elastómetro.

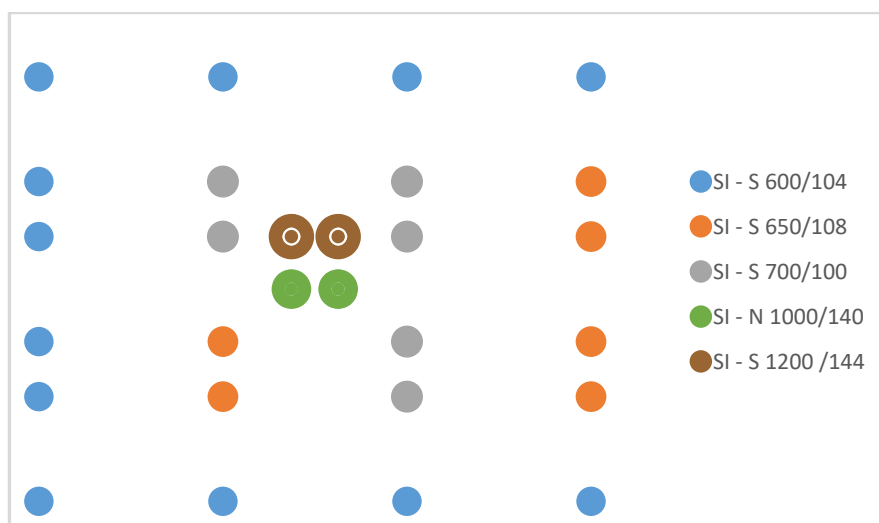


Figura 55 – Distribuição geométrica do tipo de aparelhos de apoio

Como referido anteriormente, pode-se observar na Tabela 5 que os aparelhos de apoio têm uma rigidez vertical elevada e uma rigidez horizontal inferior para minimizar as acelerações e as forças sísmicas transmitidas à estrutura, acima do plano de isolamento, durante a ocorrência de um sismo.

Note-se que a partir do momento que se considera a rigidez vertical dos aparelhos de apoio, de acordo com os dados do catálogo, tem de se considerar a deformação vertical dos mesmos.

4.5 Esquema de Montagem dos Aparelhos de Apoio

Uma vez escolhidos os aparelhos de apoio que constituem o sistema de isolamento de base, é importante elaborar um esquema de montagem em que se define a sequência em que estes irão ser colocados na estrutura.

Note-se que a substituição de um pilar de betão por um aparelho de apoio, devido a diferença de rigidezes entre estes elementos, provoca um assentamento que induz uma variação de esforços nos elementos adjacentes. E, uma vez que não se pode inserir todos os aparelhos ao mesmo tempo, esta situação é agravada pelo facto de existirem etapas no processo de montagem em que a estrutura está apoiada em pilares de betão e em aparelhos de apoio. Esta variação de esforços pode ultrapassar a capacidade resistente de alguns elementos, provocando danos. Sendo esta a principal preocupação na incorporação faseada de aparelhos de apoio, o critério para a definição do esquema de montagem foi a minimização da variação de esforços.

Para tal, no presente caso, testaram-se varias hipóteses de possíveis modos de incorporação dos aparelhos na estrutura e foi-se analisando as consequências destas na variação de momentos nas vigas do primeiro piso, tendo-se optado pela hipótese que melhor respeita o critério acima mencionado. Ao mesmo tempo, foi-se reunindo um conjunto de situações a evitar, e seleccionando as melhores maneiras de incorporar os aparelhos.

A base para a definição do esquema de montagem esteve relacionada com os valores dos deslocamentos verticais de cada pilar para a combinação de ações quase-permanentes.

Seleccionam-se quais os pilares a serem intervencionados atendendo à sua ordem crescente de valores de deslocamentos verticais, ou seja, a cada intervenção escolhiam-se primeiro os pilares que apresentassem menor valores de deslocamento vertical. No caso de existirem pilares com deslocamentos iguais, não tendo a percepção de que pilar escolher, foi necessário testar diferentes hipóteses com vista a detetar a alternativa que provocasse menor variação de esforços. As hipóteses testadas foram as seguintes:

- i) Dar prioridade aos pilares com menor esforço normal;
- ii) Atender à localização dos aparelhos, ou seja, tentar que cada etapa se confinasse a uma determinada área, intervindo em pilares próximos uns dos outros;
- iii) Colocar 4 ou 5 aparelhos em cada intervenção.

O estudo foi feito utilizando esforços e deslocamentos obtidos com base na combinação de ações quase-permanente. Esta combinação foi a escolhida por melhor representar a situação do edifício aquando da intervenção e encontra-se definida na EN 1990:2002, §6.5.3., expressão (6.16b), apresentada de seguida:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (20)$$

Em que:

$G_{k,j}$, valor característico da ação permanente j ;

P , valor representativo de uma ação de pré-esforço;

$\psi_{2,i}$, coeficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma ação variável i ;

$Q_{k,i}$, valor característico da ação variável acompanhante i ;

Atendendo ao quadro A1.1 da EN 1990, atribui-se o valor de 0,3 para $\psi_{2,i}$ sendo considerado o edifício de categoria B.

A Tabela 6 esquematiza os valores de deslocamentos verticais, bem como os valores do esforço normal referentes a cada pilar para a combinação de ações quase-permanente. Estes valores são apresentados de acordo com o exemplo: em cada célula o primeiro valor representa o deslocamento em milímetros e o segundo valor diz respeito ao esforço normal expresso em kN.

Tabela 6 - Deslocamentos verticais em mm e esforço normal de cada pilar em kN

Apoio 25	Apoio 26			Apoio 27	Apoio 28	Número do Apoio Deslocamento [mm] Esforço Normal [kN]
0,95 1241,72	1,34 1765,23			1,38 1807,87	0,91 1190,10	
Apoio 21	Apoio 22			Apoio 23	Apoio 24	
0,96 1258,92	1,13 1937,30			1,13 1942,64	0,85 1203,89	
Apoio 15	Apoio 16	Apoio 17	Apoio 18	Apoio 19	Apoio 20	
0,93 1223,54	0,86 1482,29	0,13 505,25	0,12 488,73	0,87 1490,52	0,82 1162,32	
		Apoio 13	Apoio 14			
		0,17 699,75	0,20 801,75			
Apoio 9	Apoio 10			Apoio 11	Apoio 12	
0,92 1209,85	1,18 1684,81			0,99 1712,80	0,80 1139,78	
Apoio 5	Apoio 6			Apoio 7	Apoio 8	
0,95 1253,53	1,43 2042,29			1,23 2114,39	0,84 1189,36	
Apoio 1	Apoio 2			Apoio 3	Apoio 4	
0,95 1248,42	1,37 1801,48			1,36 1786,18	0,91 1191,79	

Analisando a tabela, verifica-se que os pilares que apresentam menores deslocamentos são os pilares centrais, correspondentes ao núcleo, portanto na primeira intervenção colocaram-se os aparelhos de apoio número 13, 14, 17 e 18. Atendendo ao mesmo critério, não havendo dúvidas, a segunda e a terceira intervenção foram, respetivamente, a colocação dos apoios número 8, 12, 20 e 24 e dos apoios 4, 16, 19 e 28. Estas três intervenções estão esquematizadas abaixo na Figura 56.

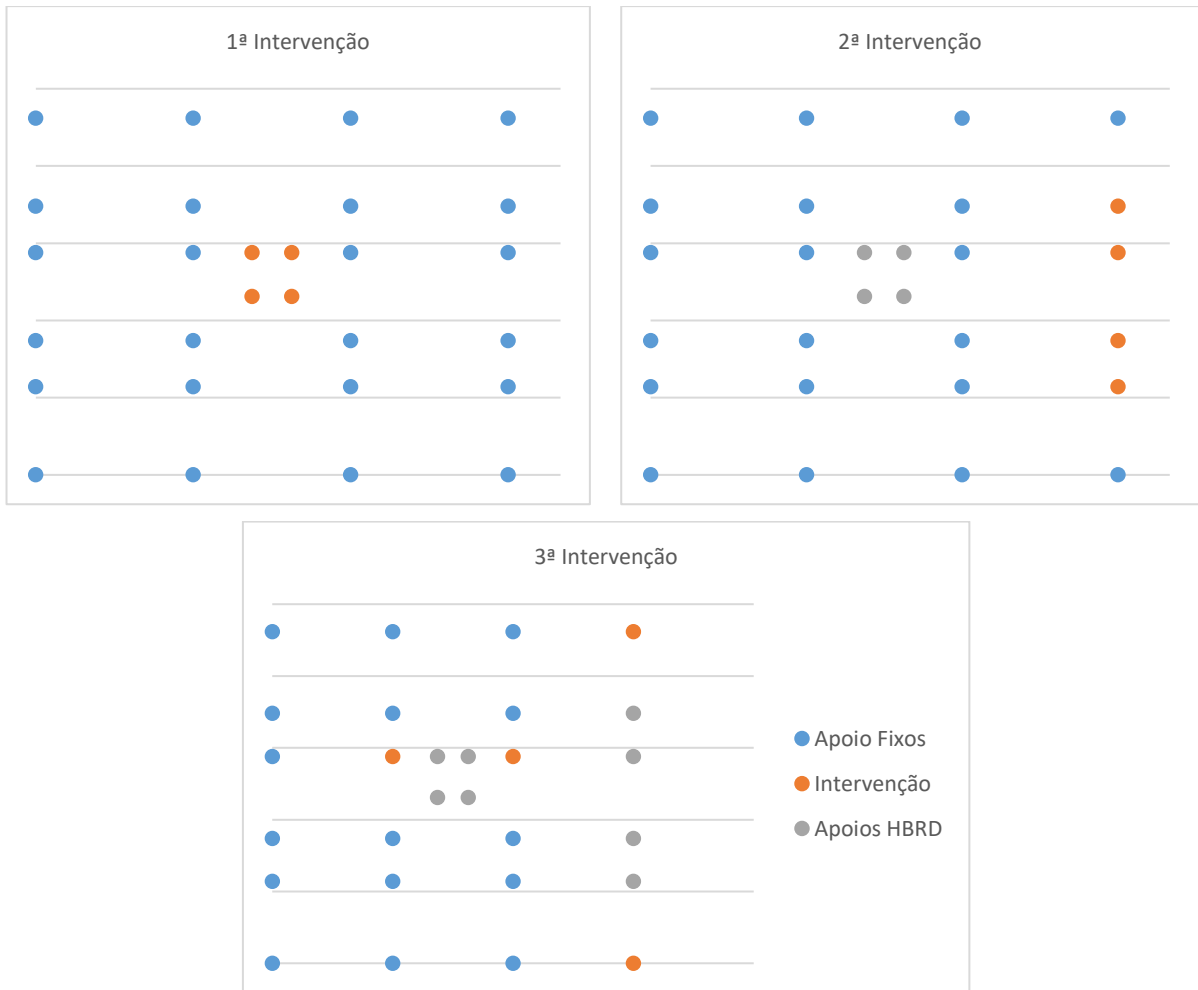


Figura 56- Representação das primeiras três intervenções

Na quarta intervenção, atendendo ao critério de menor deslocamento, selecionou-se o apoio 9 e 15, tendo-se deparado com o cenário de existirem três aparelhos com os mesmos valores de deslocamento vertical, o número 1, 5 e 25. Então, uma primeira hipótese teve por base de seleção os pilares que apresentavam esforço normal menor, selecionando-se os apoios 1 e 25. No entanto, decidiu-se testar uma segunda hipótese que consiste em intervir nos aparelhos 1, 5, 9 e 15 em simultâneo, já que dessa forma a intervenção apresentaria uma disposição mais uniforme, estando todos os pilares dispostos seguidamente no mesmo alinhamento. Estas duas hipóteses estão explícitas na Figura 57.



Figura 57 – Representação das duas hipóteses para a quarta intervenção

A nomenclatura das vigas esta associada à grelha apresentada na planta Figura 58.

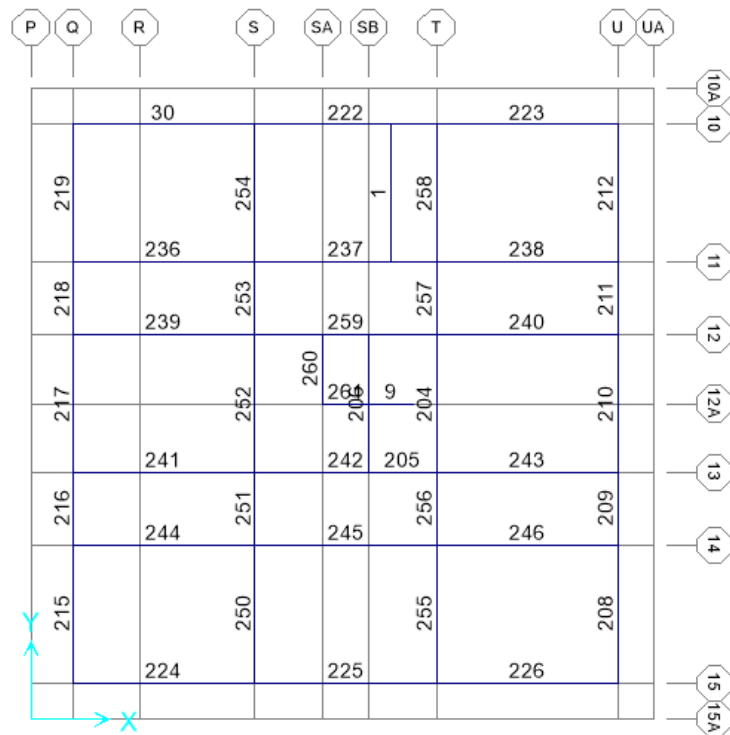


Figura 58 – Nomenclaturas das vigas

Com o objetivo de encontrar a alternativa mais viável, analisaram-se as consequências ao nível da variação de momentos nas vigas para ambas as hipóteses.

Na Figura 59, apresentam-se as vigas nas quais se notaram mais os efeitos, sendo estas as vigas número 215, 216, 218 e 219. Estas vigas correspondem às vigas de bordadura que descarregam diretamente nos pilares intervencionados. Nos gráficos apresenta-se a situação inicial, que corresponde aos momentos nas vigas antes da quarta intervenção, e a situação após terem sido testadas as duas hipóteses acima referidas. Os valores utilizados na construção dos gráficos podem ser consultados no anexo D.

