

Análise de Infraestruturas Críticas dotadas de isolamento de base sujeitas à ocorrência de ações sísmicas

Daniela Falacho; António Perry da Câmara

Academia Militar
Lisboa, Portugal

falacho.dc@exercito.pt; aperry@pcaengenharia.pt

Luís Guerreiro

DECivil, IST-UL
Lisboa, Portugal

luis.guerreiro@tecnico.ulisboa.pt

Resumo — A aplicação de sistemas de isolamento de base é um tipo de tecnologia que permite salvar inúmeras vidas com a redução dos danos de uma estrutura, garantindo a sua operacionalidade quando sujeita a ações sísmicas. O isolamento de base consiste em separar a estrutura do solo, através da aplicação de aparelhos que separam o movimento horizontal da estrutura do movimento sísmico.

Pretende-se com este trabalho explorar a aplicação de sistemas de isolamento de base que possa ser utilizada em estruturas consideradas importantes, neste caso o Hospital das Forças Armadas, localizado no Lumiar, Lisboa.

Para este estudo foi elaborado um modelo de base fixa e com base isolada, sendo que foram analisados dois tipos de sistemas de isolamento: com apoios elastoméricos e apoios pendulares com atrito. Os modelos permitiram prever o desempenho da estrutura a partir da análise de resultados dos esforços de corte basal, dos deslocamentos entre pisos e acelerações

Palavras-chave - Isolamento de base, ação sísmica, análise dinâmica, apoios elastoméricos, apoios pendulares com atrito

I. INTRODUÇÃO

Em resposta aos danos causados por ações acidentais extremas como os sismos, ocorridos em áreas densamente povoadas, o dimensionamento de edifícios, pontes e instalações industriais têm evoluído tendo como objetivo conseguir um melhor desempenho sísmico. A fim de mitigar os efeitos da ação sísmica em estruturas, muitas soluções foram desenvolvidas, sendo o isolamento de base a abordagem mais popular para o dimensionamento de sistemas de proteção sísmica [1].

Ao nível de Portugal Continental verifica-se que as maiores concentrações de epicentros são nas regiões do Vale do Tejo, de Évora, e no Sul Algarvio, que são zonas do país que estão mais expostas devido não só aos sismos inter-placas mas também à presença de falhas ativas que atravessam a região do Algarve [2].

O Eurocódigo 8 (EC8 – norma portuguesa NP EN1998) considera o território nacional dividido em zonas com idêntico grau de sismicidade. O EC8 define dois tipos de ação sísmica: “Ação Sísmica tipo 1, consequência de sismos afastados (interplacas), e Ação Sísmica tipo 2, consequência de sismos próximos (intraplacas)” [3].

Portugal é caracterizado por algumas regiões de sismicidade elevada e apesar de o comportamento de edifícios isolados tenha vindo a confirmar a eficácia da aplicação do isolamento de base, o país ainda não adotou esta técnica como prática regular de proteção sísmica. Ainda que o custo adicional deste sistema possa ser a maior causa para a sua reduzida aplicação, é importante salientar que a proteção do equipamento no interior

da estrutura compensa o investimento nestes sistemas que oferecem níveis de segurança elevados.

II. ISOLAMENTO DE BASE

O isolamento de base faz parte dos sistemas passivos de proteção sísmica e consiste em “desligar parcialmente a estrutura da sua fundação”, isto é, criar uma superfície de descontinuidade com “interposição de uma camada com baixa rigidez horizontal entre a estrutura e o solo de fundação” [4]. A estrutura tornar-se-á menos vulnerável aos movimentos horizontais do solo, para que haja proteção do edifício, mas também do seu conteúdo e ocupantes [4].

A. Características essenciais

A interposição de uma camada deformável na base da estrutura tem como consequência a redução da aceleração. Isto deve-se ao facto de aumentar o período próprio de vibração da estrutura.[5].

