

Estudo comparativo do desempenho e custo de edifícios com e sem isolamento de base - Aplicação ao novo edifício do Hospital das Forças Armadas

Diogo Miguel Patrício Alves
Academia Militar
Exército Português
Lisboa, Portugal
alves.dmp@academiamilitar.pt

Luís Manuel Coelho Guerreiro
Dep. de Engenharia Civil
Instituto Superior Técnico
Lisboa, Portugal
luis.guerreiro@tecnico.ulisboa.pt

António Carlos Rainha Perry da
Câmara
Dep. Ciências Exatas e Engenharias
Academia Militar
Lisboa, Portugal
camara.acrp@academiamilitar.pt

Resumo — No presente estudo, foi utilizado o projeto estrutural do novo edifício do Hospital das Forças Armadas (Lumiar - Lisboa), tendo sido, a partir do mesmo, desenvolvido um modelo de análise numérica tridimensional. Com esse modelo foi avaliado o desempenho do edifício, quando sujeito à ação sísmica regulamentar. Numa segunda fase, implementou-se no modelo, um Sistema de Isolamento de Base. Posteriormente, efetuou-se uma reavaliação do desempenho sísmico e comparação com a situação inicial. Simultaneamente foi realizado um balanço entre os custos adicionais e as poupanças relativas à redução de elementos estruturais e redução de armaduras no edifício devido à implementação do sistema de isolamento de base. Seguida por uma avaliação custo-benefício.

Por fim, conclui-se que a aplicação de sistemas de isolamento de base, reduz significativamente os esforços gerados na estrutura durante a ocorrência de um sismo, e que essa redução é suficiente para obter uma poupança considerável no dimensionamento dos elementos estruturais verticais, acabando por compensar grande parte dos custos de implementação do sistema.

I. CARACTERIZAÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TEMA

Os sismos são desastres naturais inevitáveis e recorrentes, caracterizados pelo seu efeito disruptivo nas sociedades, principalmente em zonas urbanas com elevada densidade populacional. O seu imenso potencial destrutivo é ainda agravado pela impossibilidade de prever com precisão a sua ocorrência. No entanto, considerando a distância a falhas tectónicas ativas e os registos sísmicos, torna-se possível estabelecer as características e a perigosidade associadas à ação sísmica, para uma determinada zona.

Nos últimos tempos, tem havido algum investimento na investigação e desenvolvimento de técnicas e regulamentos para melhorar a robustez das estruturas, por parte de países como a Itália, o Japão e a Nova Zelândia.

Ao examinar edifícios após a ocorrência de eventos sísmicos, constatou-se que, para além dos danos estruturais, sucedem-se danos significativos nos elementos não estruturais. Os danos não estruturais representam uma parcela significativa dos custos de reparação, a ponto de tornar a reparação em alguns casos, economicamente inviável [1].

O propósito do isolamento de base é prevenir a ocorrência de danos na estrutura, alongando o seu período fundamental e

absorvendo grandes deslocamentos, induzidos por movimentos sísmicos do solo, no sistema de isolamento. Essa técnica permite que o edifício tenha uma resposta estrutural controlada, com reduzidas acelerações e forças laterais transmitidas à estrutura. Além disso, o isolamento sísmico de uma estrutura contribui para a redução de danos em equipamentos, nos elementos não estruturais e no seu conteúdo [2].

Nos últimos 15 anos, ocorreram, na zona do Mediterrâneo, vários eventos sísmicos de elevada intensidade, tais como: L'Aquila, Itália, 2009; Lorca, Espanha, 2011; Van, Turquia, 2011; Bologna, Itália, 2012; Itália (Centro), 2016; Ísquia, Itália, 2017; Turquia-Síria, 2023; Marraquexe-Safim, 2023.

As catástrofes mencionadas acima, têm a si associadas prejuízos que atingem valores de 75 000 milhões, do ponto de vista económico, bem como, um grande número de desalojados que rondam valores de, aproximadamente, 1 792 000 desalojados, 110 500 feridos e 56 248 fatalidades [3].

Tendo em conta, a frequência e a gravidade das consequências resultantes destes eventos sísmicos, torna-se evidente a necessidade de se estar preparado para lidar com uma situação desta natureza e ser-se capaz de mitigar os seus efeitos na sociedade.