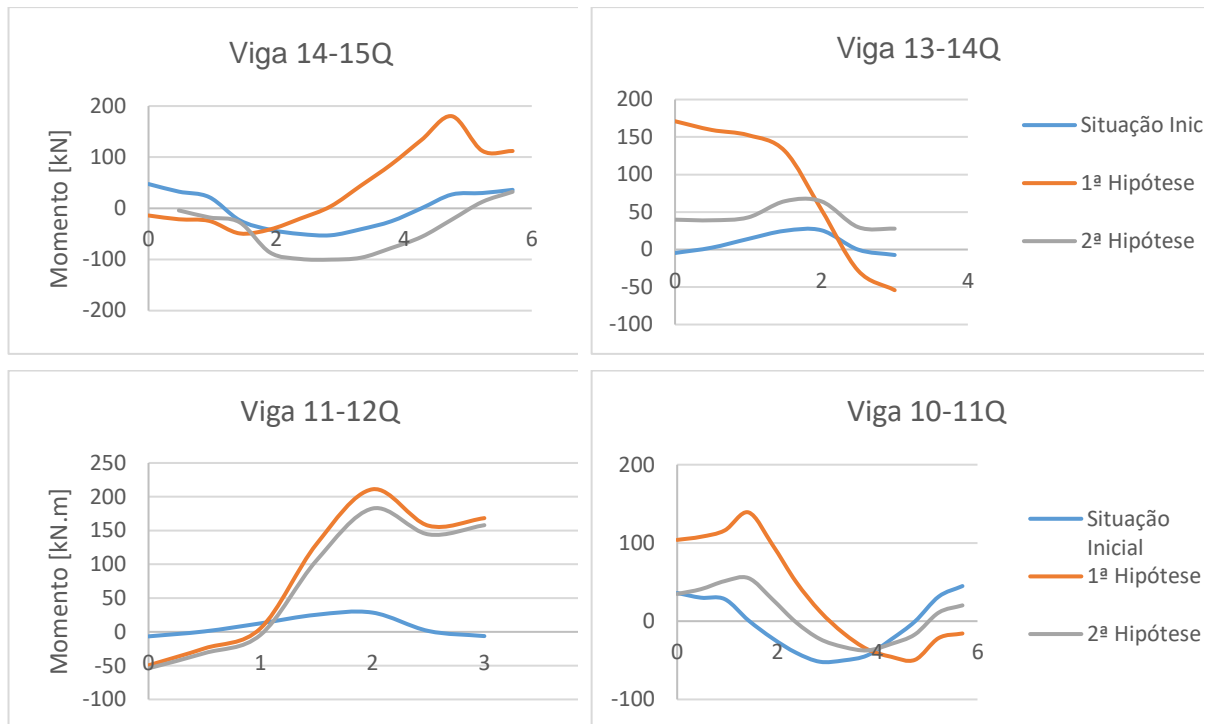


Figura 59 - Variação de momentos das vigas 14-15Q, 13-14Q, 11-12Q e 10-11Q para as duas hipóteses testadas

A opção pela segunda alternativa é a mais óbvia nesta intervenção, uma vez que se verifica menos variação de momentos nas vigas. Observa-se que nas vigas 14-15Q, 13-14Q, e 10-11Q o andamento de momentos referentes à 2ª hipótese aproxima-se da situação inicial, enquanto que para a 1ª hipótese já se verifica uma diferença com amplitude significativa entre os diagramas.

Também se pode perceber, pelos gráficos referentes às vigas 13-14Q e 11-12Q, que a colocação apenas de um aparelho na extremidade (1ª Hipótese) numa viga pequena provoca uma variação muito brusca de momentos, passando de um valor nulo para 200 kNm. Já se for possível colocar os dois aparelhos na mesma intervenção (2ª Hipótese), a variação é mais suave, cerca de 50 kNm. Para uma viga com um comprimento maior, o caso de 14-15Q e 10-11Q, este procedimento não é tão prejudicial, como se pode observar pelos gráficos referentes a essas vigas, em que se verifica que a alteração de valores dos momentos num apoio não é significativa, tendo uma amplitude de aproximadamente 50 kNm.

Conclui-se que para o mesmo deslocamento, se for possível uma intervenção uniforme, esta é mais vantajosa do que ter em conta uma sequencia baseada nos carregamentos dos pilares.

Na quinta intervenção verificou-se uma situação semelhante. A escolha dos aparelhos 11, 21 e 25 é inequívoca. A dúvida reside em relação ao apoio 22 e 23. Estudaram-se três hipóteses, a primeira consiste em incorporar o apoio número 22 e a segunda o apoio 23 e uma vez que os aparelhos se localizavam muito próximos um do outro, decidiu-se testar uma terceira hipótese em que se colocam os dois aparelhos, passando a intervenção a ser composta pela colocação de cinco aparelhos, no total. A Figura 60 resume as três hipóteses acima descritas.

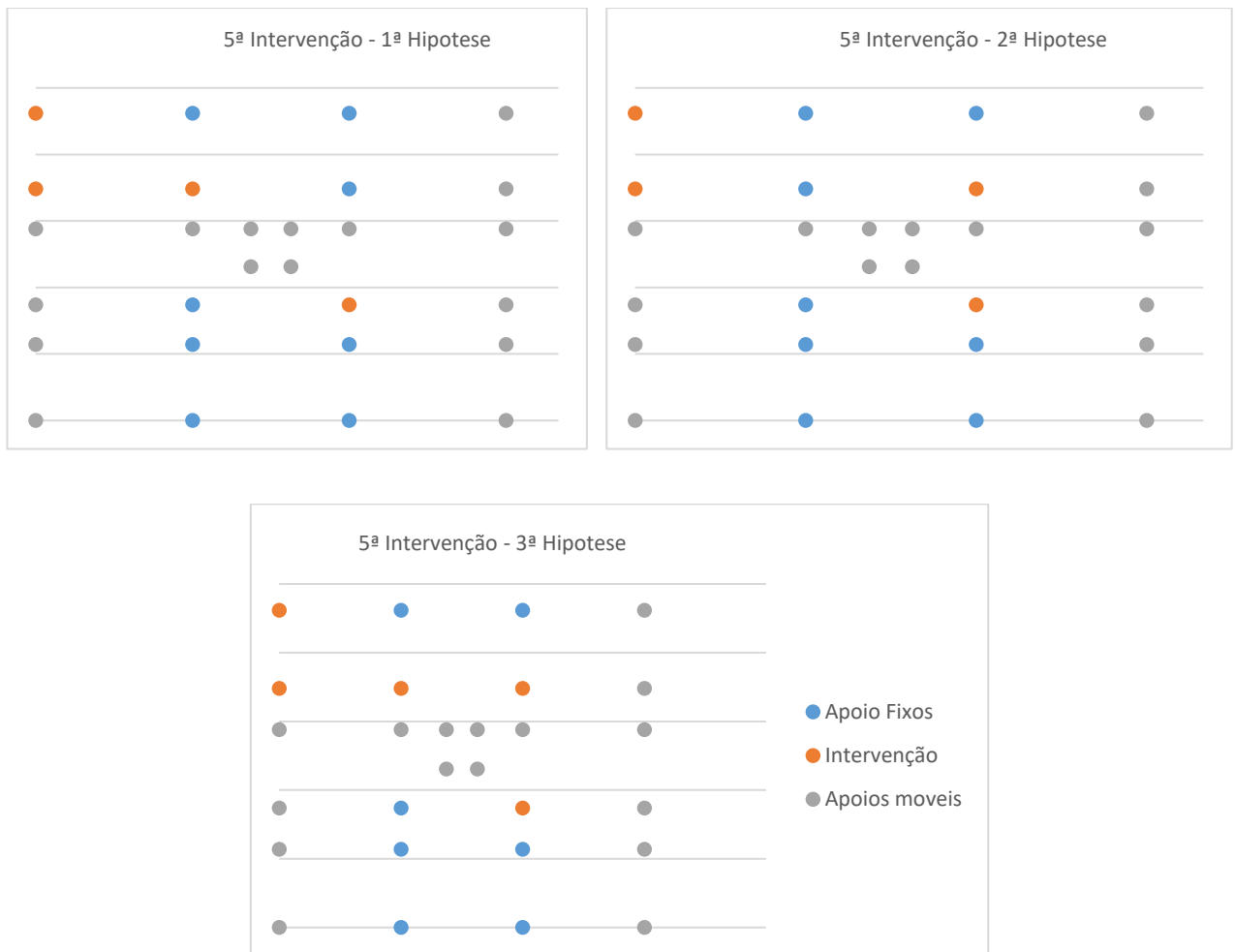


Figura 60 - Representação das 3 hipóteses testadas na 5ª intervenção

Novamente, com vista a perceber qual a alternativa mais favorável analisaram-se os diagramas de momentos nas vigas mais relevantes para as três hipóteses descritas. Começando por analisar a viga 11S-T que se encontra entre os apoios 22 e 23, Figura 61.

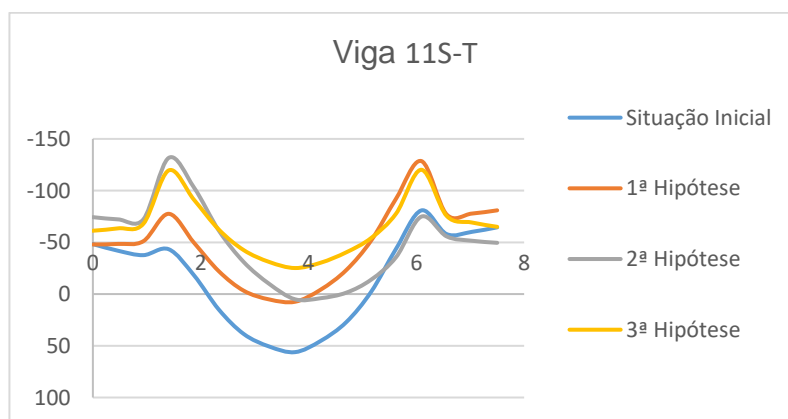


Figura 61 – Comparação dos diagramas de momentos para as 3 hipóteses da 5ª intervenção.

Verifica-se que nas primeiras duas hipóteses o resultado final é idêntico. Na primeira hipótese, como se coloca primeiro o aparelho do lado esquerdo da viga, os momentos aumentam significativamente do lado direito, enquanto que na segunda hipótese verifica-se o acontecimento simétrico. Ora, isto mostra que para qualquer uma das hipóteses as variações de momentos serão as mesmas. Na 3ª hipótese em que se colocam os dois apoios, nota-se que a variação a meio vão da viga é quase de 100 kNm. Não sendo conclusivo, procede-se ao estudo das duas vigas adjacentes a esta, a viga 11Q-S e a viga 11U-T, que se encontram representadas na Figura 62.

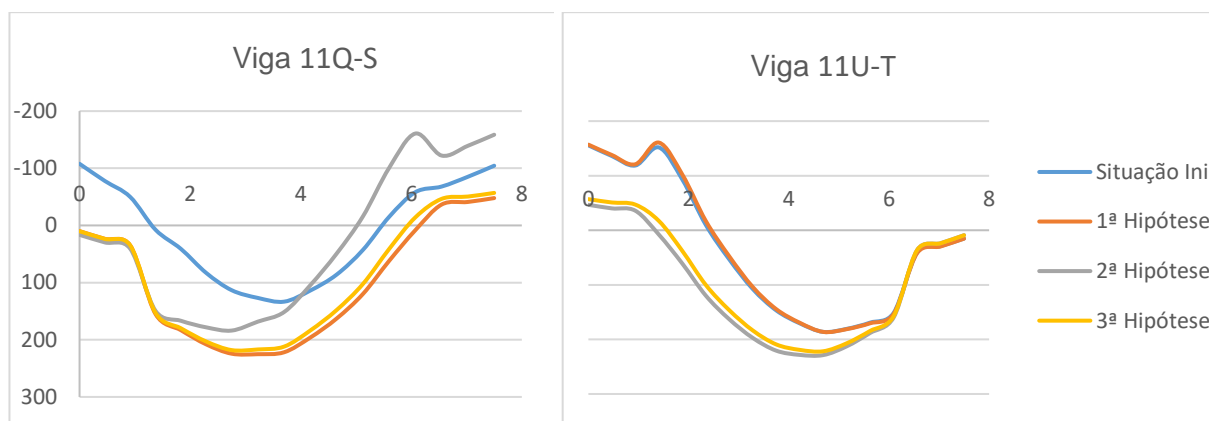


Figura 62 - Comparação dos diagramas de momentos para as 3 hipóteses da 5ª intervenção

Na viga 11Q-S, do lado esquerdo, a variação de momento é a mesma para todas as hipóteses, mas do lado direito a 2ª hipótese provoca uma maior variação de momentos, sendo que se irá optar então pela 1ª ou 3ª hipótese. Como se pode perceber, para a viga 11U-T, a 1ª hipótese é a mais favorável, pois o andamento do diagrama de momentos para a situação inicial é coincidente com o desta hipótese. Para as restantes vigas não houve nenhuma hipótese que se destacasse. Como se mostra na Figura 63, no caso das vigas 10-11S e 10-11T as hipóteses mais favoráveis são respetivamente, a 2ª e a 1ª. A 3ª hipótese nunca se revelou a mais favorável.

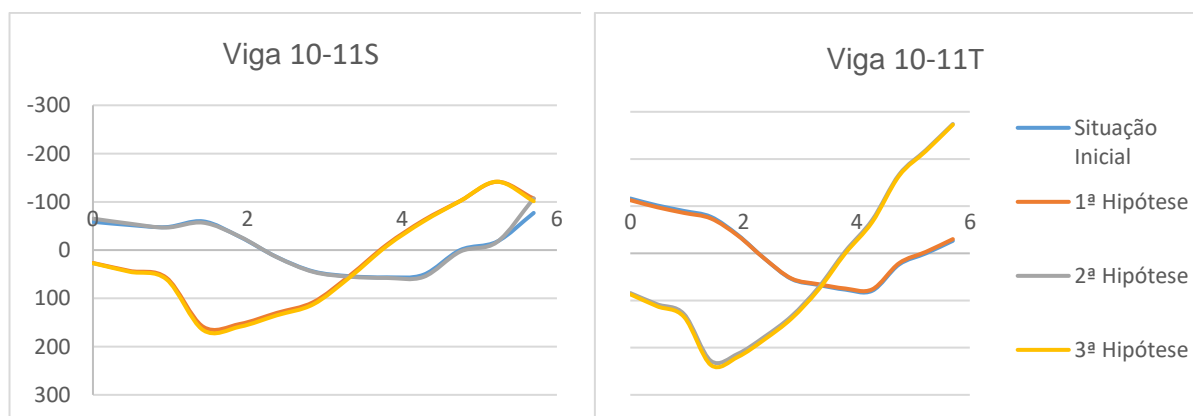


Figura 63 - Comparação dos diagramas de momentos para as 3 hipóteses da 5ª intervenção

Novamente, observa-se na Figura 64 que a colocação de apenas um aparelho numa das extremidades de vigas pequenas (viga 13-14T) é bastante prejudicial.

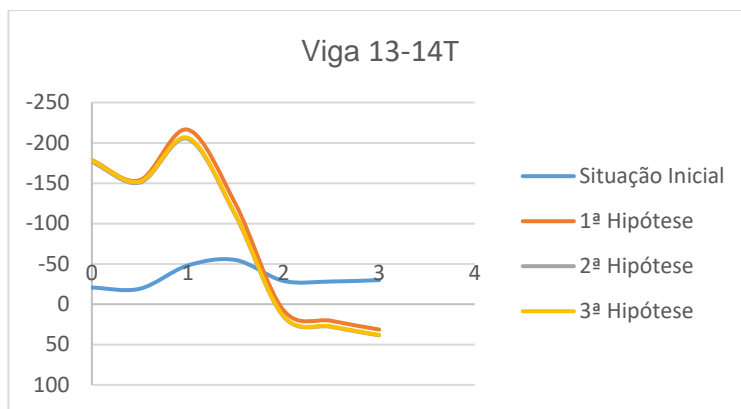


Figura 64 – Variação de momentos numa viga pequena com colocação de apenas um aparelho apenas numa das extremidades

Opta-se então pela 1ª hipótese. Conclui-se que a opção de colocar cinco aparelhos em vez de quatro não traz benefícios. Uma vez que o número de aparelhos é vinte oito, colocar cinco aparelhos tornava o esquema de montagem menos uniforme, enquanto que ao colocar quatro em cada intervenção consegue-se realizar sete intervenções, todas com o mesmo número de aparelhos. Também se pôde verificar que uma distribuição irregular provoca variações num maior número de vigas.

Na sexta intervenção colocaram-se os aparelhos de apoio número 7, 10, 23 e 26. E, por último colocaram-se os apoios 2, 3, 5 e 27.