Na Figura 1 pode-se observar o espetro de resposta elástica horizontal de acelerações e deslocamentos, representado conforme o EC8. Trata-se de uma representação esquemática das alterações consequentes da redução da frequência própria para níveis de amortecimento de 2, 5 e 10%. Os sistemas de isolamento sísmico adotam níveis de amortecimento superiores a 10%, de forma a limitar os deslocamentos horizontais para valores admissíveis. Os deslocamentos máximos condicionam principalmente o custo dos isoladores, o dimensionamento de juntas estruturais e ligações [6]

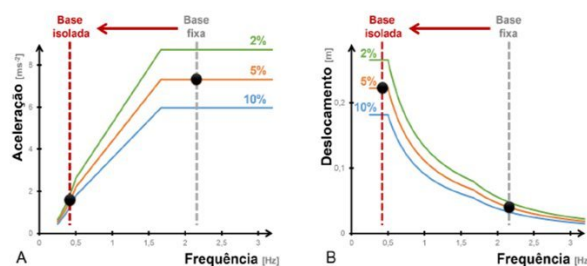


Figura 1- Espectro de resposta elástica horizontal de acelerações (A) e deslocamentos (B) [3].

B. Sistema de isolamento Vs. Construção Convencional

As construções convencionais que são o caso de estruturas não isoladas, ou seja, estruturas de base fixa, apresentam, como se pode ver na Figura 2, frequências no intervalo onde ocorre a ação sísmica. Neste intervalo as acelerações da estrutura vão aumentar em cada piso, consequência das vibrações amplificadas neste intervalo, que originam deslocamentos e

esforços entre pisos responsáveis por danificar elementos estruturais e não estruturais dos edifícios [5].



Figura 2- Intervalos de frequências próprias de estruturas com e sem isolamento [7].

As técnicas mais convencionais de proteção sísmica procuram o aumento global da rigidez e resistência com elementos estruturais. No entanto, 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 [7].

As estruturas com isolamento apresentam redução da frequência própria da estrutura, e conseqüentemente a diminuição das acelerações provocadas pelo sismo. Em conseqüência dos fatores apresentados anteriormente, os deslocamentos horizontais aumentam, sendo suportados pelo sistema de isolamento e não pela estrutura. Desta forma reduz-se a força transmitida à estrutura [8].

Em comparação com as estruturas convencionais, a frequência fundamental de uma estrutura, com a aplicação de isolamento, está fora do intervalo onde as ações sísmicas têm maior conteúdo energético.

O principal objetivo deste sistema a nível da função estrutura é conservar a operacionalidade da estrutura durante e após a ação sísmica, reduzindo deformações e o conseqüente dano em elementos estruturais ou não estruturais, assim com garantir a segurança dos seus ocupantes.

C. Tipos de Sistemas de Isolamento

Os aparelhos mais usados atualmente são os aparelhos elastoméricos e os aparelhos pendulares com atrito, que podem ter associação com dispositivos que permitem dissipar energia.

Os blocos de borracha de alto amortecimento (HDRB - High Damping Rubber Bearing) pertencem ao grupo de apoios elastoméricos e são constituídos por camadas de borracha, que conferem maior capacidade de dissipação de energia, exibindo uma rigidez variável, intercaladas com placas de aço. Têm capacidade de se deformar através da alteração da sua forma, mas conseguindo manter praticamente todo o seu volume. Estes tipos de apoios têm chapas de aço na sua constituição que se revela um material com uma importância relevante na obtenção de uma rigidez vertical elevada conseguida através da restrição lateral das camadas; esta restrição também é responsável por uma maior rigidez de distorção. A deformação lateral do aparelho não depende das chapas de aço, deste modo o apoio elastomérico permite conferir à base da estrutura a baixa rigidez horizontal pretendida [9].

Os apoios de borracha com núcleo de chumbo (LRB- Lead Rubber Bearing) são constituídos por camadas finas de elastómetro (usualmente borracha) interpostas por chapas de aço, colocadas na direção horizontal. Nestes apoios é inserido

um núcleo cilíndrico de chumbo. A borracha tem flexibilidade horizontal, capaz de assegurar os deslocamentos induzidos na estrutura. Deste modo, o amortecimento necessário para o sistema de isolamento sísmico é obtido através da combinação destas propriedades inerentes da borracha com a dissipação de energia assegurada pelo núcleo de chumbo [8].