II. SISTEMAS DE ISOLAMENTO DE BASE

Considera-se como sistema de isolamento de base um dispositivo, ou conjunto de dispositivos, através dos quais seja possível materializar uma superfície de descontinuidade horizontal, que permita o movimento entre o solo e a estrutura, garantindo, no entanto, a transmissão das cargas verticais ao sistema de fundação. Desta forma, um sistema de isolamento deve garantir o suporte da estrutura, e, simultaneamente, apresentar uma elevada flexibilidade horizontal [4].

Um dos efeitos diretos da aplicação de um sistema de isolamento de base é o aumento da flexibilidade da estrutura, bem como, o aumento do seu nível de amortecimento. Esses aumentos resultam em uma redução significativa das acelerações, induzidas na superestrutura, o que é desejável.

O deslocamento relativo, entre pisos, num edifício de base fixa é consideravelmente superior ao seu homólogo, num edifício com isolamento de base, uma vez que a deformação dos elementos estruturais é o principal mecanismo de dissipação de energia sísmica, num edifício de base fixa. Numa estrutura isolada, os deslocamentos laterais dão-se, essencialmente, ao nível da camada de descontinuidade horizontal, nos isoladores, enquanto a superestrutura não sofre deformações significativas, apresentando um comportamento semelhante ao de um corpo rígido [4].

Podemos concluir que o aumento do período fundamental da estrutura, obtido através da implementação de um sistema de isolamento de base, resultará na redução da amplitude das acelerações horizontais, na estrutura. No entanto, esse aumento do período fundamental da estrutura, conduzirá também, a um aumento na amplitude dos deslocamentos, entre a superestrutura e o solo.

III. ANÁLISE CONSIDERADA NO ESTUDO

Tendo em conta a variedade de opções disponíveis, no que toca ao tipo de aparelhos de apoio a utilizar, selecionaram-se os apoios do tipo HDRB (Blocos de Borracha de Alto Amortecimento) devido ao seu comportamento elástico, capacidade de restituição adequada e fiabilidade, sendo que apresentam precedentes de aplicação no contexto nacional.

A. Seleção do tipo análise adequada

O método de análise utilizado para o dimensionamento de um sistema de Isolamento de Base com apoios de borracha de alto amortecimento (HDRB), pode ser um modelo de análise linear. No caso em estudo, será utilizado o método de análise modal por espectro de resposta.

B. Caracterização da Ação Sísmica

Dado que se pretende analisar sísmicamente a estrutura com Sistema de Isolamento de Base, deve executar-se uma análise elástica. Apenas nas verificações de segurança para o dimensionamento dos elementos verticais da estrutura é que se pode utilizar o coeficiente de comportamento de 1,5.

No caso em estudo, o solo onde assentam as fundações, pode ser considerado como um terreno do tipo B. Estando o edifício situado nas zonas sísmicas 1.3 e 2.3, relativas às ações sísmicas do Tipo 1 e Tipo 2, respetivamente, tendo, associadas a si, acelerações máximas de referência (a_{gr}) de 1.50 e 1.70 m/s^2 .

A tabela 1 reúne toda a informação necessária para a definição do espectro de resposta elástica dos sismos Tipo 1 e Tipo 2.

TABELA 1. PARÂMETROS UTILIZADOS NA DEFINIÇÃO DO ESPETRO DE RESPOSTA

	Zona	a_{gr} (m/s^2)	γ	a_b (m/s^2)	T_b (s)	T_c (s)	T_d (s)	S_{max}	S
Sismo 1	1.3	1.5	1.95	2.925	0.1	0.60	2	1.35	1.125
Sismo 2	2.3	1.7	1.50	2.55	0.1	0.25	2	1.35	1.169

De seguida apresenta-se o espectro de resposta elástica para as ações sísmicas Tipo 1 e 2, onde o é considerado um amortecimento de 5%.