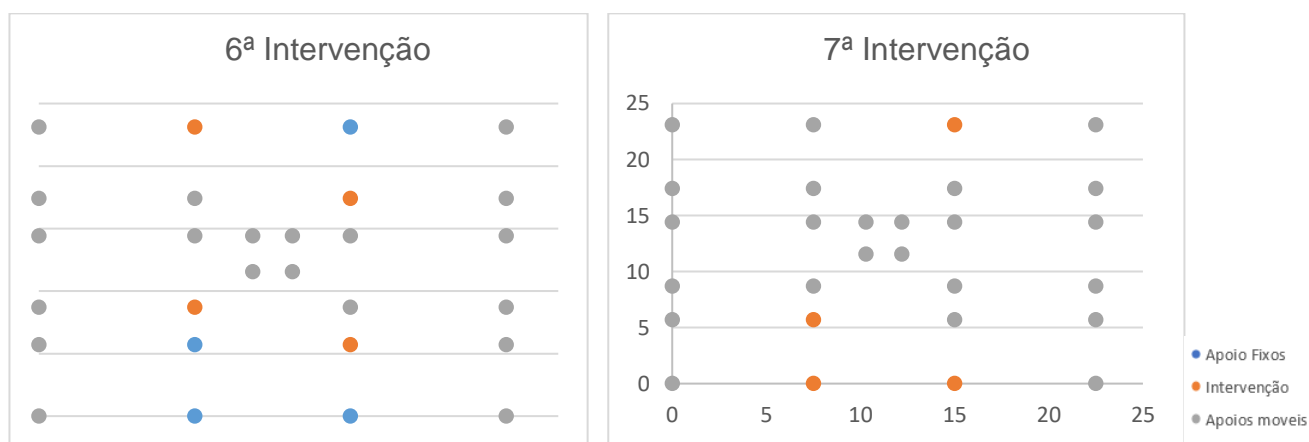


Figura 65 - Representação das últimas duas intervenções

O esquema de montagem completo é esquematizado de seguida, na Figura 66.

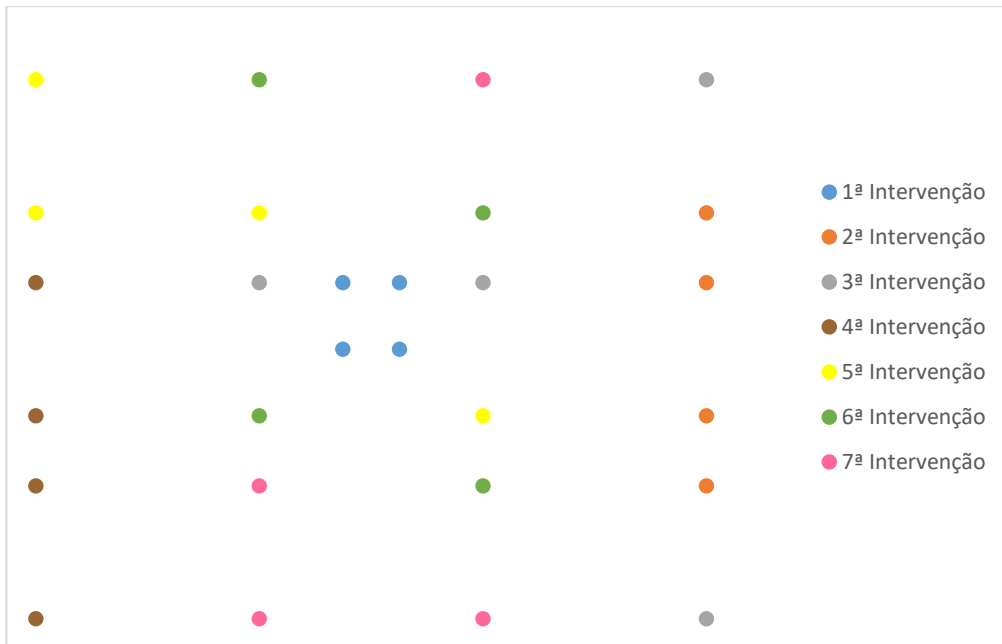


Figura 66 - Esquema de montagem

4.6 Otimização do esquema de montagem

Depois de ter sido definida uma sequência de montagem explorando as alternativas possíveis, contruiu-se uma solução baseada nas conclusões obtidos com o estudo anterior. O novo esquema de montagem foi refinado de acordo com os seguintes aspetos:

- 1) Começar por intervir no conjunto de pilares que apresentam um deslocamento vertical mais baixo no total;
- 2) Nas vigas pequenas, colocar os dois apoios na mesma intervenção;
- 3) Determinar um número adequado para a quantidade de aparelhos a serem colocados na mesma intervenção;
- 4) Procurar um esquema de montagem o mais uniforme possível, em que as intervenções sejam feitas em pilares adjacentes.

Tendo em conta as conclusões obtidas anteriormente, a solução otimizada para o esquema de montagem é a apresentada na Figura 67.

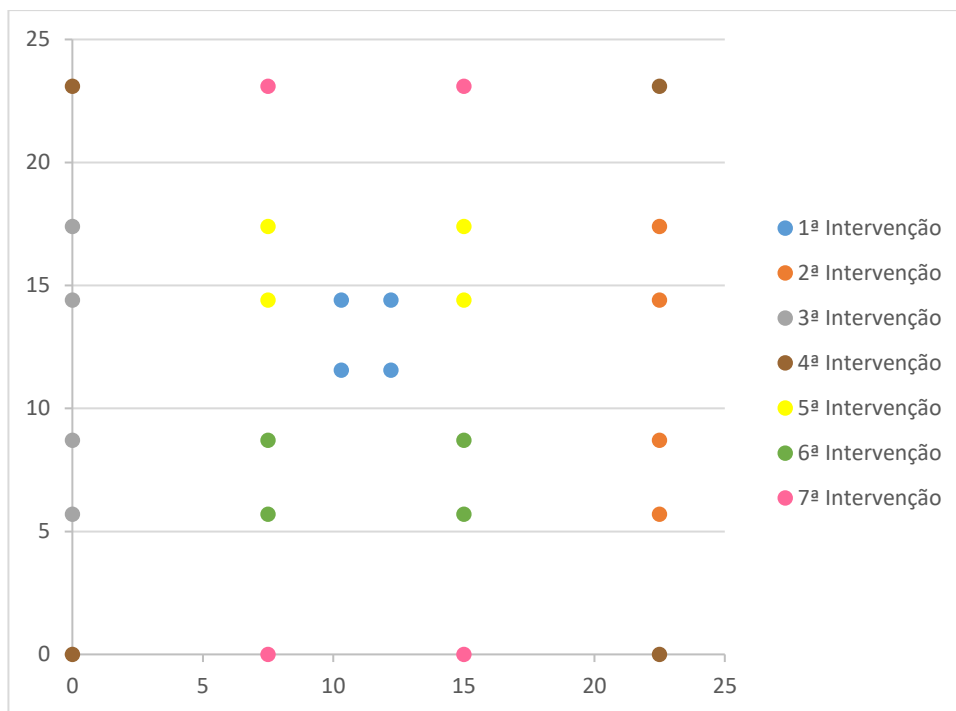


Figura 67 - Esquema de montagem otimizado

4.7 Diferenças entre os dois esquemas de montagem

Definido um esquema de montagem otimizado, compararam-se as variações de momentos que este causava nas vigas com o esquema anterior. Para melhor se entender as diferenças nos comportamentos das vigas em ambos os casos agruparam-se estas em seis conjuntos. Exemplifica-se com gráficos que mostram a variação de momentos em cada intervenção para os dois esquemas de montagem definidos anteriormente. Os valores utilizados na obtenção destes gráficos encontram-se no anexo E.

4.7.1 Vigas que melhoraram o seu comportamento no geral

Nas vigas 12-13T, 12-13Q, 10S-T, 15S-T, 14S-T verificou-se uma redução da variação de momentos e uma uniformização do andamento do diagrama de momentos. Esta melhoria deve-se essencialmente ao fato de no segundo esquema de montagem se colocarem os aparelhos nas extremidades das vigas na mesma intervenção. Em seguida, apresentam-se dois exemplos, Figura 68 e Figura 69, em que se pode observar a redução de momentos de um esquema para o outro, respetivamente para as vigas 12-13T e 10S-T.

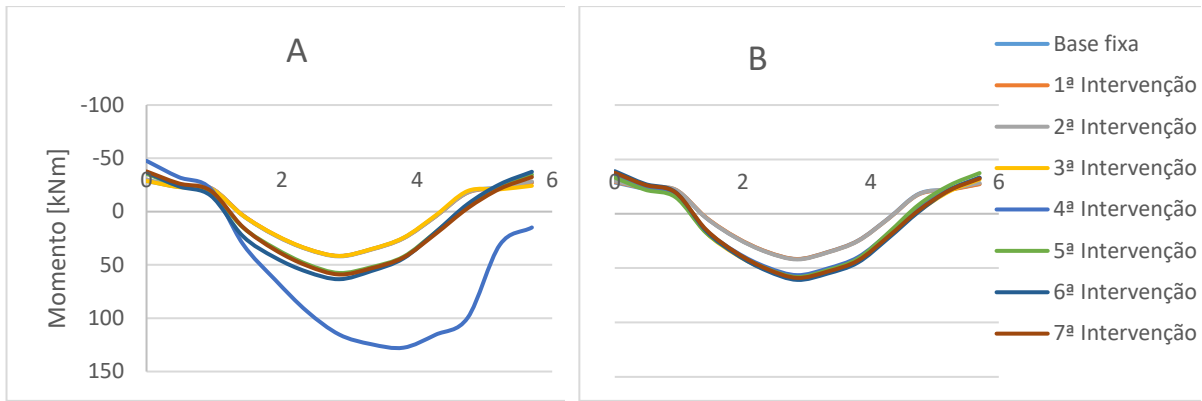


Figura 68 - Diagrama de momentos da viga 12-13Q devido ao primeiro esquema de montagem (A) e relativo ao esquema de montagem otimizado (B)

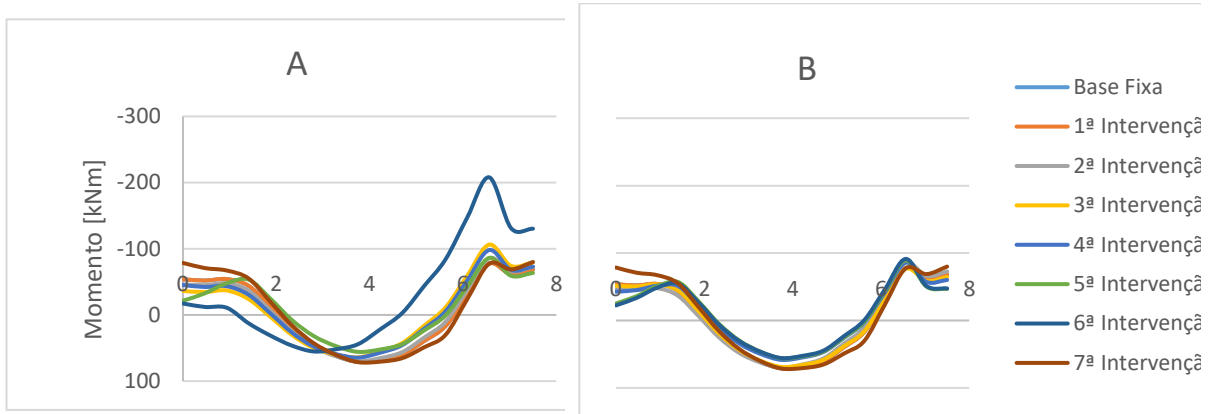


Figura 69 - Diagrama de momentos da viga 10S-T devido ao primeiro esquema de montagem (A) e relativo ao esquema de montagem otimizado (B)

4.7.2 Vigas pequenas que melhoraram

Como uma das preocupações da otimização do esquema de montagem passou por colocar sempre os dois aparelhos em vigas pequenas na mesma intervenção, verificou-se uma melhoria em todas estas vigas, deixando de haver casos em que numa das extremidades o momento aumentasse demasiado. Isto verifica-se nas vigas 11-12Q, 13-14S, 11-12S, 13-14T, 11-12T e está representado na Figura 70, para o caso s viga 13-14T.

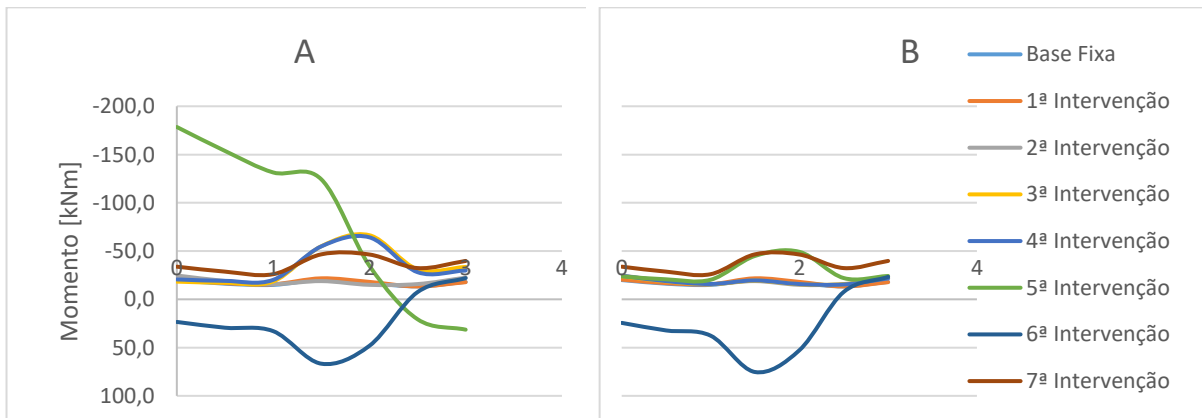


Figura 70 - Diagrama de momentos da viga 13-14T devido ao primeiro esquema de montagem (A) e relativo ao esquema de montagem otimizado (B)

4.7.3 Vigas que mantiveram a mesma variação de momentos, mas um comportamento mais uniforme

Detetaram-se algumas vigas que apresentavam a mesma amplitude na variação de momentos, mas menos variações entre intervenções, nomeadamente as vigas 11S-T, 12T-U, 13Q-S, 13S-T, 13T-U, 14T-U, 10-11S. Pode-se entender melhor este comportamento nos gráficos seguintes da Figura 71, como o caso da viga 14T-U.

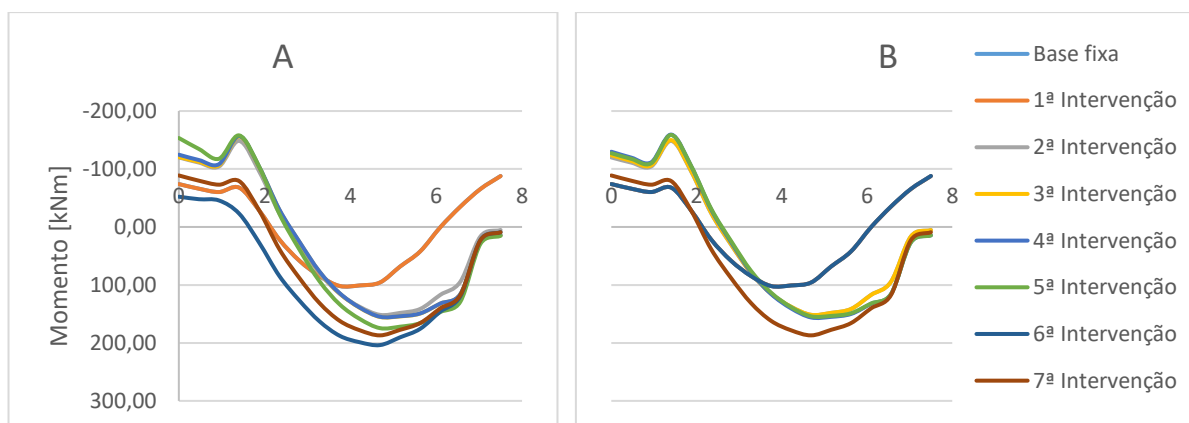


Figura 71 - Diagrama de momentos da viga 14T-U devido ao primeiro esquema de montagem (A) e relativo ao esquema de montagem otimizado (B)

4.7.4 Vigas que mantiveram o mesmo comportamento, mas alteram as variações em função da ordem das intervenções

As vigas números 14-15U, 13-14U, 11-12U, 10-11U, 10T-U, 15T-U, 11T-U, 14Q-S permaneceram com o mesmo comportamento, o que se verificou foi que a intervenção em que se dava o aumento de momento foi alterada. Esta mudança em nada influenciou os esquemas de montagem. A título de exemplo apresenta-se os gráficos da Figura 72, relativos à viga 11T-U.