Os apoios pendulares (FPB-Friction Pendulum Bearing) fazem parte do grupo dos apoios deslizantes e são compostos por duas peças deslizantes, uma extremidade articulada que desliza sobre uma superfície esférica côncava [10]. Quando a estrutura é sujeita a uma ação sísmica ocorre o deslocamento relativo das duas peças que promovem movimentos pendulares de pequena amplitude por parte da estrutura. O movimento nos apoios FPB é condicionado pela sua geometria. O raio de curvatura r_c da superfície côncava condiciona o período de oscilação T da estrutura, uma vez o comprimento equivalente do braço do pêndulo depende do r_c [3].

Na Figura 3 apresentam-se os referidos sistemas de isolamento mais populares



Figura 3 - Exemplos de isolamentos sísmicos. [11]

III. MÉTODOS DE ANÁLISE DO EDIFÍCIO

No sistema de isolamento com comportamento não linear é necessário recorrer à análise no domínio do tempo. Quando for utilizado um sistema de isolamento do tipo pendular com atrito (FPS), este deverá ser o método a aplicar. Se o sistema de isolamento tiver um comportamento que possa ser modelado através de um modelo linear equivalente é possível utilizar-se a análise modal ou mesmo um modelo estático equivalente, 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 [9].

O EC8 exige uma maior fiabilidade para os sistemas de isolamento ao majorar, com um valor recomendado de $\gamma_x=1.2$, os deslocamentos sísmicos de cada unidade. Este fator deve ser utilizado na verificação da segurança no estado limite último (ELU), nomeadamente na verificação da resistência do sistema de isolamento, considerando a possibilidade de rotura por instabilidade dos isoladores.

A consideração do comportamento não linear de estruturas deve-se aos materiais usualmente utilizados, que apenas para valores baixos de tensões apresentam comportamento linear e dada as características dos carregamentos dinâmicos, ocorrem deformações no domínio plástico e conseqüentemente há necessidade de estabelecer teorias de comportamento fisicamente não linear.

IV. CASO DE ESTUDO

A. Descrição do Edifício

Neste caso de estudo foram adotadas as características de uma futura instalação a construir no Hospital das Forças

Armadas (HFAR), o qual será construído nos terrenos da atual Base Aérea do Lumiar, em Lisboa.

O futuro edifício no HFAR com uma configuração retangular em planta, terá uma área de implantação de 1 365 m², 3 pisos acima do solo e uma cave, perfazendo uma área de construção total de 6 040 m². O piso -1 destina-se ao estacionamento automóvel, encontrando-se enterrado, os restantes pisos destinam-se a zonas de serviço e quartos.

B. Modelação do Edifício

A modelação do futuro edifício hospitalar foi realizada com recurso ao programa de cálculo estrutural SAP2000, foram feitos dois modelos do edifício, um de base fixa e um com isolamento de base. A solução apresentada é ligeiramente diferente do original, sendo que não foi considerado o piso como enterrado nem os seus muros de contenção, por não apresentarem relevância para a análise sísmica horizontal. Como o objetivo final desta modelação é realizar a análise dinâmica do edifício de forma a perceber se é possível aplicar o isolamento de base, também foram feitas algumas alterações internas a nível estrutural, visto que com o isolamento de base não é necessário a quantidade de paredes resistentes que a planta original tinha, o edifício foi modelado apenas com as paredes e os pilares relevantes para a sua conceção.

As paredes foram modeladas com um troço rígido ao nível dos pisos, este elemento, viga rígida, serve para representar a rigidez das várias paredes e a ligação das sapatas à estrutura. Para o elemento rígido foi definido um material com base no tipo C35/45, mas com o módulo de elasticidade mil vezes superior, que será aplicado apenas a elementos de comportamento semelhante a peças rígidas, para garantir a compatibilização dos deslocamentos sem alterar a flexibilidade das mesmas.