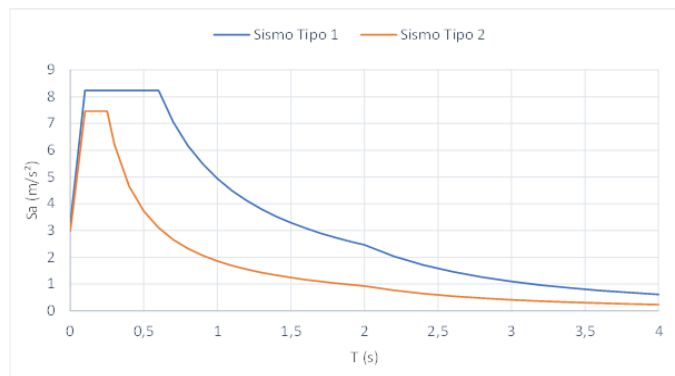


Figura 1. Espectros de Resposta Elástica para a ação sísmica Tipo 1 e 2, $\xi = 5\%$

Ao observar os espectros de resposta elásticos da figura 1, conclui-se que as acelerações induzidas na estrutura pela ação sísmica tipo 1 são iguais ou superiores às acelerações induzidas pela ação sísmica tipo 2.

Uma vez que os sistemas de isolamento de base apresentam um amortecimento entre 10% a 15% do amortecimento crítico para os períodos fundamentais, considerou-se o valor de 10%, de forma conservativa. Para a solução de Base Fixa, considerou-se um amortecimento de 5% do amortecimento crítico para períodos fundamentais.

A figura 2, apresenta o espectro de resposta elástica da ação sísmica tipo 1 para amortecimentos de 5% e 10%, bem como, o Espectro Misto adotado neste estudo.

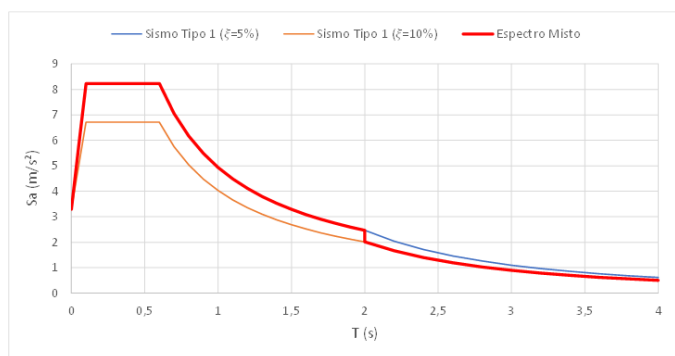


Figura 2. Espectro de Resposta Misto utilizado na Análise Sísmica para a Ação Sísmica tipo 1

Sobre o espectro de resposta considerado para a análise sísmica (figura 2), considerou-se um “espectro misto”, no qual se tiveram em conta, as acelerações do espectro de resposta determinado com um amortecimento de 5% para períodos inferiores a 2s e as acelerações do espectro de resposta determinado com um amortecimento de 10% para períodos superiores a 2s. Isto indica que a estrutura vibra de acordo com suas frequências próprias até aos dois segundos e a partir daí passa a vibrar de acordo com a frequências características do isolamento de base.

IV. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA COM ISOLAMENTO DE BASE

O modelo utilizado neste trabalho baseia-se num projeto real, o Projeto Original do edifício H05, que será construído futuramente no Hospital da Forças Armadas (HFAR), no Lumiar.

Serão apresentados os resultados do estudo da resposta deste modelo à ação sísmica regulamentar através da análise modal por espectro de resposta, no programa SAP2000.

Neste estudo, foram considerados 2 modelos. O modelo do edifício com o sistema de isolamento de base implementado, e um outro modelo auxiliar onde apenas se considera a sua superestrutura suportada por apoios fixos. Estes modelos foram elaborados, seguindo as prescrições do relatório “Estruturas e Fundações para o edifício H05 do Hospital Das Forças Armadas” [5].

Na figura seguinte, é apresentado o modelo do edifício com sistema de Isolamento de Base.

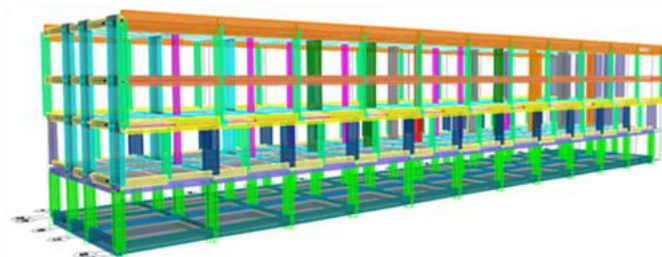


Figura 3. Modelo da Estrutura com Sistema de Isolamento de Base no Programa SAP2000

Dimensionamento dos aparelhos de apoio

Decidiu-se que a camada de descontinuidade horizontal, materializada por blocos de borracha, seria colocada na interface inferior da laje do piso 0, sobre 50 plintos idênticos com dimensões de 70x70 cm e uma altura de 4,5 metros. Estes mesmos plintos substituíram todos os elementos verticais da cave, à exceção dos muros de contenção, que não exercem influência sobre o comportamento sísmico do edifício, e por esse motivo não foram considerados no modelo.