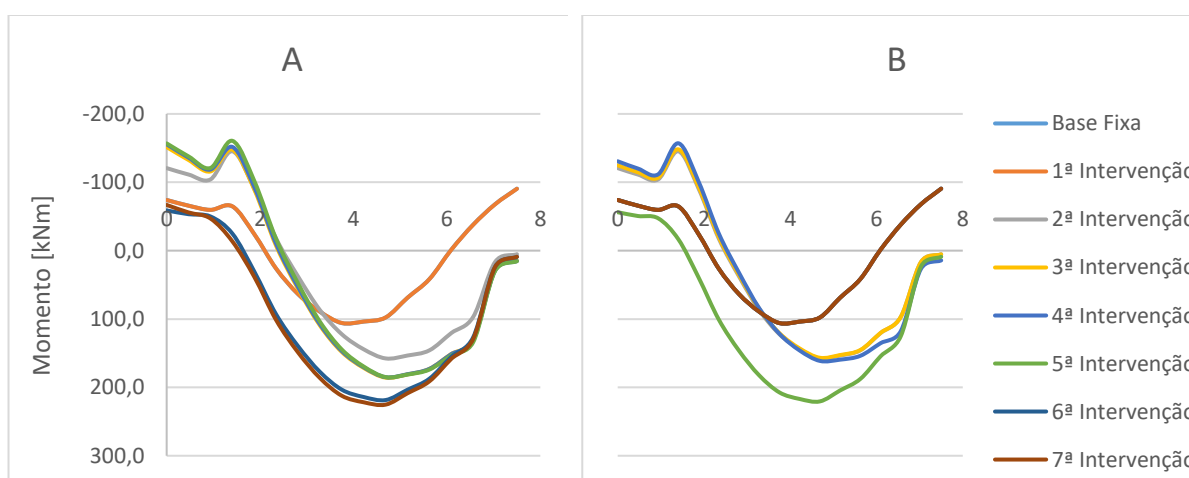


Figura 72 - Diagrama de momentos da viga 11T-U devido ao primeiro esquema de montagem (A) e relativo ao esquema de montagem otimizado (B).

4.7.5 Vigas que não sofreram alterações

Verificou-se que as vigas 12-13U, 13-14Q, 15Q-S, 12-12ASA, 12ASA-T não sofreram qualquer tipo de alteração. Note-se que estas vigas, na primeira montagem, já apresentavam um bom comportamento, como se poder observar no gráfico da Figura 73 seguinte.

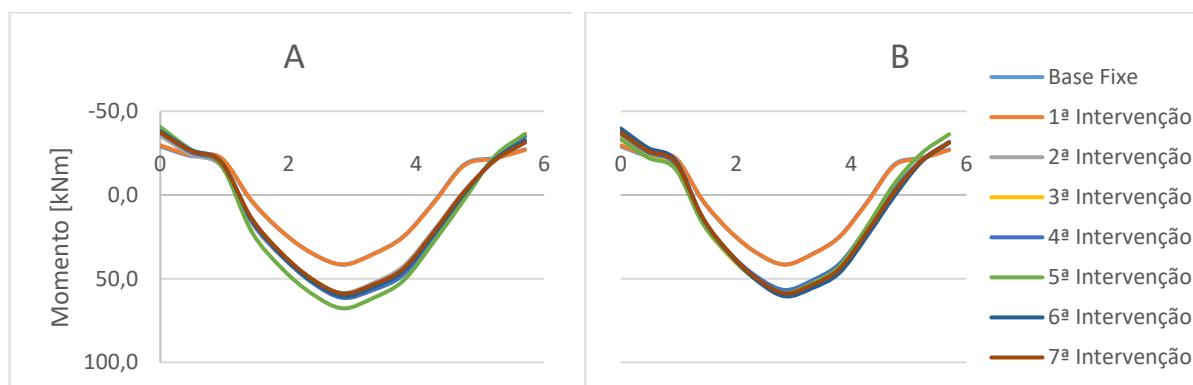


Figura 73 - Diagrama de momentos da viga 12-13U devido ao primeiro esquema de montagem (A) e relativo ao esquema de montagem otimizado (B)

4.7.6 Vigas que pioraram

Todavia, também se verificaram casos em que o comportamento piorou, isto porque a colocação dos dois apoios nas extremidades da viga era feita na mesma intervenção e agora passou-se a colocar os apoios em intervenções diferentes. Estes casos são as vigas 10Q-S, 14-15Q, 10-11Q, 11Q-S, 12Q-S, 14-1S e apresenta-se um exemplo na Figura 74.

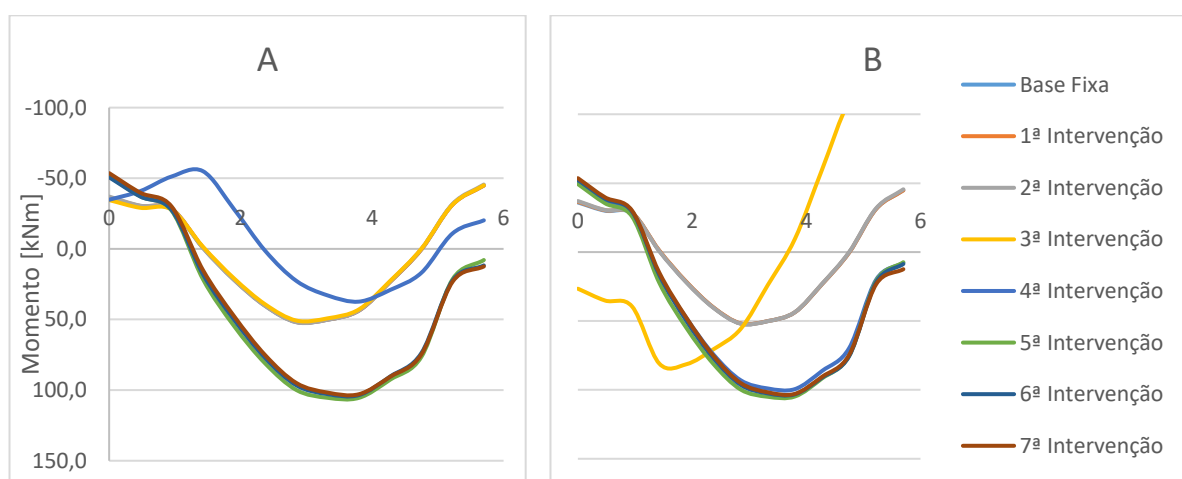


Figura 74 - Diagrama de momentos da viga 10-11Q devido ao primeiro esquema de montagem (A) e relativo ao esquema de montagem otimizado (B)

No geral, houve uma melhoria significativa, justificando-se assim o estudo do esquema de montagem. Com a otimização da sequência de montagem continua-se a verificar um comportamento padrão quando se colocam os apoios em intervenções diferentes. Relembra-se que esse padrão

consiste no seguinte: quando se coloca um apoio numa extremidade da viga os momentos aumentam na outra extremidade e quando se coloca o outro apoio voltam a estabilizar. A única maneira de evitar esse comportamento seria colocar os dois aparelhos na mesma intervenção. Isto não é possível conseguir-se em todos os casos, pois para tal, teria de se intervir no edifício todo ao mesmo tempo. Sendo este comportamento inevitável, uma sequência de montagem mais uniforme permite reduzir o número de casos em que acontece.

4.8 Análise da estrutura com isolamento de base

Concluída a inserção de todos os aparelhos de apoio, procedeu-se à análise modal da estrutura com base isolada. A sua frequência fundamental passou a ser 0,53 Hz, com o modo de vibração em x, como se pode observar na Figura 75(A), e com uma participação modal de 94%, Tabela 7. Em seguida, apresenta um modo de vibração em y, Figura 75(B), com o mesmo valor de frequência, isto porque os aparelhos apresentam rigidez igual nas duas direções. Note-se que, como primeiro modo, surge um modo de torção cuja frequência é de 0,46, mas que não tem significado na resposta da estrutura, uma vez que a sua participação modal é aproximadamente 0.

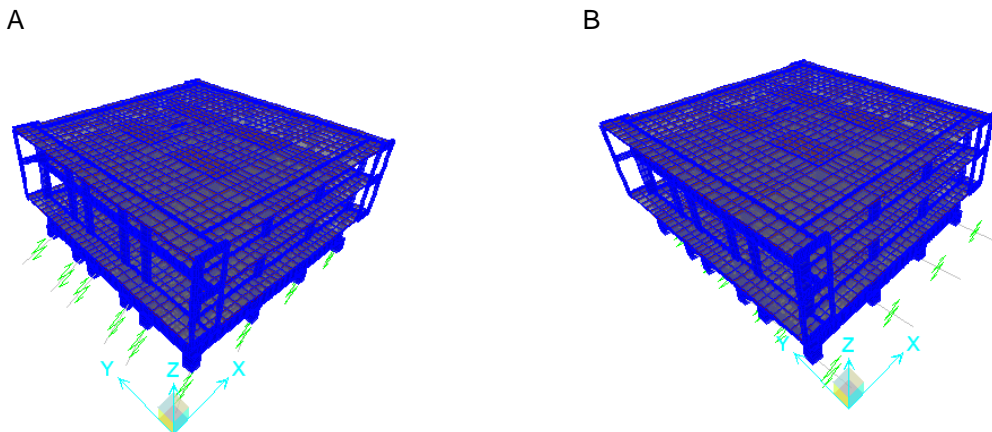


Figura 75 - Modos de vibração: segundo x (A), segundo y (B)

Tabela 7 - Resultados da análise modal da estrutura de base isolada

Modos	Frequência [Hz]	Período [s]	$\sum U_x$	$\sum U_y$
1	0,46	2,89	0,02	0,01
2	0,53	3,34	0,94	0,07
3	0,54	3,37	1,00	1,00

Relembra-se que estes primeiros modos de vibração envolvem deformação essencialmente concentrada no sistema de isolamento, sendo que o edifício permanece como um corpo rígido. Os modos seguintes não têm uma participação significativa para o movimento da estrutura, originando que a energia de vibração do solo das frequências mais altas não seja transmitida para a estrutura.

4.9 Reforço das vigas

Apesar de não se saber a capacidade resistente das vigas, pela variação de momentos que estas sofrem aquando da montagem dos aparelhos pode-se detetar quais as vigas que provavelmente necessitarão de um reforço estrutural. Em seguida apresentam-se dois exemplos de casos que se prevê necessitarem de reforço. No primeiro caso, viga 12T-U, Figura 76, para a situação inicial o momento atuante era de cerca de 100 kNm. Após a colocação do último aparelho verifica-se que o momento subiu para 250 kNm. No outro caso, referente à viga 13-14T, Figura 77, observa-se que no apoio, inicialmente o momento era de -100kNm mas após a 6ª intervenção este aumenta para um valor de -300 kNm. Pode-se consultar os valores dos momentos mais detalhadamente no anexo F.

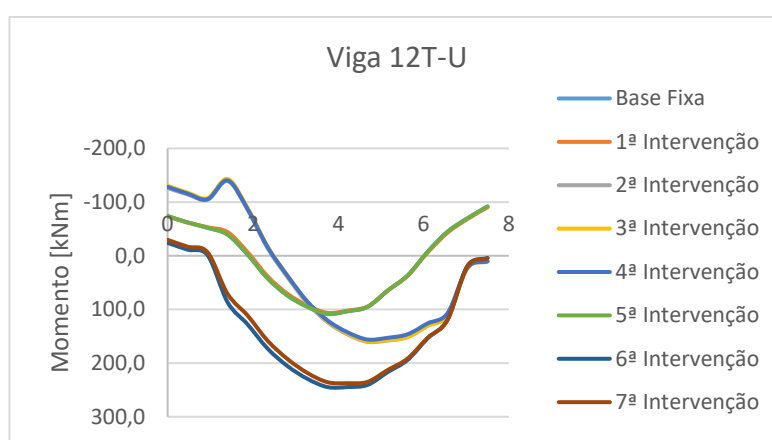


Figura 76 – Diagrama de momentos de todas as intervenções para o esquema de montagem otimizado

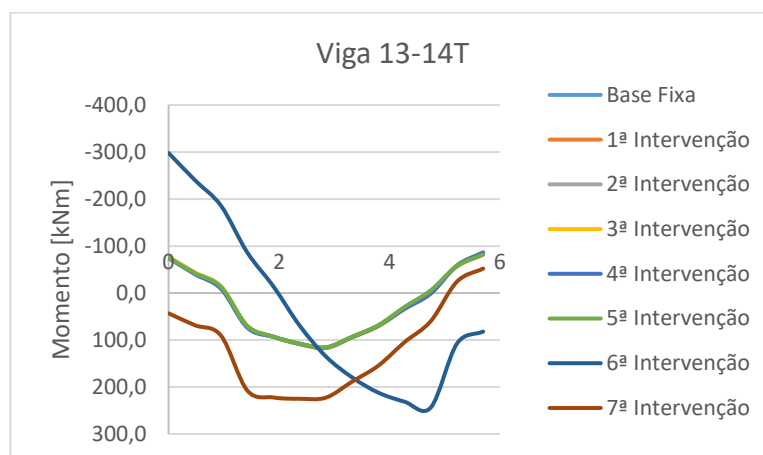


Figura 77 - Diagrama de momentos de todas as intervenções para o esquema de montagem otimizado

Observam-se situações semelhantes nas vigas números 11Q-S, 11T-U, 12T-U, 14-15S, 14-15T e 10-11T. Consta-se que na maioria dos casos a necessidade de reforço não está relacionada com a situação final, mas sim com a situação intermédia. Não sendo estes passos possíveis de evitar, pois não é viável levantar um edifício como um todo, a maneira de reduzir o número de elementos a serem reforçados passa por escolher um esquema de montagem que reduza esses efeitos.

5 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Neste capítulo apresenta-se um resumo das principais conclusões tiradas ao longo do desenvolvimento da dissertação e propostas para futuros desenvolvimentos.

5.1 Conclusões

O isolamento de base representa um importante passo na investigação de técnicas de prevenção sísmica, sendo que vários sistemas foram desenvolvidos e implementados nos últimos anos.

A aplicação do isolamento sísmico impede a transmissão da aceleração do solo às estruturas, devido à interposição de uma camada horizontal deformável. O princípio de um sistema de isolamento prende-se com o desacoplamento da estrutura das suas fundações, permitindo que a estrutura se comporte como um corpo rígido. Este processo faz com que seja possível diminuir os deslocamentos relativos entre pisos, reduzindo assim, ou mesmo eliminando, danos nos elementos estruturais e não estruturais do edifício durante um sismo. Esta medida evita o colapso e permite que os edifícios se mantenham a funcionar.

O isolamento de base também pode ser aplicado como técnica de reforço sísmico. Neste contexto, há a vantagem de aplicar esta técnica sem que seja necessário interromper o funcionamento do edifício em questão. Além disso, na reabilitação de edifícios históricos esta técnica tem a vantagem de não provocar alterações significativas a nível arquitetónico, conseguindo-se ultrapassar as dificuldades de conservação arquitetónica em regiões sísmicas.

O dimensionamento de um sistema de isolamento de base como técnica de reforço sísmico é diferente do dimensionamento para um edifício novo. Resumidamente, as etapas de dimensionamento passam por primeiro definir qual é o nível apropriado para o plano de isolamento, se ao nível de fundação, ao nível do solo ou na parte superior, inferior ou média das colunas. A escolha deste plano deve procurar vantagens como por exemplo a utilização de uma cave, que confine os trabalhos nessa área. Deve-se ter a preocupação de verificar que edifício e as suas fundações existentes têm capacidade suficiente para resistir às forças sísmicas e saber se existe espaço entre o edifício em causa e os edifícios adjacentes.