No modelo de base fixa os apoios foram considerados com restrições nas translações, mas com rotações livres segundo os eixos x, y e z.

C. Frequências Próprias e Modos de Vibração

Depois de elaborada a modelação do edifício foi realizada a análise modal da estrutura, com o objetivo de caracterizar os modos de vibração com maior relevância. Para cada modo de vibração da estrutura, existe uma frequência associada, correspondente à frequência própria do modo de vibração. Cada modo de vibração está relacionado com um período de vibração que é definido como o tempo necessário para uma oscilação completa na respetiva direção. Para analisar melhor cada modo de vibração recorreu-se também aos fatores de participação de massa para ver a influência do modo em cada direção.

A Tabela 1 mostra os resultados da análise modal da estrutura de base fixa de onde resultaram as frequências de vibração, períodos e o somatório da participação modal segundo os respetivos modos de vibração.

No primeiro modo o movimento é descrito pela translação na direção Y. A percentagem de massa atuante é de 68.57% nesta direção, associado a percentagens altas de massa, a frequência toma valores baixos, neste caso 0.99Hz. O segundo modo é caracterizado pela translação no eixo X, a percentagem atuante de massa é de 73.5%, com uma frequência de 1.15Hz. O movimento nas outras direções é nulo, em ambos os modos apresentados. O modo 3 é descrito por uma frequência de 1.49Hz e o seu movimento ocorre segundo o eixo Z. A

participação de massa associada não é significativa, sendo que no eixo Y a sua participação não é nula, manifestando algum movimento.

Tabela 1 - Períodos e Frequência própria, fatores de participação modal para o edifício de base fixa

Modos	Período [s]	Frequência [Hz]	ΣU_x (%)	ΣU_y (%)
1	1.02	0.99	0.02	68.54
2	0.87	1.15	73.50	68.56
3	0.67	1.49	73.51	71.41
4	0.32	3.09	82.13	71.42
5	0.30	3.33	82.14	72.98
6	0.29	3.46	82.14	75.79
7	0.28	3.51	82.14	81.40
8	0.27	3.72	82.14	81.83
9	0.26	3.86	82.15	81.85
10	0.24	4.10	82.15	82.00
		Σ	82.17	82.06

V. ANÁLISE ESTRUTURAL

A modelação da estrutura com isolamento de base mantém-se igual à estrutura de base fixa, com a diferença que no caso do isolamento de base os aparelhos de apoio são colocados abaixo das vigas de fundação. Estes aparelhos foram considerados no programa SAP2000 como elementos lineares (springs) e colocados 50 cm abaixo das vigas de fundação.

A. Dimensionamento dos blocos de borracha

Ao contrário dos apoios fixos, todas as translações e rotações encontram-se livres neste tipo de apoios. Desta forma, é possível aplicar uma mola com o valor de rigidez pretendido.

Para escolher a rigidez horizontal de cada apoio é necessário definir a frequência fundamental da estrutura de base isolada. Segundo o EC8 o valor da frequência deve pertencer ao seguinte intervalo:

$$3T_f \leq T_{eff} \leq 3s \quad (1)$$

Sendo que T_f representa o período fundamental da estrutura com base fixa e T_{eff} é o período efetivo da estrutura com base isolada. Tendo como objetivo que o valor da frequência própria para a estrutura com isolamento seja entre um terço e um quarto do valor da frequência da estrutura de base fixa, a frequência do edifício isolado deve rondar os 0,33Hz, já que a frequência própria do edifício de base fixa é de 1Hz.