No Software SAP2000, os blocos de borracha foram introduzidos como elementos de ligação (links) e colocados na devida posição, sendo inseridas as rigidezes adequadas.

Com base nos esforços axiais exercidos em cada apoio do edifício, devido às combinações sísmicas e à combinação fundamental do Estado Limite Último, e considerando os limites impostos pelo fabricante, foi atribuído o apoio HDRB adequado a cada um dos 50 pontos de apoio do edifício.

Nestas condições, o período efetivo da estrutura seria 2.25 segundos e a sua frequência própria seria 0,44Hz.

A presente configuração cumpria os critérios necessários para isolar a estrutura, no entanto, tratava-se de uma solução com uma rigidez lateral superior à desejável, razão pela qual se decidiu substituir os elastómeros dos apoios com maior carga vertical por apoios deslizantes, de forma a otimizar a solução. Em simultâneo, fez-se também a substituição de outros apoios de forma a manter a disposição de apoios o mais simétrica possível, em termos de rigidez.

As alterações mencionadas resultaram num período efetivo de 3,16 segundos e na frequência correspondente de, aproximadamente, 0,32 Hz.

Nesta fase, com o objetivo de otimizar a solução, do ponto de vista económico, decidiu-se avaliar a viabilidade de uma redução das secções transversais dos elementos estruturais verticais. Para atingir este objetivo foi calculada a capacidade resistente destes elementos, de acordo com o seu dimensionamento no Projeto Original (Solução de Base Fixa), e constatou-se que a sua capacidade resistente era desnecessariamente elevada, em relação aos esforços aplicados na estrutura com sistema de Isolamento Base. Assim, iniciou-se a redução das secções transversais dos elementos verticais.

Ao reduzir as secções transversais dos elementos verticais, o objetivo era também reduzir o número de tipos de secções transversais. É importante mencionar que todas as alterações nas dimensões das secções transversais foram reduções, pois qualquer aumento em uma das dimensões de uma secção poderia resultar em incompatibilidades com o projeto de arquitetura.

No projeto original existiam 10 tipos de elementos classificados como colunas e 9 tipos de elementos classificados como paredes. Após todas as alterações, passaram a existir 5 tipos de pilares e 4 tipos de paredes.

A tabela 2 resume todas as alterações efetuadas às secções transversais dos elementos estruturais verticais.

TABELA 2. RESUMO DAS REDUÇÕES DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS

Tabela-Resumo - Redução das Secções Transversais					
Designação dos Elementos	Nome da Secção	Secção (X ; Y) (m)	Designação dos Novos Elementos	Nome da Nova Secção	Secção (X ; Y) (m)
Pilar	P1	(0.60 ; 0.5)	Pilar	NP1	(0.5 ; 0.5)
Pilar	P2	(0.5 ; 0.5)			
Pilar	P3	(0.5 ; 1)	Pilar	NP2	(0.4 ; 1)
Pilar	P5	(0.4 ; 1)			
Pilar	P8	(0.6 ; 0.3)	Pilar	NP3	(0.6 ; 0.3)
Pilar	P9	(0.6 ; 0.3)			
Pilar	P10	(0.8 ; 0.3)	Parede	NPa1	(0.3 ; 2.3)
Parede	Pa2	(0.3 ; 4.65)			
Parede	Pa3n	(0.3 ; 2.5)	Parede	NPa2	(1.6 ; 0.3)
Parede	Pa3	(2.5 ; 0.3)			
Parede	Pa4	(3 ; 0.3)	Parede	NPa3	(0.3 ; 1.5)
Pilar	P6	(0.4 ; 1.6)			
Pilar	P7	(0.3 ; 1.7)	Parede		
Parede	Pa5	(0.3 ; 1.7)			
Parede	Pa8	(1.3 ; 0.3)	Parede	Pa8	(1.3 ; 0.3)
Pilar	P4	(0.7 ; 0.5)	Pilar	P4	(0.7 ; 0.5)
Todos os elementos do Piso -1			Pilar	Plinto	(0.7 ; 0.7)