O procedimento da intervenção para implementação do sistema de isolamento de base em edifícios existentes está diretamente relacionado com o tipo de estrutura em que será feita a intervenção. Para estruturas de alvenaria a técnica mais comum passa por ir abrindo progressivamente orifícios na parede para colocar os aparelhos e ir simultaneamente construindo uma viga sobre os isoladores. A construção de uma viga de escoramento nas paredes de alvenaria tem a vantagem de posteriormente conferir resistência de tração à alvenaria, controlando a abertura de fendas. Pode-se também efetuar uma intervenção ao nível das fundações ou ao nível das colunas. Em estruturas de betão armado e estruturas metálicas a melhor localização para colocação dos aparelhos é na junção entre a base da coluna e a fundação. Para isso, é necessário cortar a coluna, criando espaço suficiente para inserir os aparelhos e depois construir uma laje por cima. Em alternativa pode-se utilizar a laje do

primeiro andar ou colocar os isoladores no topo das colunas.

De maneira a preservar a integridade estrutural durante o período de tempo entre a demolição e libertação do sistema isolador, é necessário instalar um sistema de suporte temporário responsável pela transmissão da carga vertical.

No trabalho elaborado desenvolveu-se um caso de estudo em que se elaborou uma proposta de reabilitação sísmica utilizando a técnica de isolamento de base para o Laboratório Regional de Veterinária dos Açores (LRVA). Esta proposta integra o dimensionamento do sistema de isolamento, bem como um esquema otimizado de montagem dos aparelhos.

Para o dimensionamento do sistema de isolamento, primeiro definiram-se a frequência fundamental da estrutura, o valor da rigidez horizontal e o seu deslocamento máximo. Note-se que, inicialmente, a estrutura de base fixa tinha uma frequência própria de 2,06 Hz e com a aplicação da técnica reduziu-se esta frequência cerca de $\frac{1}{4}$, passando a estrutura de base isolada a ter uma frequência própria de 0,5 Hz.

Na escolha do conjunto de aparelhos de apoio, a principal preocupação foi aproximar a soma das rigidezes de todos os aparelhos à rigidez definida para a frequência de 0,5Hz. Em seguida, estudou-se uma sequência na instalação dos aparelhos, sendo a principal preocupação a minimização da variação de esforços nos elementos estruturais existentes.

Na procura do melhor esquema de montagem para inserção dos aparelhos testaram-se várias alternativas possíveis. Primeiro começou-se por intervir nos pilares que apresentavam menor valor de deslocamento vertical. Em seguida, testaram-se as hipóteses tendo em conta o valor do esforço normal, a localização dos aparelhos, e o número de aparelhos em cada intervenção. Analisaram-se as consequências ao nível da variação de momentos nas vigas do primeiro piso, tendo-se tirado as seguintes conclusões:

- Existe um comportamento padrão quando se colocam os apoios nas extremidades das vigas em intervenções diferentes. Este comportamento traduz-se em ao colocar um apoio numa das extremidades da viga, os momentos aumentam significativamente na outra extremidade, mas ao inserir o outro apoio estes momentos tendem a voltar à situação inicial.
- A colocação apenas de um aparelho por intervenção, numa viga pequena, provoca uma variação brusca de momentos. Mas se se colocarem os dois aparelhos na mesma intervenção, a variação é mais suave. Para uma viga com um comprimento maior estas variações não são tão significativas.
- Na dúvida entre intervir num pilar com esforço mais baixo ou num pilar que torne a distribuição dos aparelhos mais uniforme a segunda alternativa revelou-se a mais satisfatória.
- Quanto maior o número de aparelhos por intervenção, mais são os elementos estruturais a sofrerem variações de esforços.
- A inserção dos aparelhos de forma irregular é a maior causa de variação de esforços.

Atendendo a estes pressupostos, procedeu-se à definição de um esquema de montagem otimizado. Com esta otimização conseguiu-se:

- Uma melhoria do comportamento em geral de algumas vigas, em que se verificou uma redução da variação de esforços e uma uniformização do andamento do diagrama de momentos.
- A eliminação de todos os casos das vigas pequenas em que em que numa das extremidades o momento aumentava drasticamente.
- Que algumas vigas apresentassem a mesma amplitude na variação de momentos, mas agora com um comportamento mais uniforme, ou seja, com menos variações entre intervenções.
- Ter vigas que mantiveram o mesmo comportamento apenas alterando a ordem das intervenções.
- Que as vigas que apresentavam um comportamento satisfatório não sofressem qualquer tipo de alteração.
- Que em alguns casos, o comportamento piorasse, isto porque no primeiro esquema de montagem, a colocação dos dois apoios nas extremidades da viga era feita na mesma intervenção e agora é feita em intervenções distintas.

De um modo geral, verificou-se uma melhoria no comportamento, pois conseguiu-se uma redução na variação de esforços no global. Contudo, em alguns casos, o comportamento padrão é incontornável, sendo necessário reforçar estas vigas, não devido à situação final, mas devido às situações intermédias da intervenção.

5.2 Desenvolvimentos Futuros

Uma vez que a fase de instalação do sistema de isolamento mostrou ter um peso bastante significativo na variação de esforços, como trabalhos futuros, seria interessante investigar uma forma de controlar as variações de esforços nesta fase. O foco do estudo devia ser o sistema de suporte provisório, em que se pretendia explorar até que ponto o dimensionamento deste seria viável de modo a conseguir controlar os assentamentos diferenciais, que ocorrem na fase em que a estrutura se encontra, simultaneamente, apoiada em apoios fixos e apoios móveis.

Referências Bibliográficas

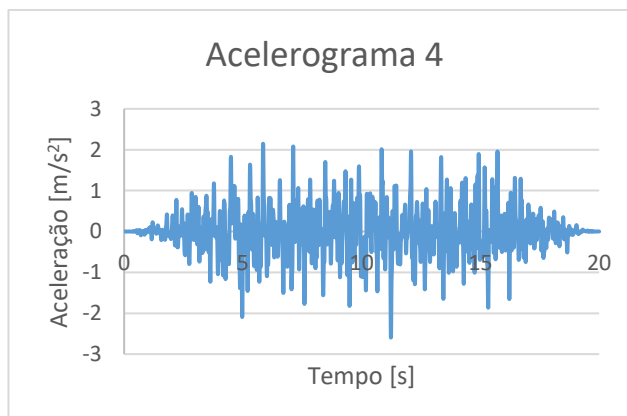
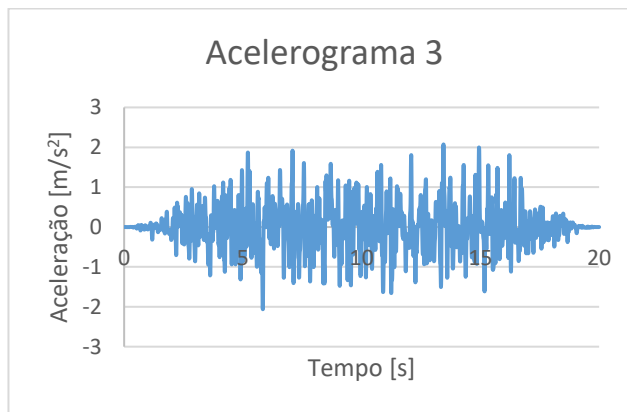
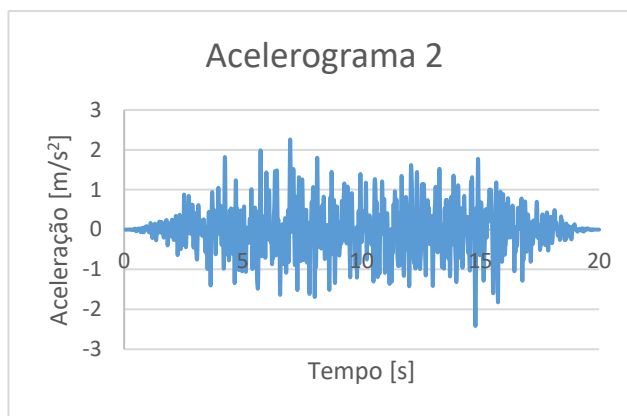
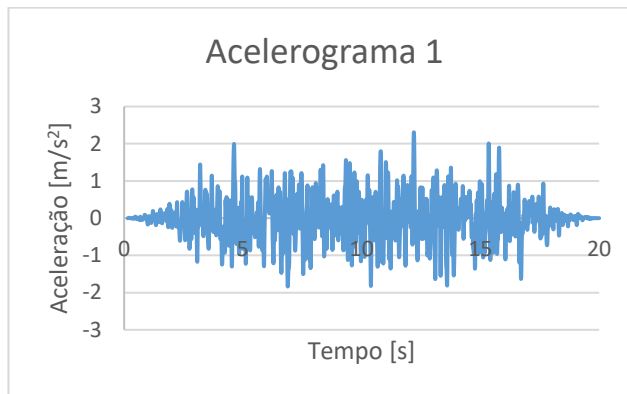
- (SPES). (Fevereiro de 2012). A segurança sísmica na reabilitação de edifícios – enquadramento e dimensão política.
- Amaral, F. (2011). *Análise da influência da componente vertical da acção sísmica na resposta de Apoios Pendulares com Atrito*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Lisboa: Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.
- CEN. (2009). *Eurocode 0 - Basis of Structural Design*.
- CEN. (2010). *Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*
- CSI. (2016). SAP2000 [software informático]. Computers & Structures, Inc.
- Barbat, A., & Bozzo, L. (1997). Seismic Analysis of Base Isolated Buildings. Em *Archives of Computational Methods in Engineering* (pp. 153 - 192). Espanha.
- Briseghella , B., Zordan , T., Romano, A., Zambianchi , L., Simone , G., & Liu, T. (2012). Lift-up and Base Isolation as a Retrofit Technique for R.C. Existing Building. *15 WCEE*. Lisboa.
- Canfield, R. (s.d.). *Robert Canfield Architectural Photography*. Obtido em Setembro de 2017, de <https://www.canfieldphoto.com/Commercial---Office---Civic/City-Hall-Seismic-Retrofit---San-Francisco-CA/11>
- Carvalho, B., Neves, D., Lopes, H., & Almeida, M. (2015). *Porque razão alguns edifícios não caem?* Porto.
- Elsesser, E., Honeck, W., & Walters, M. (1995). Seismic Retrofit of the Oakland City Hall, Oakland, California. *Structural Engineering International* (pp. 12 - 14). San Francisco: Forell/Elsesser Engineers. Inc.
- Ferraioli, M., & Mandara, A. (2017). *Base Isolation for Seismic Retrofitting of a Multiple Building Structure: Design, Construction, and Assessment*. Italy . doi:10.1155/2017/4645834
- Figueiredo, F. R. (2011). *Isolamento Sísmico de Base: Dimensionamento de Sistemas de Isolamento de Base em Edifícios*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Lisboa: Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.
- FIP Industriale. (Dezembro de 2016). Elastomeric Isolators. Italia.
- Forell / Elsesser Engineers. (s.d.). *Oakland City Hall Seismic Rehabilitation*. Obtido em Setembro de 2017, de <http://www.forell.com/projects/historic-renovation/oakland-city-hall-seismic-rehabilitation/>
- Gilani, A., & Miyamoto , H. (2012). Base Isolation Retrofit Challenges in a Historical Monumental Building in Romania. *15 WCEE*. Lisboa.
- Gonçalves, F. (6 de Junho de 2017). Certificação sísmica dos edifícios está a ser preparada e ficará pronta até final do ano. *Idealista*.
- Guerreiro, L. (2003). *A Borracha na Conceção Anti-sísmica*. Novos Materiais. FEUP.

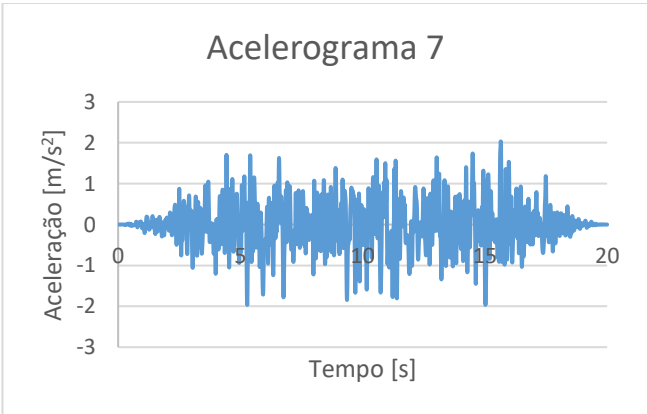
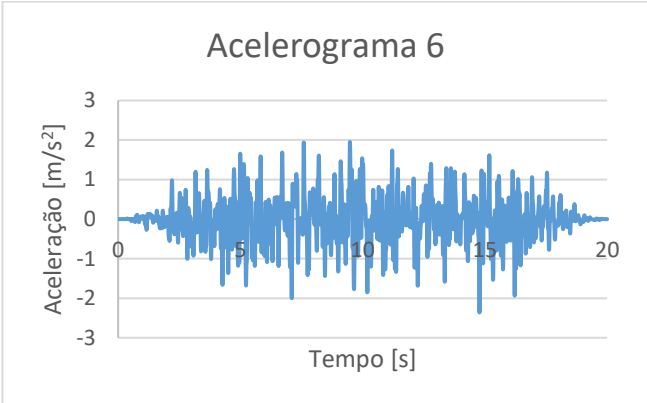
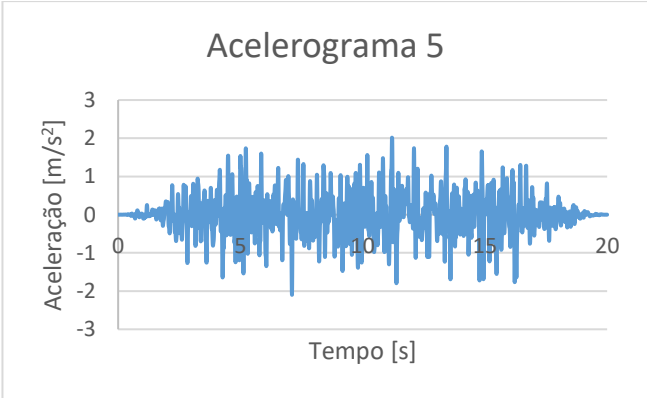
- Guerreiro, L. (2004). Isolamento Sísmico de Estruturas Análise do Panorama Actual. *SÍSMICA 2004 - 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica*, (pp. 884 - 894). Lisboa.
- Guerreiro, L. (2011). Estratégias para melhoria do comportamento sísmico de edifícios. *SEMINÁRIO - Reabilitação Sísmica de Edifícios*. Lisboa.
- Guisasola, A., & Reboredo, A. (2017). Architecture and Base Isolation. *16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017*. Chile.
- Iordachescu, A., & Iordachescu, E. (2012). Seismic Rehabilitation of Bucharest City Hall Building Through Base Isolation Method. *15 WCEE*. Lisboa.
- Johnson J. (fevereiro, 2012). Utah State Capitol Building Restoration and Seismic Base Isolation. Sessão apresentada no CSCE Regional Lecture Tour. Retirada em 1 de abril, de http://www.ucalgary.ca/EN/Civil/csce_calgary/2012/CSCE-PresentationCondensed.pdf.
- Kelly, J. M., & Konstantinidis, D. A. (2011). *Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation*. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd.
- Lanning, F., Hogg, S., & Wilkinson, G. (2017). Re-levelling & Base Isolation Retrofit of the Christchurch Art Gallery. *16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE*. Santiago, Chile.
- Martin, A. (s.d.). *Los Angeles City Hall Seismic Rehabilitation and Renovation*. Obtido em Setembro de 2017, de <http://www.acmartin.com/portfolio/los-angeles-city-hall-landmark-0>
- Matsagar, V., & Jangid, R. (2008). Base Isolation for Seismic Retrofitting of Structures. Em *PRACTICE Periodical on Structural Design and Construction* (pp. 175 - 185). Illinois.
- Mayes, R. L., & Naeim, F. (2014). *Design of Structures with Seismic Isolation.*, (pp. 723 - 756). California.
- Meireles, A. (2007). *Dimensionamento de Sistemas de Isolamento de Base em Estruturas de Edifícios de Acordo com o Eurocódigo 8*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Melkumyan, M. (2014). Seismic Isolation Retrofitting Experience in Armenia and New Structural Concept for an Existing 8 Story Reinforced Concrete Hospital Building to be Retrofitted by Base Isolation. *Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA)*.
- Melkumyan, M., Mihul, V., & Gevorgyan, E. (2011). Retrofitting by Base Isolation of Existing Buildings in Armenia and in Romania and Comparative Analysis of Innovative vs. Conventional Retrofitting. *COMPDYN 2011*. Greece.
- Mezzi, M., Cecchini, W., & Vetturini, R. (2012). Base Isolation for the Seismic Protection of Historical Buildings. *15 WCEE*. Lisboa.
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. California, Berkeley: John Wiley & Sons.
- Oliveto, G., Granata, M., Ferraro, G. & Oliveto, N. (2014). Seismic Design of New Strategic Buildings and Seismic Retrofitting of Existing Vulnerable Buildings. Sessão apresentada na Universidade da Católica.
- Oliveto, G., & Marletta, M. (Junho-Setembro de 2005). Seismic Retrofitting of Reinforced Concrete