Sendo que a massa da estrutura (M_{total}) é conhecida (13557.66 ton) e a frequência (f) da estrutura com isolamento já está definida (0.31 Hz), o valor da rigidez horizontal total (K_{total}) do sistema é calculado a partir da seguinte equação:

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{M_{total}}{K_{total}}} \Leftrightarrow K_{total} = (f \times 2\pi)^2 \times M_{total} \quad (2)$$

Numa análise prévia, e para que a posição do centro de rigidez não difira muito da posição do centro de massa, considerou-se a rigidez horizontal de cada apoio proporcional à

carga vertical nesse ponto. Assim a rigidez horizontal de cada apoio foi estimada a partir da seguinte equação:

$$K_{\text{apoiio}} = \frac{N_{\text{apoiio}}}{N_{\text{total}}} \times K_{\text{total}} \quad (3)$$

Os valores da capacidade de carga vertical de cada apoio foram obtidos através do programa SAP2000. A estrutura está dimensionada para uma frequência de 0.31Hz e pela equação (3) a sua rigidez é de 58295kN/m, em função disso a soma das rigidezes dos apoios aplicados tem de ser aproximadamente igual a este valor e por esse motivo os apoios não foram colocados em todos os pontos. A partir da consulta de catálogos de fornecedores de aparelhos de apoio elastoméricos [24] foi possível associar modelos concretos de isoladores aos diversos pontos de apoio.

Na figura 4 é possível observar os pontos em que foram aplicados e definidos os blocos de borracha, aqueles que não estão representados no gráfico foram considerados como aparelhos deslizantes, isto significa que a rigidez horizontal é considerada nula. Para a escolha dos aparelhos recorreu-se ao catálogo de apoios de borracha de alto amortecimento (HDRB) da empresa FIP Industriale [12]. Este catálogo apresenta diferentes valores de deslocamento, para a verificação dos apoios de borracha considerou-se um valor máximo de dimensionamento para 250mm e por isso adota-se dispositivos com capacidade para deslocamentos máximos de 300mm.

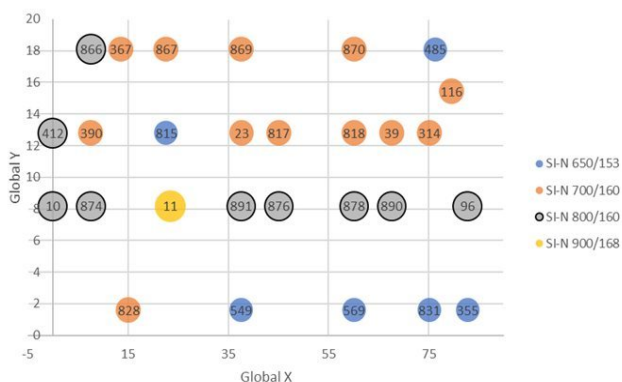


Figura 4 Definição dos apoios HDRB em planta

Após a colocação dos apoios foi possível calcular o centro de rigidez (CR) que se situa a 41.7m de comprimento e 10.7m de largura e que se encontra próximo do centro de massa (CM) da estrutura que se localiza a 41.3m de comprimento e 9.9m.

Todos os pontos de apoio, com apoios HDRB e apoios deslizantes, foram considerados com uma rigidez vertical de 3030000 kN/m.

B. Dimensionamento dos Apoios Pendulares com atrito

Neste modelo assume-se que o movimento ocorre apenas quando o atrito entre a ponta de apoio e a superfície de deslizamento é ultrapassado. No catálogo utilizado [12] para a escolha do isolador existem dois tipos de: o low friction com um coeficiente de 2.5% e o medium friction com um coeficiente de 5.5%.

A equação (4) mostra que a rigidez horizontal é proporcional ao peso suportado pelo aparelho de apoio, por este motivo

consideram-se as cargas verticais atuantes combinadas com a ação sísmica. No modelo base fixa avaliou-se a carga vertical combinada com a ação sísmica nos apoios calculou-se uma rigidez horizontal com base na equação (4) para cada apoio.

$$K_r = \frac{N_{sd}}{R} \quad (4)$$

Na modelação do elemento *link friction isolator* definiu-se um valor de rigidez vertical 10^4 vezes superior ao calculado nos apoios. O raio de curvatura a adotar teve por base a seguinte equação:

$$R = \left(\frac{3}{2\pi}\right)^2 \times 9.81 = 2.24m \quad (4)$$

O raio de curvatura adotado foi de 2.5m e o considerou-se razoável adotar um coeficiente de atrito de 2.5% para um deslocamento de 150 mm. A Figura 5 mostra a disposição e designação dos aparelhos definidos.