Com as novas secções transversais aplicadas no modelo, a frequência alterou-se para 0,300 Hz correspondendo a um período efetivo de 3,333 segundos. No modelo da superestrutura, as novas secções transversais alteraram o período de vibração de 0,69 para 0,73 segundos e a frequência passou de 1,45 Hz para 1,37 Hz.

Nesta fase, de forma a cumprir o Eurocódigo 8 [6], tornou-se necessário reduzir o período efetivo da estrutura com Isolamento de Base para um valor mais próximo dos 3 segundos. Por esta razão, foram substituídos 2 apoios deslizantes por elastómeros, e a rigidez dos elastómeros, que ficavam nos cantos do edifício, foi aumentada. Resultando em uma frequência de 0,32 Hz e um período efetivo de 3,12 segundos.

A configuração final do esquema de suporte é apresentada na figura 4.

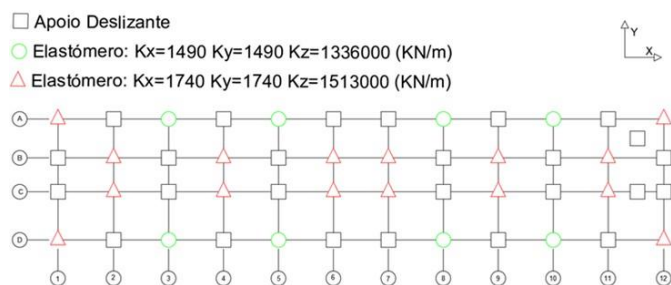


Figura 4. Esquema de Posicionamento dos Dispositivos de Apoio – Solução Final

Neste momento, a relação entre o período efetivo da solução com isolamento de base e o período fundamental da sua superestrutura é de 4,3, ou seja, 43% superior ao mínimo recomendado, garantindo assim que as acelerações horizontais induzidas pelo sismo na superestrutura são consideravelmente atenuadas.

É de salientar que, idealmente, o período de vibração da estrutura com isolamento de base não deveria, por uma questão de prudência, ultrapassar os 3 segundos, pois existem algumas incertezas, relativamente às características da ação sísmica para períodos superiores ao referido.

O período efetivo obtido (3,12 segundos) é ligeiramente superior ao recomendado. Reduzir este período passaria por aumentar a rigidez horizontal dos apoios elastoméricos, o que implicaria um aumento dos custos para obter um isolamento menos eficiente, algo que não se justifica por um desvio tão reduzido do valor recomendado (0,12 segundos).

V. ANÁLISE DE DESEMPENHO SÍSMICO DA SOLUÇÃO DE BASE ISOLADA

Para a análise sísmica comparativa, os dados relativos à Estrutura de Base Fixa foram apurados no Relatório Original do Projeto [5] e os dados da Estrutura de Base Isolada foram obtidos através de uma análise modal, bem como uma análise

de comportamento sísmico no nosso modelo usando o programa SAP2000.

As Tabelas 3 e 4 apresentam informações relevantes sobre os primeiros quatro modos de vibração da Estrutura de Base Fixa e a Estrutura com Isolamento de Base, respetivamente.

TABELA 3. PRIMEIROS 4 MODOS DE VIBRAÇÃO – SOLUÇÃO DE BASE FIXA

Modos de Vibração da Estrutura de Base Fixa								
Modos	Períodos	Frequências	UX	UY	RZ	ΣUX	ΣUY	ΣRZ
Vibração	(segundos)	(Hertz)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	0,79	1,26	0,1	70,8	36,0	0,1	70,8	36,0
2	0,65	1,53	1,1	0,1	0,8	1,2	70,9	38,8
3	0,57	1,76	62,4	0,0	0,9	63,6	70,9	37,7
4	0,48	2,07	1,2	2,6	31,2	64,8	73,5	68,9