- Buildings Using Traditional and Innovative Techniques. *ISSET Journal of Earthquake Technology*, pp. 21-46.
- Pimenta, P. (31 de Maio de 2017). Engenheiros alertam para aumento do risco sísmico nos imóveis reabilitados em Portugal. *Público*.
- Santos, J. C. (10 de Junho de 2017). Alerta vermelho para a reabilitação em Lisboa. *Expresso*.
- Sheedy Drayage Co. (s.d.). *Seismic Retrofit*. Obtido em Setembro de 2017, de <http://www.sheedycrane.com/seismic-retrofit.html>
- SPES, a. (2012). *A segurança sísmica na reabilitação de edifícios – enquadramento e dimensão política*.
- Tinman, M., Quiun, D., Muñoz, A., & Speicher, L. (2017). Seismic Protection of Buildings in Peru Using Energy Dissipation and Base Isolation. *16th World Conference on Earthquake, 16WCEE*. Santiago, Chile.
- Trombetta, P., Castellano, M., & Cocchio, D. (2014). Retrofit of Buildings on Italy Through Seismic Isolation. *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. Istanbul.
- Walters, M. (2003). The Seismic Retrofit of the Oakland City Hall. *SMIP03 Seminar Proceedings*, (pp. 149 - 164). San Francisco, California.
- Youssef, N., & Hata, O. (2005). Seismic Retrofit and Instrumentation of Los Angeles City Hall. *SMIP05 Seminar Proceedings*, (pp. 115 - 130). Los Angeles.

ANEXOS

Anexo A- Acelerogramas





Anexo B - Valores das acelerações espectrais referentes aos 7 acelerogramas para um amortecimento de 12%

Frequência [Hz]	Aceleração Espectral [m/s ²]							
	Sismo 1	Sismos 2	Sismo 3	Sismo 4	Sismos 5	Sismo 6	Sismo 7	Média
0,2	4,55E-01	2,47E-01	2,65E-01	2,39E-01	3,38E-01	2,81E-01	4,07E-01	3,19E-01
0,3	7,78E-01	5,08E-01	5,43E-01	3,21E-01	5,19E-01	3,75E-01	6,00E-01	5,21E-01
0,4	1,03E+00	5,76E-01	7,12E-01	5,64E-01	8,44E-01	8,15E-01	1,13E+00	8,11E-01
0,5	1,26E+00	9,46E-01	1,26E+00	7,55E-01	1,03E+00	9,20E-01	1,45E+00	1,09E+00
0,6	1,22E+00	1,57E+00	1,56E+00	1,12E+00	1,47E+00	1,46E+00	1,52E+00	1,42E+00
0,7	1,92E+00	1,79E+00	1,35E+00	1,88E+00	1,53E+00	1,46E+00	1,78E+00	1,67E+00
0,8	2,08E+00	2,13E+00	1,88E+00	2,02E+00	1,71E+00	1,86E+00	2,16E+00	1,98E+00
0,9	2,67E+00	2,60E+00	2,74E+00	2,64E+00	1,81E+00	2,37E+00	2,35E+00	2,45E+00
1	3,05E+00	3,04E+00	2,99E+00	3,20E+00	1,91E+00	2,74E+00	3,02E+00	2,85E+00
1,1	3,17E+00	3,59E+00	3,25E+00	3,88E+00	2,02E+00	3,23E+00	3,22E+00	3,19E+00
1,2	2,98E+00	4,22E+00	3,33E+00	4,54E+00	2,37E+00	3,46E+00	3,50E+00	3,49E+00
1,3	2,88E+00	4,82E+00	3,43E+00	4,77E+00	2,55E+00	3,85E+00	3,58E+00	3,70E+00
1,4	3,17E+00	5,32E+00	4,08E+00	5,12E+00	2,52E+00	4,47E+00	3,85E+00	4,08E+00
1,5	3,62E+00	6,12E+00	4,92E+00	5,48E+00	2,74E+00	5,22E+00	4,53E+00	4,66E+00
1,6	3,67E+00	7,03E+00	5,39E+00	6,60E+00	3,51E+00	6,35E+00	5,01E+00	5,37E+00
1,8	4,06E+00	7,59E+00	7,26E+00	8,98E+00	5,01E+00	7,34E+00	5,56E+00	6,54E+00
2	5,06E+00	8,08E+00	8,30E+00	9,57E+00	6,13E+00	8,15E+00	6,77E+00	7,44E+00
3	4,42E+00	5,01E+00	5,16E+00	6,94E+00	4,60E+00	5,47E+00	5,45E+00	5,29E+00
4	7,16E+00	7,28E+00	7,45E+00	6,81E+00	6,73E+00	6,27E+00	6,63E+00	6,90E+00
5	9,19E+00	9,16E+00	9,44E+00	8,49E+00	9,33E+00	1,13E+01	1,12E+01	9,73E+00
6	1,36E+01	1,41E+01	1,48E+01	1,21E+01	1,28E+01	1,68E+01	1,32E+01	1,39E+01
7	2,23E+01	2,19E+01	2,12E+01	1,66E+01	1,72E+01	2,65E+01	1,71E+01	2,04E+01
8	2,08E+01	2,68E+01	2,12E+01	1,83E+01	2,06E+01	2,63E+01	1,86E+01	2,18E+01
9	1,57E+01	2,07E+01	1,72E+01	1,61E+01	1,62E+01	1,99E+01	1,58E+01	1,73E+01
10	1,25E+01	1,59E+01	1,45E+01	1,35E+01	1,25E+01	1,54E+01	1,30E+01	1,39E+01
11	1,25E+01	1,34E+01	1,25E+01	1,22E+01	1,06E+01	1,30E+01	1,13E+01	1,22E+01
12	1,29E+01	1,26E+01	1,15E+01	1,10E+01	1,00E+01	1,19E+01	1,12E+01	1,16E+01
13	1,27E+01	1,23E+01	1,13E+01	1,03E+01	1,03E+01	1,26E+01	1,07E+01	1,15E+01
14	1,18E+01	1,13E+01	1,12E+01	1,06E+01	1,07E+01	1,31E+01	1,02E+01	1,13E+01
15	1,14E+01	1,02E+01	1,04E+01	1,02E+01	1,02E+01	1,27E+01	9,00E+00	1,06E+01
16	1,04E+01	9,89E+00	8,90E+00	8,88E+00	9,44E+00	1,21E+01	8,58E+00	9,74E+00
17	9,45E+00	9,51E+00	8,12E+00	8,79E+00	8,81E+00	1,17E+01	8,30E+00	9,23E+00
18	9,43E+00	9,49E+00	8,11E+00	8,78E+00	8,79E+00	1,16E+01	8,30E+00	9,22E+00
19	9,03E+00	9,06E+00	7,98E+00	8,64E+00	8,58E+00	1,16E+01	8,17E+00	9,01E+00
20	8,93E+00	8,79E+00	7,93E+00	8,58E+00	8,56E+00	1,15E+01	8,10E+00	8,91E+00
21	8,82E+00	8,64E+00	7,65E+00	8,41E+00	8,35E+00	1,11E+01	8,01E+00	8,72E+00
22	8,79E+00	8,57E+00	7,54E+00	8,35E+00	8,24E+00	1,10E+01	8,00E+00	8,64E+00
24	8,60E+00	8,35E+00	7,25E+00	8,04E+00	8,09E+00	1,06E+01	7,95E+00	8,42E+00
25	8,54E+00	8,31E+00	7,22E+00	7,96E+00	8,05E+00	1,05E+01	7,93E+00	8,36E+00

Anexo C – Excerto dos Catálogos dos aparelhos HBRD da empresa Industriale

DISPLACEMENT ± 200 mm

SI-S	V kN	F _{zd} kN	K _e kN/mm	K _v kN/mm	D _g mm	t _e mm	h mm	H mm	Z mm	W kg
SI-S 300/100	105	980	0.28	304	300	100	188	238	350	100
SI-S 350/100	250	1500	0.39	389	350	100	178	228	400	128
SI-S 400/100	590	2650	0.50	623	400	100	178	228	450	166
SI-S 450/102	900	3570	0.62	725	450	102	190	240	500	220
SI-S 500/102	1420	3970	0.77	1038	500	102	190	240	550	270
SI-S 550/105	1830	6890	0.91	1148	550	105	187	237	600	316
SI-S 600/104	2230	8750	1.09	1313	600	104	180	230	650	362
SI-S 650/108	2780	10430	1.23	1424	650	108	181	231	700	418
SI-S 700/100	3110	11370	1.54	1722	700	100	177	237	750	535
SI-S 800/100	5040	14990	2.01	2711	800	100	177	237	850	694
SI-S 900/108	6670	21220	2.36	2954	900	108	190	250	950	905
SI-S 1000/112	8390	22590	2.81	3322	1000	112	200	280	1050	1327
SI-S 1100/112	11590	27480	3.39	4577	1100	112	200	280	1150	1600
SI-S 1200/112	13570	28700	4.04	5180	1200	112	196	276	1250	1865

DISPLACEMENT ± 250 mm

SI-S	V kN	F _{zd} kN	K _e kN/mm	K _v kN/mm	D _g mm	t _e mm	h mm	H mm	Z mm	W kg
SI-S 300/128	16	750	0.22	237	300	128	230	280	350	110
SI-S 350/125	100	1200	0.31	311	350	125	213	263	400	138
SI-S 400/125	290	2120	0.40	498	400	125	213	263	450	179
SI-S 450/126	530	2890	0.51	587	450	126	226	276	500	239
SI-S 500/126	1010	4500	0.62	841	500	126	226	276	550	294
SI-S 550/126	1410	5740	0.75	957	550	126	217	267	600	338
SI-S 600/128	1820	7100	0.88	1067	600	128	213	263	650	389
SI-S 650/126	2230	8940	1.05	1220	650	126	205	255	700	440
SI-S 700/130	2740	10600	1.18	1325	700	130	216	276	750	575
SI-S 800/130	4570	14990	1.55	2086	800	130	216	276	850	747
SI-S 900/132	6940	21220	1.93	2417	900	132	222	282	950	983
SI-S 1000/140	7670	22590	2.24	2668	1000	140	236	316	1050	1402
SI-S 1100/140	10720	27480	2.72	3662	1100	140	236	316	1150	1691
SI-S 1200/144	12850	28700	3.14	4013	1200	144	236	316	1250	1979

SI-N	V kN	F _{zd} kN	K _e kN/mm	K _v kN/mm	D _g mm	t _e mm	h mm	H mm	Z mm	W kg
SI-N 300/128	35	1060	0.44	357	300	128	230	280	350	110
SI-N 350/125	200	1680	0.62	478	350	125	213	263	400	138
SI-N 400/125	590	2970	0.80	729	400	125	213	263	450	179
SI-N 450/126	1070	4040	1.01	876	450	126	226	276	500	239
SI-N 500/126	2030	6300	1.25	1209	500	126	226	276	550	294
SI-N 550/126	2830	8040	1.51	1403	550	126	217	267	600	338
SI-N 600/128	3640	9950	1.77	1587	600	128	213	263	650	389
SI-N 650/126	4460	10830	2.11	1837	650	126	205	255	700	440
SI-N 700/130	6490	11370	2.37	2013	700	130	216	276	750	575
SI-N 800/130	9080	14990	3.09	3026	800	130	216	276	850	747
SI-N 900/132	11880	21220	3.86	3582	900	132	222	282	950	983
SI-N 1000/140	15350	22590	4.49	4000	1000	140	236	316	1050	1402
SI-N 1100/140	19590	27480	5.43	5334	1100	140	236	316	1150	1691
SI-N 1200/144	21170	28700	6.28	5935	1200	144	236	316	1250	1979

Anexo D – Valores utilizados na construção dos diagramas de momentos em 4.5

Viga 215			
Comprimento da viga [m]	Momentos [kNm]		
	Situação Inicial	1ª Hipótese	2ª Hipótese
0	-47,5302	13,9927	4,0775
0,475	-32,6635	21,3639	17,7206
0,95	-21,9709	24,5611	27,1897
1,425	23,136	49,0343	86,2148
1,9	41,7911	41,2321	98,9151
2,375	50,1461	20,0922	100,2344
2,85	52,6571	-3,799	96,499
3,325	40,8068	-44,4819	77,58
3,8	25,2886	-85,8754	55,7162
4,275	-0,208	-133,932	21,8638
4,75	-27,0854	-180,119	-12,7922
5,225	-29,9301	-112,437	-32,3343
5,7	-36,1621	-112,14	-45,8815

Viga 216			
Comprimento da viga [m]	Momentos [kNm]		
	Situação Inicial	1ª Hipótese	2ª Hipótese
0	4,5973	-171,05	-39,7922
0,5	-2,4678	-159,455	-39,0124
1	-14,1579	-152,485	-42,8576
1,5	-24,9905	-131,308	-64,4544
2	-25,6381	-53,0665	-64,2045
2,5	0,0993	28,0442	-29,9005
3	7,283	54,223	-27,8172

Viga 218			
Comprimento da viga [m]	Momentos [kNm]		
	Situação Inicial	1ª Hipótese	2ª Hipótese
0	6,6651	49,5356	53,9362
0,5	-0,6529	24,4981	31,5401
1	-12,5959	-5,1645	4,519
1,5	-25,3115	-129,86	-105,6
2	-28,551	-211,023	-182,543
2,5	-1,2999	-157,158	-144,316
3	6,2619	-168,332	-157,913

Viga 219			
Comprimento da viga [m]	Momentos [kNm]		
	Situação Inicial	1ª Hipótese	2ª Hipótese
0	-36,006	-103,883	-34,7797
0,475	-30,0044	-107,865	-40,9215
0,95	-28,1769	-116,02	-51,2374
1,425	-0,9405	-139,028	-55,0447
1,9	21,7684	-97,9555	-28,0898
2,375	40,2982	-50,2248	1,4388
2,85	51,8375	-12,7273	22,7407
3,325	50,1166	15,4211	32,9792
3,8	43,6894	35,8729	37,3498
4,275	23,3109	45,5026	29,0694
4,75	0,3738	49,4155	16,9241
5,225	-31,4029	21,5718	-10,9936
5,7	-44,8807	15,7289	-20,2059