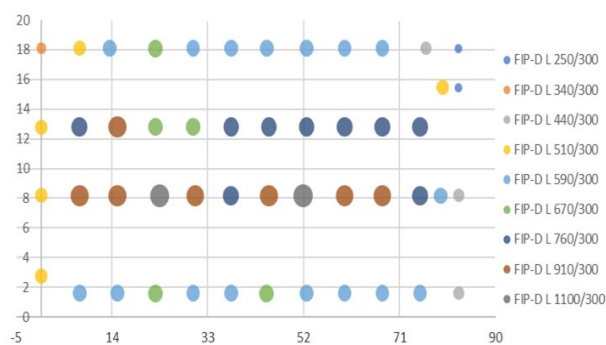


Figura 5 - Definição dos apoios pendulares com atrito

C. Ação Sísmica

De acordo com o definido no EC8 e as especificações para o comportamento Sismo-Resistente de edifícios hospitalares, o local do futuro edifício em estudo situa-se nas zonas sísmicas 1.3 e 2.3, relativamente às ações sísmicas do Tipo 1 e Tipo 2, respetivamente, estando-lhe associada, para cada uma das situações, valores de aceleração máxima de referência a_{gR} de 1.50 e 1.70m/s². Para a quantificação desta ação e tendo em conta as indicações geotécnicas considerou-se um terreno tipo B.

Tratando-se de um edifício hospitalar pertence à classe de importância IV, onde se tem coeficientes de importância: $\gamma I=1.95$ (Ação sísmica Tipo 1) e $\gamma I=1.50$ (Ação sísmica Tipo 2). As acelerações máximas no terreno de fundação são obtidas a partir da multiplicação dos coeficientes de importância pelas acelerações máximas de referência, toma assim os valores de a_g de 2.93 e 2.55 m/s², respetivamente para as ações sísmicas do Tipo 1 e Tipo 2.

O coeficiente de comportamento q foi considerado unitário nas análises sísmicas efetuadas, porém para o cálculo e dimensionamento das armaduras considerou-se um coeficiente de 1.5.

No presente estudo considerou-se apenas a sollicitação sísmica horizontal com duas componentes (x e y). Apesar de um dimensionamento de um sistema de isolamento de base

necessitar da componente vertical, esta não foi considerada uma vez que o seu efeito não é relevante para o trabalho em estudo.

D. Análise Modal por Espectro de Resposta

A ação sísmica tipo 1 é mais condicionante que a tipo 2 e por isso os dados a seguir apresentados foram analisados com a ação mais condicionante.

O sistema de isolamento de base apresenta um amortecimento entre 10% a 15% do amortecimento crítico para os períodos fundamentais. Por isso, considerou-se “misto” com um amortecimento de 5% para períodos inferiores a 2s e um amortecimento de 10% para períodos superiores a 2s, isto significa que a estrutura vibra com as frequências próprias até aos dois segundos e a partir daí passa a vibrar com a frequências característica do isolamento.

Após a análise das frequências e períodos verificou-se que em ambos os modelos o primeiro modo é descrito pela translação na direção Y, a percentagem de massa atuante é de 97.64% para os blocos de borracha e 99.84% para os aparelhos de atrito. O segundo modo é caracterizado pela translação no eixo X, a percentagem atuante de massa é de 97.95% e 99.89% para os blocos de borracha e os aparelhos de atrito, respetivamente. O movimento nas outras direções é nulo enquanto estão a ocorrer as translações, em ambos os modos apresentados. O modo 3 é descrito por uma torção e a participação de massa associada é praticamente nula em ambos os casos.

A figura 6 seguinte mostra o primeiro modo de vibração no modelo com aparelhos pendulares por atrito.