TABELA 4. PRIMEIROS 4 MODOS DE VIBRAÇÃO – SOLUÇÃO COM ISOLAMENTO DE BASE

Modos de Vibração da Estrutura com Isolamento de Base								
Modos	Períodos	Frequências	UX	UY	RZ	ΣUX	ΣUY	ΣRZ
Vibração	(segundos)	(Hertz)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	3,13	0,32	0,3	91,9	0,1	0,3	91,9	0,1
2	3,12	0,32	91,7	0,3	0,2	92,0	92,2	0,3
3	2,85	0,35	0,2	0,0	91,2	92,2	92,2	91,5
4	0,45	2,23	0,1	0,0	0,0	92,3	92,2	91,5

Comparando os resultados das análises modais das soluções de base fixa e base isolada, constata-se que, na Solução de Base Fixa, os primeiros 4 modos mobilizam, de forma geral, apenas 65% da massa efetiva em cada direção, e que os modos seguintes têm incrementos de massa atuante relativamente reduzidos, o que dificulta a caracterização do comportamento sísmico desta solução. Na Solução com Isolamento de Base, a massa atuante mobilizada, ronda os 90%, sendo por si só, suficiente para avaliar comportamento sísmico global da estrutura.

A Tabela 5 apresenta os deslocamentos sísmicos máximos, em cada piso (representados por U_x e U_y), obtidos para uma análise elástica nos dois modelos.

TABELA 5. COMPARAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS MÁXIMOS EM ALTURA

Deslocamentos Máximos em Altura						
H	Ação Sísmica	Base Fixa	Base Isolada	Ação Sísmica	Base Fixa	Base Isolada
(m)	Aplicada	U_x (m)	U_x (m)	Aplicada	U_y (m)	U_y (m)
12,5	Sismo 1 X	0,104	0,216	Sismo 1 Y	0,168	0,216
8		0,072	0,211		0,115	0,211
4,5		0,045	0,206		0,080	0,207
0		0,015	0,201		0,038	0,201
-0,5		---	0,009		---	0,009
-4,5		0,000	---		0,000	---
-5		---	0,000		---	0,000

Relativamente aos deslocamentos em altura, a informação presente na tabela anterior permite-nos confirmar que a superestrutura da Estrutura com Isolamento de Base comporta-se, essencialmente, como um corpo rígido, o que significa que os deslocamentos relativos entre pisos são muito reduzidos e a deformação concentra-se em a camada de descontinuidade. Na

Estrutura Base Fixa, existem deslocamentos relativos em altura significativamente maiores.

De seguida, apresenta-se a tabela-resumo das forças de corte basal resultantes da combinação sísmica com as ações sísmicas tipo 1 e tipo 2, nos dois modelos, comprovando que ação tipo 1 é mais gravosa.

TABELA 6. FORÇAS DE CORTE BASAL NOS 2 MODELOS

Forças de Corte Basal na Estrutura		
Ação	Base Fixa	Base Isolada
Sísmica	(KN)	(KN)
Sismo 1, x	43040	8797
Sismo 2,x	34981	5516
Sismo 1, y	46632	8646
Sismo 2, y	40973	5355

Na tabela acima, constata-se que as forças de corte basal na Estrutura com Isolamento Sísmico são significativamente inferiores às forças de corte basal, geradas na Estrutura de Base Fixa. Isto deve-se à redução da frequência própria da estrutura, ou seja, à alteração das propriedades dinâmicas da estrutura, e em pequena parte, à dissipação de energia nos elastómeros.

No gráfico seguinte, apresentam-se os coeficientes sísmicos de cada solução, calculados anteriormente em função da massa de cada solução.

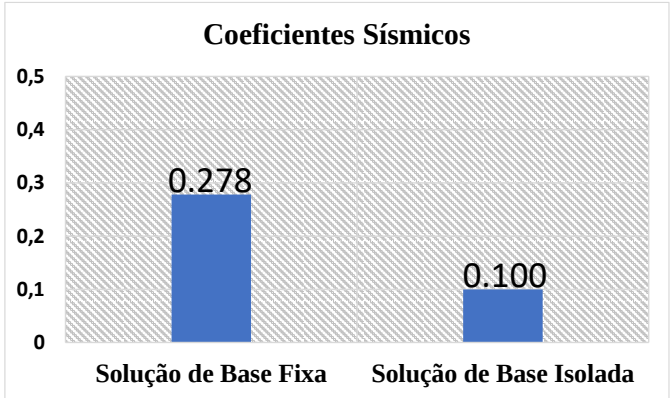


Figura 5. Coeficientes Sísmicos nos 2 Modelos

VI. AVALIAÇÃO CUSTO-BENEFICIO DA SOLUÇÃO

Com as secções redimensionadas e o sistema de isolamento sísmico configurado, foram redesenhadas as armaduras longitudinais e transversais, das paredes e pilares da Estrutura com Isolamento de Base, com base nos seus esforços atuantes.