Viga 237				
Comprimento da viga [m]	Momentos [kNm]			
	Situação Inicial	1ª Hipótese	2ª Hipótese	3ª Hipótese
0	-48,3013	-47,984	-74,3516	-61,2342
0,46875	-41,8643	-48,4688	-72,2096	-63,5286
0,9375	-37,6246	-51,1509	-72,2649	-68,0202
1,40625	-43,3387	-77,5801	-131,645	-119,538
1,875	-18,1823	-49,6362	-103,041	-91,2208
2,3375	15,0536	-22,0117	-61,3054	-62,2965
2,8	38,6563	-3,1964	-30,8721	-42,425
3,275	50,7669	5,2446	-9,6908	-30,9827
3,75	56,1407	7,4165	5,0443	-25,1684
4,225	45,2939	-4,2553	4,0048	-30,3028
4,7	27,1584	-23,1864	-1,3384	-40,3616
5,1625	-2,2666	-51,775	-13,9457	-54,2197
5,625	-43,8279	-92,323	-35,7219	-77,827
6,09375	-80,8793	-128,5646	-74,886	-120,167
6,5625	-57,9874	-76,9129	-55,7605	-75,5905
7,03125	-60,1575	-77,8321	-51,547	-69,1949
7,5	-64,5248	-80,9485	-49,5308	-64,9965

Viga 236				
Comprimento da viga [m]	Momentos [kNm]			
	Situação Inicial	1ª Hipótese	2ª Hipótese	3ª Hipótese
0	-107,795	9,9371	16,4868	10,1686
0,46875	-77,748	23,4762	29,6899	23,6147
0,9375	-49,8017	34,9145	40,7922	34,96
1,40625	7,6195	155,1797	149,5787	153,0771
1,875	41,0356	183,2759	166,8082	179,9153
2,3375	83,149	208,0981	178,2687	203,1196
2,8	113,2097	224,3372	183,9003	218,069
3,275	126,8131	225,2077	168,283	216,9619
3,75	133,3341	221,8351	151,4761	211,9778
4,225	113,8486	196,0389	104,4518	183,6991
4,7	86,0174	162,9003	49,2765	147,9801
5,1625	42,8986	119,9897	-15,6998	102,4778
5,625	-15,046	61,9375	-100,718	41,1943
6,09375	-58,2461	8,2058	-160,729	-14,1929
6,5625	-68,0537	-36,5717	-122,197	-46,4596
7,03125	-85,1404	-41,0643	-139,33	-50,5428
7,5	-104,483	-47,8131	-158,72	-56,8822

Viga 238				
Comprimento da viga [m]	Momentos [kNm]			
	Situação Inicial	1ª Hipótese	2ª Hipótese	3ª Hipótese
0	-155,534	-156,8847	-46,5868	-56,9969
0,46875	-136	-137,7896	-40,08	-50,8705
0,9375	-118,664	-120,8917	-35,7704	-46,9414
1,40625	-151,745	-160,6195	7,8827	-17,1622
1,875	-93,0019	-102,1029	60,9964	37,8575
2,3375	-9,8405	-17,0144	119,7421	100,2343
2,8	53,3962	47,8783	163,1046	146,4946
3,275	107,637	103,9515	197,2993	183,5743
3,75	146,837	144,606	220,6493	209,193
4,225	170,5559	169,5117	228,4169	219,2359
4,7	186,2577	186,2954	228,7687	221,7702
5,1625	180,6969	181,244	212,7203	207,1883
5,625	169,2659	170,4287	188,189	184,4786
6,09375	151,4163	153,2792	159,8321	157,5477
6,5625	40,8945	41,931	36,3051	36,3802
7,03125	29,1589	29,7403	23,7337	23,9049
7,5	15,2259	15,3525	8,9651	9,2322

Viga 254			
Comprimento da viga [m]	Momentos [kNm]		
	Situação Inicial	1ª Hipótese	2ª Hipótese
0	-60,5699	26,6879	-65,1626
0,475	-42,7093	43,1823	-54,7723
0,95	-27,1049	57,4206	-46,6383
1,425	10,2546	158,8807	-56,7567
1,9	34,9182	153,155	-27,8681
2,375	61,1849	130,3128	14,4748
2,85	78,6632	107,8646	45,2948
3,325	72,6382	52,3326	55,2455
3,8	63,1588	2,5252	58,7502
4,275	42,0241	-61,6533	55,5969
4,75	-16,2678	-101,9939	3,0499
5,225	-38,3881	-141,6028	-16,6428
5,7	-62,7647	-183,468	-38,5917

Viga 258			
Comprimento da viga [m]	Momentos [kNm]		
	Situação Inicial	1ª Hipótese	2ª Hipótese
0	-79,6093	-112,709	84,2577
0,475	-53,7125	-97,7211	108,0056
0,95	-30,7489	-85,6663	128,8203
1,425	33,5975	-73,8375	228,1222
1,9	61,5451	-37,6228	213,0086
2,375	88,1466	11,4883	176,646
2,85	106,4443	49,0452	141,6313
3,325	100,3772	65,4174	72,474
3,8	90,375	74,454	8,835
4,275	67,9121	76,3654	-70,6355
4,75	45,9232	75,1825	-139,7691
5,225	-36,76	-3,1702	-219,074
5,7	-67,5684	-30,1191	-274,1694

Viga 256			
Comprimento da viga [m]	Momentos [kNm]		
	Situação Inicial	1ª Hipótese	2ª Hipótese
0	-19,9453	-178,5185	-176,2796
0,5	-16,2028	-153,7373	-150,6774
1	-26,3334	-216,4182	-204,8938
1,5	-20,3258	-124,3615	-109,8519
2	-16,8182	-34,8047	-17,3099
2,5	-13,3917	20,6091	28,0912
3	-18,0866	31,4347	38,6478

Anexo E – Valores utilizados na construção dos diagramas de momentos em 4.7

Comprimento da viga [m]	Momentos da viga 217 devido ao primeiro esquema de montagem [kNm]							
	Base fixa	1ª Inter.	2ª Inter.	3ª Inter.	4ª Inter.	5ª Inter.	6ª Inter.	7ª Inter.
0	-28,74	-29,38	-29,93	-28,79	-47,64	-35,52	-36,83	-37,72
0,475	-23,17	-23,69	-23,93	-23,03	-32,43	-24,30	-23,83	-26,54
0,95	-21,78	-22,17	-22,10	-21,45	-21,39	-17,25	-15,00	-19,54
1,425	3,65	3,30	3,69	3,62	30,36	14,79	23,01	14,44
1,9	22,06	21,84	22,27	21,69	63,77	34,44	43,07	35,87
2,375	35,02	34,92	35,31	34,85	93,62	49,29	56,46	50,71
2,85	41,61	41,61	41,97	41,58	115,28	57,53	63,38	58,95
3,325	35,23	35,37	35,63	35,12	124,38	52,08	55,68	53,13
3,8	24,65	24,92	25,11	24,46	127,63	42,30	43,86	43,00
4,275	4,15	4,57	4,59	3,54	115,49	19,25	19,28	20,91
4,75	-18,36	-17,81	-17,94	-19,37	99,56	-5,91	-7,11	-3,20
5,225	-22,33	-21,98	-22,71	-20,93	31,17	-23,67	-25,66	-21,41
5,7	-27,52	-27,22	-28,37	-24,22	14,85	-34,75	-37,41	-32,45

Comprimento da viga [m]	Momentos da viga 217 devido ao esquema de montagem otimizado [kNm]							
	Base fixa	1ª Inter.	2ª Inter.	3ª Inter.	4ª Inter.	5ª Inter.	6ª Inter.	7ª Inter.
0	-28,74	-29,38	-29,93	-35,811	-36,423	-33,2265	-39,153	-37,72
0,475	-23,17	-23,69	-23,93	-24,362	-25,1452	-22,1226	-27,378	-26,54
0,95	-21,78	-22,17	-22,10	-17,086	-18,0415	-15,1928	-19,776	-19,54
1,425	3,65	3,30	3,69	17,212	15,1199	17,3706	15,5917	14,44
1,9	22,06	21,84	22,27	37,725	35,3978	36,4909	37,3717	35,87
2,375	35,02	34,92	35,31	51,645	49,1593	50,5601	52,3977	50,71
2,85	41,61	41,61	41,97	59,095	56,4675	58,1039	60,7935	58,95
3,325	35,23	35,37	35,63	53,067	50,318	51,8214	54,9641	53,13
3,8	24,65	24,92	25,11	42,787	39,9312	41,2901	44,8196	43,00
4,275	4,15	4,57	4,59	21,227	18,3545	17,4777	22,4648	20,91
4,75	-18,36	-17,81	-17,94	-2,3766	-5,2524	-8,3554	-1,9088	-3,20
5,225	-22,33	-21,98	-22,71	-20,499	-22,1254	-25,9899	-21,73	-21,41
5,7	-27,52	-27,22	-28,37	-31,637	-33,1796	-37,4267	-33,263	-32,45

Comprimento da viga [m]	Momentos da viga 222 devido ao primeiro esquema de montagem [kNm]							
	Base fixa	1ª Inter.	2ª Inter.	3ª Inter.	4ª Inter.	5ª Inter.	6ª Inter.	7ª Inter.
0	-53,82	-53,92	-46,29	-36,19	-45,15	-21,43	-17,28	-78,59
0,46875	-51,94	-52,04	-45,04	-34,58	-42,26	-32,65	-12,04	-70,84
0,9375	-54,13	-54,22	-47,86	-37,03	-43,43	-47,93	-10,88	-67,16
1,40625	-43,87	-44,02	-36,62	-23,92	-30,47	-53,32	12,64	-55,13
1,875	-12,17	-12,32	-6,40	2,91	-2,18	-24,46	31,26	-19,66
2,3375	21,17	21,03	25,15	30,38	26,79	7,89	46,43	15,86
2,8	45,96	45,82	48,36	49,99	47,72	31,81	55,14	42,56
3,275	61,74	61,62	62,40	59,96	59,13	47,01	51,93	60,30
3,75	71,00	70,90	70,11	64,04	64,50	55,79	44,22	71,30
4,225	67,75	67,68	65,26	55,15	57,03	52,20	21,82	70,61
4,7	60,04	60,00	56,12	42,40	45,54	44,20	-3,01	65,22
5,1625	39,65	39,65	34,38	16,48	21,03	23,70	-43,27	49,04
5,625	16,91	16,95	10,44	-11,21	-5,40	0,85	-83,87	30,19
6,09375	-30,84	-30,69	-38,20	-59,38	-52,31	-43,01	-147,56	-24,08
6,5625	-77,78	-77,53	-85,90	-106,28	-98,11	-86,13	-208,02	-77,52
7,03125	-61,44	-61,20	-66,02	-74,06	-68,08	-59,14	-131,08	-68,83
7,5	-68,41	-68,13	-72,74	-79,32	-73,03	-63,50	-130,33	-80,01

Comprimento da viga [m]	Momentos da viga 222 devido ao esquema de montagem otimizado [kNm]							
	Base fixa	1ª Inter.	2ª Inter.	3ª Inter.	4ª Inter.	5ª Inter.	6ª Inter.	7ª Inter.
0	-53,82	-53,92	-46,29	-51,616	-42,6767	-25,2413	-22,356	-78,59
0,46875	-51,94	-52,04	-45,04	-50,54	-45,112	-36,0331	-33,524	-70,84
0,9375	-54,13	-54,22	-47,86	-53,528	-51,6124	-50,8898	-48,756	-67,16
1,40625	-43,87	-44,02	-36,62	-44,865	-51,1588	-57,2057	-54,933	-55,13
1,875	-12,17	-12,32	-6,40	-13,606	-21,8092	-28,1316	-26,419	-19,66
2,3375	21,17	21,03	25,15	19,446	10,5504	5,2256	6,3785	15,86
2,8	45,96	45,82	48,36	43,987	34,4625	30,029	30,6903	42,56
3,275	61,74	61,62	62,40	59,707	49,6319	46,2877	46,4357	60,30
3,75	71,00	70,90	70,11	68,926	58,3724	56,023	55,715	71,30
4,225	67,75	67,68	65,26	65,847	54,7351	53,2336	52,4214	70,61
4,7	60,04	60,00	56,12	58,292	46,6816	45,9346	44,6713	65,22
5,1625	39,65	39,65	34,38	38,302	25,8261	25,0304	23,2095	49,04
5,625	16,91	16,95	10,44	15,929	2,6408	1,6975	-0,6262	30,19
6,09375	-30,84	-30,69	-38,20	-30,704	-42,0362	-44,3235	-46,476	-24,08
6,5625	-77,78	-77,53	-85,90	-76,617	-85,9504	-89,4081	-91,362	-77,52
7,03125	-61,44	-61,20	-66,02	-58,576	-57,1908	-50,2362	-51,153	-68,83
7,5	-68,41	-68,13	-72,74	-64,585	-60,1371	-46,7785	-47,491	-80,01

Comprimento da viga [m]	Momentos da viga 256 devido ao primeiro esquema de montagem [kNm]							
	Base fixa	1ª Inter.	2ª Inter.	3ª Inter.	4ª Inter.	5ª Inter.	6ª Inter.	7ª Inter.
0	-19,95	-20,45	-24,70	-18,34	-20,62	-178,52	23,42	-33,84
0,5	-16,20	-16,79	-19,00	-17,18	-19,12	-153,74	29,43	-28,67
1	-14,96	-15,63	-15,80	-18,53	-20,12	-131,46	32,93	-26,01
1,5	-20,33	-21,74	-18,87	-54,95	-54,82	-124,36	66,68	-46,59
2	-16,82	-18,04	-15,02	-66,41	-64,21	-34,80	48,18	-46,43
2,5	-13,39	-13,34	-15,79	-31,01	-28,12	20,61	-7,46	-32,37
3	-18,09	-17,78	-22,47	-33,56	-29,85	31,43	-21,99	-39,77

Comprimento da viga [m]	Momentos da viga 256 devido ao esquema de montagem otimizado [kNm]							
	Base fixa	1ª Inter.	2ª Inter.	3ª Inter.	4ª Inter.	5ª Inter.	6ª Inter.	7ª Inter.
0	-19,95	-20,45	-24,70	-23,919	-24,3672	-23,7261	24,4088	-33,84
0,5	-16,20	-16,79	-19,00	-18,564	-18,879	-20,7225	32,2522	-28,67
1	-14,96	-15,63	-15,80	-15,709	-15,8908	-20,2189	37,5956	-26,01
1,5	-20,33	-21,74	-18,87	-19,43	-19,6153	-44,9375	75,3066	-46,59
2	-16,82	-18,04	-15,02	-15,66	-15,8408	-49,2272	52,8409	-46,43
2,5	-13,39	-13,34	-15,79	-15,65	-15,4013	-22,0312	-7,6696	-32,37
3	-18,09	-17,78	-22,47	-22,082	-21,6679	-24,211	-23,266	-39,77

Comprimento da viga [m]	Momentos da viga 246 devido ao primeiro esquema de montagem [kNm]							
	Base fixa	1ª Inter.	2ª Inter.	3ª Inter.	4ª Inter.	5ª Inter.	6ª Inter.	7ª Inter.
0	-74,06	-73,97	-119,97	-120,63	-124,66	-153,48	-52,24	-88,89
0,46875	-66,07	-66,00	-111,05	-112,45	-115,44	-134,50	-47,86	-79,83
0,9375	-60,28	-60,23	-104,34	-106,46	-108,42	-117,72	-45,67	-72,96
1,40625	-67,83	-67,81	-148,53	-155,84	-156,83	-158,00	-23,01	-79,10
1,875	-28,26	-28,31	-95,41	-102,66	-103,42	-103,55	27,31	-28,12
2,3375	21,73	21,59	-23,56	-29,36	-29,99	-22,59	84,64	38,36
2,8	58,50	58,29	30,81	26,27	25,72	39,19	127,08	88,35
3,275	84,84	84,63	79,92	77,62	77,14	93,92	162,96	131,48
3,75	101,94	101,74	115,25	114,78	114,34	133,62	187,78	162,00
4,225	100,89	100,76	137,78	139,56	139,18	158,78	198,92	178,22
4,7	95,84	95,76	151,62	155,19	154,86	174,52	203,80	187,00
5,1625	68,28	68,30	148,22	154,23	153,96	172,05	190,40	177,48
5,625	42,12	42,21	141,42	149,37	149,15	165,85	175,73	165,80
6,09375	0,42	0,60	117,17	132,26	132,11	146,81	145,97	140,46
6,5625	-35,20	-34,96	94,34	115,77	115,66	128,81	119,33	117,44
7,03125	-65,65	-65,48	16,27	26,30	26,30	29,01	22,52	22,71
7,5	-87,98	-87,78	5,19	14,17	14,19	15,31	8,99	9,11