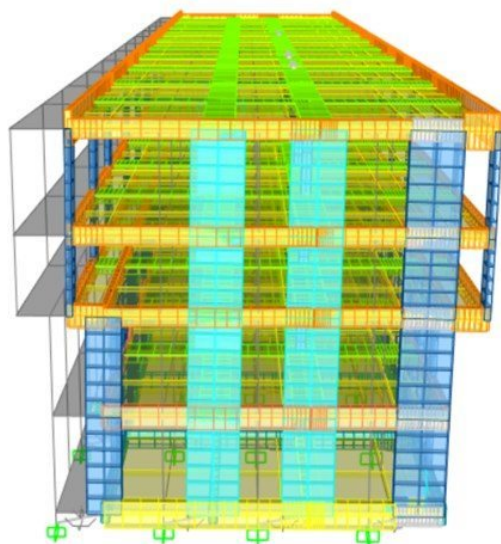


Figura 6 - Primeiro modo de vibração nos modelos com aparelhos pendulares

A Figura 7 mostra a deformação da estrutura acima do nível de isolamento de base perante a ação sísmica na direção x

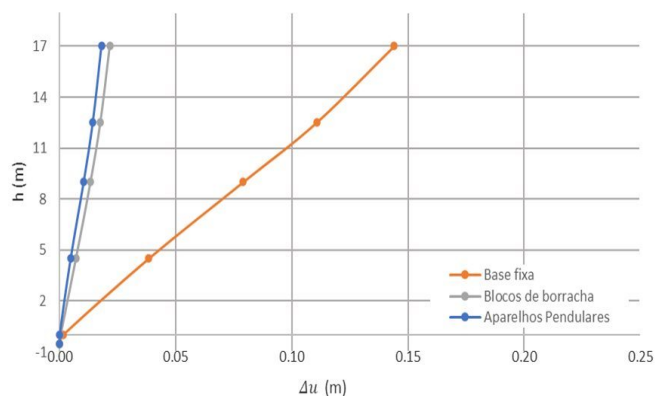


Figura 7 - Deformada da estrutura em função da altura, na direção X

No caso do edifício de base fixa apresentam-se os deslocamentos totais em cada piso. No caso do edifício com isolamento de base estão presentes os deslocamentos relativos entre o movimento dos pisos e o movimento no topo dos blocos de isolamento. Observa-se que o aparelho de isolamento sísmico tem grande eficácia, devido à reduzida variação de deslocamentos que apresentam entre pisos quando a estrutura for sujeita a um sismo.

Analisando os deslocamentos no topo do edifício, observa-se que o edifício só tem movimento na direção em que é aplicada a ação sísmica, não revelando qualquer movimento de rotação em torno de um eixo vertical.

O dimensionamento das armaduras é indispensável para um bom funcionamento estrutural, ainda que o isolamento mostre bons resultados relativamente desempenho sísmico e por isso não seja necessário a mesma quantidade de elementos resistentes que para uma base fixa é necessário manter a rigidez da estrutura. Pela armadura dimensionada observa-se que a sua percentagem é muito inferior quando comparada à armadura original do projeto, pelo que o sistemas e isolamento contribui para a diminuição dos esforços dos elementos estruturais.

E. Análise não linear

Na análise não linear foram utilizados 10 sismos artificiais apenas na direção x da estrutura, com uma duração admitida de 40 segundos, considerou-se a duração de cada tempo de análise em 0.01 segundos, perfazendo um total de 4000 iterações realizadas. O valor considerado na análise das respostas corresponde ao valor médio das respostas máximas obtidas para cada sismo.

Quando o movimento inicia a estrutura tem uma aceleração na ordem dos 3.5 m/s^2 no local do apoio, isto deve-se ao facto do apoio estar em contacto com o solo e por isso vai assumir inicialmente a mesma aceleração, a partir daí as acelerações reduzem ao longo da altura até chegar ao último piso, à cota de 17m, quando a aceleração aumenta para um valor da ordem dos 2.40 m/s^2 , isto ocorre devido ao último piso (cobertura) apresentar menor massa.