Dado que a grande maioria dos elementos verticais foram condicionados pela Combinação Sísmica do Estado Limite Último, e que esta é consideravelmente atenuada com a aplicação do isolamento sísmico, houve uma grande redução na quantidade de reforço necessária para garantir a segurança, passando alguns elementos a necessitar apenas da armadura

mínima, que foi determinada de acordo com os parâmetros do Eurocódigo 2 [7].

Ressalva-se, que a redução de armadura tem grande impacto na capacidade resistente dos elementos, mas pouca relevância no comportamento sísmico da estrutura, dado que altera insignificamente a rigidez dos elementos.

A. Redução de Custos resultante da Implementação do Isolamento Sísmico

O próximo passo foi a contabilização da quantidade de materiais necessários em cada uma das estruturas. Com essas informações, e considerando o custo unitário de cada material, foi realizada uma estimativa da redução de custos possível devido à implantação do Sistema Base Isolado.

De seguida, apresentam-se os valores monetários associados aos materiais em questão, apurados a julho de 2023.

TABELA 7. ESTIMATIVAS DE CUSTO UNITÁRIO DOS MATERIAIS

Estimativas de Custo Unitário dos Materiais	
Material	Custo Unitário
Betão C35/45	100 € /m³
Aço A500 NR SD	1,5 € / Kg

A tabela 8, apresenta a quantidade de material poupado com a introdução de um Sistema de Isolamento de Base, e respetivos valores monetários associados, no edifício em estudo.

TABELA 8. REDUÇÃO DE CUSTOS ASSOCIADA À IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE ISOLAMENTO DE BASE

Tabela-Resumo: Poupança de Material e Valores Monetários Associados			
Solução	Quantidades		
	Betão (m³)	Aço na Armadura Longitudinal (m³)	Aço na Armadura Transversal (m³)
Base Fixa	476,00	13,80053	5,98296
Base Isolada	382,68	1,99571	1,95991
Poupança	93,32	11,8048	4,0231
Poupança Relativa	20%	86%	67%
Peso (Material Poupado)	233300 Kgs	92668 Kgs	31581 Kgs
Valor Monetário (Material Poupado)	9 332 €	139 002 €	47 372 €
Redução de Custos			195 706 €

Desde modo, a redução dos elementos estruturais verticais resultou num decréscimo de 195 706 € do custo de implementação do sistema de isolamento de base.

B. A Custo de Implementação do Sistema de Isolamento de Base

Para aferir os custos relativos à implementação do sistema de isolamento de base, devemos primeiro, contabilizar todo o material necessário para a sua concretização, incluindo o valor das juntas sísmicas, da grelha de contraventamento colocada por baixo dos isoladores, dos apoios deslizantes e dos apoios HDRB.

As tabelas 9, 10 e 11 apresentam as quantidades, custo unitário e custo total dos componentes mencionados.

TABELA 9. CUSTO DAS JUNTAS E GRELHAS DE VIGAS DE TRAVAMENTO

Custo das Juntas Sísmicas e Vigas de Travamento			
Custo das Juntas Sísmicas			
Junta Sísmica	Quantidade (m)	Custo Unitário (€)	Custo (€)
Regular	210	150	31500
Especial	10	1000	10000
Custo da Grelha de Vigas de Travamento			
Materiais			Custo (€)
Betão			24000
Aço			11000
Custo Total			76500

TABELA 10. CUSTO DOS APARELHOS DE APOIO DESLIZANTES

Aparelhos de Apoio Deslizantes			
Modelo de Apoio	Quantidade	Custo Unitário (€)	Custo Total (€)
SM 200/50	3	3200	9600
SM 300/50	1	3400	3400
SM 400/50	14	3600	50400
SM 500/50	2	3800	7600
SM 600/50	6	4000	24000
Custo Total			95000

TABELA 11. CUSTO DOS APARELHOS DE APOIO HDRB

Aparelhos de Apoio HDRB			
Modelo de Apoio	Quantidade	Custo Unitário (€)	Custo Total (€)
SI-N 600/152	8	4800	38400
SI-N 650/153	16	5000	80000
Custo Total			118400

Assim sendo, o custo total de implementação do sistema de isolamento de base situa-se nos **289 900 €**.