Comprimento da viga [m]	Momentos da viga 246 devido ao esquema de montagem otimizado [kNm]							
	Base fixa	1ª Inter.	2ª Inter.	3ª Inter.	4ª Inter.	5ª Inter.	6ª Inter.	7ª Inter.
0	-74,06	-73,97	-119,97	-123,81	-129,837	-127,252	-78,723	-88,89
0,46875	-66,07	-66,00	-111,05	-113,98	-119,609	-117,535	-75,234	-79,83
0,9375	-60,28	-60,23	-104,34	-106,34	-111,578	-110,014	-73,943	-72,96
1,40625	-67,83	-67,81	-148,53	-149,88	-159,359	-158,686	-86,519	-79,10
1,875	-28,26	-28,31	-95,41	-96,475	-104,647	-105,044	-32,173	-28,12
2,3375	21,73	21,59	-23,56	-24,375	-30,0453	-31,385	33,2815	38,36
2,8	58,50	58,29	30,81	30,175	26,5302	24,4989	82,2386	88,35
3,275	84,84	84,63	79,92	79,458	78,241	76,0383	125,098	131,48
3,75	101,94	101,74	115,25	114,92	115,645	113,336	155,437	162,00
4,225	100,89	100,76	137,78	137,59	140,46	138,336	172,447	178,22
4,7	95,84	95,76	151,62	151,54	156,09	154,137	181,932	187,00
5,1625	68,28	68,30	148,22	148,24	155,033	153,457	173,648	177,48
5,625	42,12	42,21	141,42	141,53	150,083	148,821	162,99	165,80
6,09375	0,42	0,60	117,17	117,37	132,588	132,046	138,184	140,46
6,5625	-35,20	-34,96	94,34	94,619	115,738	115,822	115,5	117,44
7,03125	-65,65	-65,48	16,27	16,418	26,4091	26,5446	22,6153	22,71
7,5	-87,98	-87,78	5,19	5,342	14,4226	14,4878	9,5076	9,11

Comprimento da viga [m]	Momentos da viga 238 devido ao primeiro esquema de montagem [kNm]							
	Base fixa	1ª Inter.	2ª Inter.	3ª Inter.	4ª Inter.	5ª Inter.	6ª Inter.	7ª Inter.
0	-74,15	-74,02	-120,73	-151,47	-155,53	-156,88	-58,81	-66,84
0,46875	-65,79	-65,72	-111,33	-132,56	-136,00	-137,79	-53,31	-55,82
0,9375	-59,63	-59,62	-104,12	-115,85	-118,66	-120,89	-49,99	-46,99
1,40625	-64,68	-64,83	-145,35	-147,77	-151,75	-160,62	-24,98	-13,55
1,875	-24,14	-24,32	-90,74	-89,50	-93,00	-102,10	30,42	38,20
2,3375	26,47	26,23	-17,58	-6,99	-9,84	-17,01	93,19	101,57
2,8	63,64	63,37	37,74	55,74	53,40	47,88	139,76	148,84
3,275	89,39	89,15	86,94	109,46	107,64	103,95	177,34	186,32
3,75	105,98	105,77	122,28	148,25	146,84	144,61	203,37	212,23
4,225	103,79	103,65	144,29	171,53	170,56	169,51	214,11	221,81
4,7	97,79	97,72	157,67	185,73	185,09	184,96	218,54	225,23
5,1625	68,85	68,87	153,38	180,97	180,70	181,24	203,45	208,56
5,625	41,59	41,68	145,85	172,92	172,94	174,00	187,33	191,15
6,09375	-1,41	-1,25	120,57	151,07	151,42	153,28	155,26	158,27
6,5625	-38,04	-37,83	96,91	130,76	131,37	133,93	126,75	129,21
7,03125	-67,93	-67,77	16,62	28,72	29,16	29,74	23,65	23,95
7,5	-90,70	-90,50	5,21	14,74	15,23	15,35	9,17	8,98

Comprimento da viga [m]	Momentos da viga 238 devido ao esquema de montagem otimizado [kNm]							
	Base fixa	1ª Inter.	2ª Inter.	3ª Inter.	4ª Inter.	5ª Inter.	6ª Inter.	7ª Inter.
0	-74,15	-74,02	-120,73	-124,92	-130,69	-56,1797	-55,804	-66,84
0,46875	-65,79	-65,72	-111,33	-114,68	-120,045	-50,647	-49,864	-55,82
0,9375	-59,63	-59,62	-104,12	-106,64	-111,598	-47,3117	-46,122	-46,99
1,40625	-64,68	-64,83	-145,35	-148,18	-157,022	-16,6538	-15,344	-13,55
1,875	-24,14	-24,32	-90,74	-93,323	-100,927	39,2237	39,6604	38,20
2,3375	26,47	26,23	-17,58	-19,862	-25,0854	100,813	101,529	101,57
2,8	63,64	63,37	37,74	35,699	32,4031	146,328	147,363	148,84
3,275	89,39	89,15	86,94	85,198	84,2311	182,493	184,02	186,32
3,75	105,98	105,77	122,28	120,78	121,682	207,379	209,308	212,23
4,225	103,79	103,65	144,29	143,08	146,045	216,959	219,121	221,81
4,7	97,79	97,72	157,67	156,7	161,28	220,483	222,818	225,23
5,1625	68,85	68,87	153,38	152,69	159,431	204,48	206,817	208,56
5,625	41,59	41,68	145,85	145,37	153,829	187,656	189,98	191,15
6,09375	-1,41	-1,25	120,57	120,36	135,386	154,537	157,051	158,27
6,5625	-38,04	-37,83	96,91	96,923	117,777	125,148	127,862	129,21
7,03125	-67,93	-67,77	16,62	16,749	26,5849	23,1642	23,8051	23,95
7,5	-90,70	-90,50	5,21	5,3747	14,2912	8,9711	9,2245	8,98

Comprimento da viga [m]	Momentos da viga 210 devido ao primeiro esquema de montagem [kNm]							
	Base fixa	1ª Inter.	2ª Inter.	3ª Inter.	4ª Inter.	5ª Inter.	6ª Inter.	7ª Inter.
0	-28,92	-29,62	-35,39	-37,20	-37,09	-40,56	-38,06	-37,25
0,475	-23,25	-23,81	-24,23	-25,71	-25,61	-27,18	-26,83	-26,29
0,95	-21,75	-22,16	-17,24	-18,39	-18,30	-17,98	-19,77	-19,49
1,425	3,64	3,27	16,55	15,44	15,53	21,75	14,52	13,77
1,9	22,01	21,76	36,95	36,42	36,50	43,85	36,16	34,95
2,375	34,99	34,87	51,01	52,28	52,36	59,14	51,63	50,25
2,85	41,58	41,58	58,55	61,38	61,45	67,71	60,38	58,85
3,325	35,25	35,41	52,68	56,67	56,74	61,57	55,10	53,61
3,8	24,74	25,03	42,55	47,53	47,59	51,13	45,44	44,00
4,275	4,27	4,71	21,05	25,34	25,37	27,92	23,31	22,09
4,75	-18,18	-17,62	-2,48	1,01	1,02	2,81	-0,87	-1,88
5,225	-22,10	-21,70	-20,45	-22,31	-22,46	-23,04	-21,15	-20,49
5,7	-27,23	-26,84	-31,42	-34,81	-35,04	-36,47	-32,56	-31,31

Comprimento da viga [m]	Momentos da viga 210 devido ao esquema de montagem otimizado [kNm]							
	Base fixa	1ª Inter.	2ª Inter.	3ª Inter.	4ª Inter.	5ª Inter.	6ª Inter.	7ª Inter.
0	-28,92	-29,62	-35,39	-35,328	-36,5204	-33,2313	-39,705	-37,25
0,475	-23,25	-23,81	-24,23	-24,161	-25,3917	-22,264	-28,111	-26,29
0,95	-21,75	-22,16	-17,24	-17,167	-18,437	-15,4709	-20,692	-19,49
1,425	3,64	3,27	16,55	16,648	14,5858	17,0099	13,7564	13,77
1,9	22,01	21,76	36,95	37,022	34,9946	36,2386	35,5829	34,95
2,375	34,99	34,87	51,01	51,033	49,1296	50,6952	51,4445	50,25
2,85	41,58	41,58	58,55	58,53	56,7383	58,5528	60,5494	58,85
3,325	35,25	35,41	52,68	52,625	50,9947	52,6733	55,6816	53,61
3,8	24,74	25,03	42,55	42,456	40,9725	42,5015	46,4004	44,00
4,275	4,27	4,71	21,05	20,947	19,6952	18,8969	24,56	22,09
4,75	-18,18	-17,62	-2,48	-2,5874	-3,6261	-6,7374	0,616	-1,88
5,225	-22,10	-21,70	-20,45	-20,513	-20,8608	-24,9433	-19,876	-20,49
5,7	-27,23	-26,84	-31,42	-31,486	-31,6976	-36,2402	-31,109	-31,31

Comprimento da viga [m]	Momentos da viga 219 devido ao primeiro esquema de montagem [kNm]							
	Base fixa	1ª Inter.	2ª Inter.	3ª Inter.	4ª Inter.	5ª Inter.	6ª Inter.	7ª Inter.
0	-36,01	-36,48	-37,02	-34,55	-34,78	-51,42	-50,69	-53,62
0,475	-30,00	-30,39	-30,58	-29,09	-40,92	-37,16	-37,02	-39,73
0,95	-28,18	-28,47	-28,31	-27,79	-51,24	-27,08	-27,52	-30,01
1,425	-0,94	-1,19	-0,72	-1,62	-55,04	21,28	17,82	14,86
1,9	21,77	21,58	22,03	20,91	-28,09	54,57	50,12	47,63
2,375	40,30	40,16	40,50	39,32	1,44	81,18	77,35	75,31
2,85	51,84	51,75	51,98	50,78	22,74	99,96	96,65	95,01
3,325	50,12	50,07	50,14	49,17	32,98	105,45	102,85	101,76
3,8	43,69	43,68	43,60	42,85	37,35	105,46	103,49	102,90
4,275	23,31	23,34	23,09	22,66	29,07	92,60	90,34	90,54
4,75	0,37	0,44	0,03	-0,11	16,92	76,44	73,76	74,70
5,225	-31,40	-31,34	-31,83	-31,40	-10,99	21,43	22,37	23,21
5,7	-44,88	-44,81	-45,54	-45,02	-20,21	7,89	11,72	12,44

Comprimento da viga [m]	Momentos da viga 219 devido ao esquema de montagem otimizado [kNm]							
	Base fixa	1ª Inter.	2ª Inter.	3ª Inter.	4ª Inter.	5ª Inter.	6ª Inter.	7ª Inter.
0	-36,01	-36,48	-37,02	26,586	-51,3588	-49,3557	-52,31	-53,62
0,475	-30,00	-30,39	-30,58	35,158	-37,2686	-35,4417	-38,673	-39,73
0,95	-28,18	-28,47	-28,31	39,557	-27,3525	-25,7019	-29,211	-30,01
1,425	-0,94	-1,19	-0,72	80,899	16,7349	22,1937	16,5886	14,86
1,9	21,77	21,58	22,03	81,397	47,857	54,9863	49,8853	47,63
2,375	40,30	40,16	40,50	70,517	74,333	81,252	77,0481	75,31
2,85	51,84	51,75	51,98	55,804	92,9942	99,7275	96,3211	95,01
3,325	50,12	50,07	50,14	23,985	98,9787	104,996	102,553	101,76
3,8	43,69	43,68	43,60	-9,5196	99,4557	104,804	103,228	102,90
4,275	23,31	23,34	23,09	-59,701	86,3151	91,7183	91,1145	90,54
4,75	0,37	0,44	0,03	-109,17	69,7623	75,3439	75,6065	74,70
5,225	-31,40	-31,34	-31,83	-126,21	19,9227	20,806	21,7625	23,21
5,7	-44,88	-44,81	-45,54	-151,19	7,7911	7,3541	8,6363	12,44

Anexo F – Valores utilizados na construção dos diagramas de momentos em 4.9

Comprimento da viga [m]	Momentos da viga 240 [kNm]							
	Base fixa	1ª Inter.	2ª Inter.	3ª Inter.	4ª Inter.	5ª Inter.	6ª Inter.	7ª Inter.
0	-74,03	-73,27	-126,22	-130,38	-128,381	-23,3484	-24,054	-29,65
0,46875	-62,00	-62,11	-114,28	-117,76	-115,819	-15,3537	-11,403	-16,92
0,9375	-52,16	-53,14	-104,53	-107,33	-105,453	-9,5563	-0,9497	-6,38
1,40625	-39,46	-44,17	-139,31	-143,21	-140,285	61,9125	86,6252	70,99
1,875	-2,24	-6,76	-85,67	-89,21	-87,0957	105,565	127,853	111,35
2,3375	42,07	38,25	-14,13	-17,165	-16,0602	150,918	172,963	158,21
2,8	74,20	70,96	39,93	37,287	37,592	183,709	205,681	192,50
3,275	95,32	92,81	88,68	86,462	85,8504	208,718	229,495	218,55
3,75	108,30	106,37	123,75	121,87	120,517	224,964	244,722	235,59
4,225	103,30	102,09	146,46	144,96	142,584	227,284	244,665	237,47
4,7	95,19	94,56	160,50	159,29	156,073	225,263	240,655	234,99
5,1625	64,98	65,08	157,87	156,99	152,886	204,632	216,988	213,00
5,625	36,82	37,50	151,72	151,11	146,292	184,3	194,178	191,52
6,09375	-7,28	-5,93	130,65	130,36	126,054	146,663	153,916	153,12
6,5625	-44,84	-42,96	110,68	110,66	106,903	113,558	118,79	119,52
7,03125	-69,93	-68,57	22,67	22,804	22,1156	18,0454	18,5416	19,15
7,5	-91,96	-90,39	10,66	10,84	10,2731	4,4292	4,0911	4,60

Comprimento da viga [m]	Momentos da viga 255 devido ao primeiro esquema de montagem [kNm]							
	Base fixa	1ª Inter.	2ª Inter.	3ª Inter.	4ª Inter.	5ª Inter.	6ª Inter.	7ª Inter.
0	-74,80	-74,90	-76,92	-76,285	-74,2451	-89,3043	-297,93	43,23
0,475	-42,39	-42,46	-43,74	-43,238	-40,0448	-53,537	-240,31	68,47
0,95	-12,90	-12,96	-13,49	-13,125	-8,7776	-20,7027	-185,62	90,77
1,425	70,03	70,09	70,27	70,479	73,5741	62,8491	-86,415	207,33
1,9	92,85	92,98	93,25	93,357	93,3473	86,2335	-13,883	222,25
2,375	107,80	108,02	108,74	108,68	108,249	105,792	69,3983	224,97
2,85	115,67	115,97	117,06	116,86	116,176	117,645	134,975	222,60
3,325	93,06	93,45	94,74	94,427	93,7302	99,7838	179,469	188,52
3,8	68,75	69,21	70,63	70,244	69,5733	79,5083	211,959	154,53
4,275	30,01	30,54	34,32	33,596	33,5464	47,2516	231,236	104,61
4,75	-5,22	-4,63	1,42	0,3722	0,9236	17,6967	243,689	59,90
5,225	-57,32	-56,80	-58,48	-58,371	-58,3638	-46,9823	107,674	-24,14
5,7	-82,17	-81,60	-86,44	-85,907	-86,2533	-74,7469	81,9524	-52,06