VII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As Infraestruturas críticas, desempenham, como o seu nome sugere, funções essenciais, das quais, a sociedade depende permanentemente. Por esse motivo, devemos procurar garantir o seu funcionamento contínuo. O Isolamento de base é uma solução eficaz na prevenção sísmica, pois além de impedir o colapso, mantém, na generalidade dos casos, a operacionalidade dos edifícios.

Ao iniciar-se o estudo, fizeram-se algumas previsões em relação aos resultados, entre elas estava a suspeita de que a combinação sísmica deixaria de ser a combinação condicionante para a grande maioria dos elementos estruturais verticais da Estrutura com Isolamento de Base. No entanto, constatou-se

que, mesmo tendo reduzido os esforços significativamente, (obtendo, de forma geral, momentos fletores máximos quatro vezes inferiores aos momentos máximos na Estrutura de Base Fixa), a combinação sísmica continuou a ser a mais gravosa para o dimensionamento das armaduras, em 66% dos elementos verticais.

Outro aspeto previsto, foi a possibilidade de armar todos os elementos estruturais verticais com a armadura mínima exigida pelo Eurocódigo 2 [7], tanto para a armadura longitudinal como para a armadura transversal. No entanto, embora se tenha verificado uma diminuição elevada no valor médio das taxas de armadura longitudinal (aproximadamente 60% nos pilares e de 81% nas paredes), apenas 30 (13%) dos 233 elementos verticais ficaram com armadura mínima longitudinal. Relativamente à armadura transversal, 198 (85%) dos 233 elementos verticais foram dimensionados com a armadura mínima transversal.

Com a realização deste estudo, aferiu-se uma poupança de 20%, relativamente às quantidades de betão utilizadas nos elementos estruturais verticais do projeto da Estrutura de Base Fixa, uma redução de 86% no que se refere às quantidades de aço da armadura longitudinal, e uma poupança de 69% no que diz respeito às quantidades de aço da armadura transversal. Com estas reduções, estimou-se um ganho monetário de, aproximadamente, 195.000,00 €, considerando o valor de mercado, em julho de 2023, dos materiais referidos. Relativamente ao custo do Sistema de Isolamento de Base dimensionado, estimou-se o seu custo total em 289.900,00 €, tendo em conta o valor de mercado, no período mencionado anteriormente. Com estes resultados, pode concluir-se que os ganhos obtidos com o aligeiramento dos elementos verticais estruturais, possibilitado pela aplicação de um sistema de isolamento de base, permitem uma redução de cerca de 67,5% dos encargos inerentes à implementação do mesmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IST-UL. “Especificações Técnicas para o Dimensionamento de Ascensores de Edifícios Hospitalares Sujeitos a Condições Sísmicas”, ET11/2020. UIE/ACSS, 11/2020.
- [2] Falacho, D., “Análise de uma infraestrutura crítica dotada de isolamento de base sujeita à ação sísmica”, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, outubro de 2022.
- [3] Varum, H., “Segurança Sísmica dos Hospitais”, Conferência na Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Portugal, 23 de outubro de 2023.
- [4] Guerreiro, L., “Isolamento Sísmico de Edifício”, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, 1997.
- [5] Pedrosa, I.; Varino, F., “Relatório com Projeto de Execução para a Construção do Edifício no Hospital das Forças Armadas”, 2016.
- [6] NP EN 1998-1: Eurocódigo 8: Projeto de estruturas para resistência aos sismos, Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios. Bruxelas: Instituto Português da Qualidade. European Committee for Standardization.
- [7] NP EN 1992-1: Eurocódigo 2: Projeto de estruturas de Betão, Parte 1-1: Regras gerais, regras para edifícios. Bruxelas: Instituto Português da Qualidade. European Committee for Standardization.