Para o estudo realizado considera-se relevante a análise dos deslocamentos relativos horizontais obtidos pelas séries de acelerações. A figura 8 mostra a deformada da estrutura com FPS ao longo da altura, sob a ação dos sismos artificiais aplicados na direção x. Na solução de base fixa estão

apresentados os deslocamentos totais em cada piso e apresentam-se os valores máximos da resposta média dos 10 sismos para os deslocamentos entre o movimento dos pisos e o movimento dos FPS.

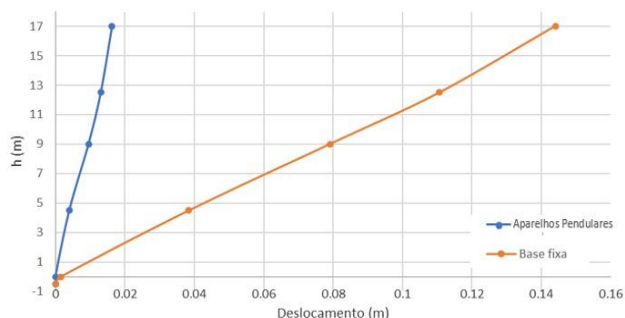


Figura 8 - Deformada da estrutura para a ação dos sismos artificiais

O comportamento não linear pode ser modelado como um comportamento linear equivalente, o amortecimento pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\xi = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{d}{\mu \cdot R} + 1} \quad (4)$$

Em que:

ξ – Amortecimento

d – Deslocamento de 150mm

R – Raio equivalente de curvatura de 2.5 m

μ – Coeficiente de atrito

O valor de amortecimento obtido é 18.7 %, isto significa que na realidade os aparelhos pendulares com atrito têm um amortecimento superior ao que foi considerado (10%) na análise linear, por isso a resposta com a análise não linear são obtidos deslocamentos mais pequenos na ordem dos 0.1m, cerca de metade dos obtidos pelo espectro de resposta. Isto confirma que a análise não linear, apesar de se tratar de um método mais moroso, é mais exata comparativamente às análises lineares realizadas.

Por último, fez-se uma breve comparação dos esforços de corte basal na estrutura onde os resultados se apresentam na imagem seguinte:

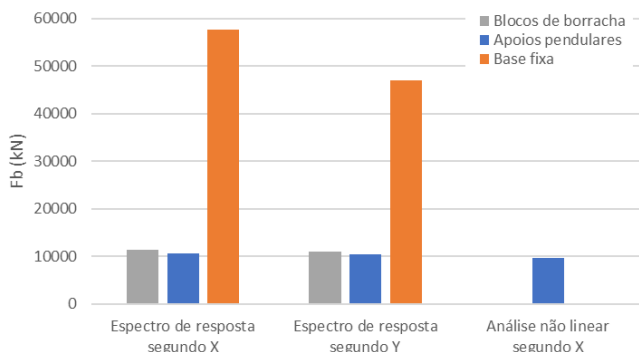


Figura 9 - Comparação da força basal para ambas as análises

Comparando estes resultados observam-se forças de corte basal menores na análise não linear. Esta solução revela

que, deste ponto de vista, a solução proposta com apoios pendulares parece ser a mais vantajosa.

VI. CONCLUSÕES

A principal conclusão a retirar dos resultados deste estudo é que a estrutura com base isolada apresenta um melhor desempenho sísmico que uma estrutura usual “acoplada” ao solo pela sua fundação. Este estudo permitiu chegar a outra conclusão importante que é a diminuição da quantidade de armadura com a implementação de uma estrutura de base isolada, assim como uma redução na própria estrutura onde foram retiradas muitas paredes face ao projeto inicial. A estrutura de base fixa obriga a ter uma armadura resistente no caso de ocorrência de ação sísmica, contudo, com a interposição da camada deformável, os esforços sob os elementos estruturais vão ser reduzidos significativamente o que leva a que apenas se necessite de uma pequena percentagem de armadura, a armadura mínima requerida pelos regulamentos.

Este estudo mostra resultados suficientes com recurso a proteção passiva que mostram que a utilização dos aparelhos pendulares com atrito seriam uma solução credível e eficaz na mitigação dos efeitos dos sismos sobre o futuro edifício a construir no HFAR.

Desenvolvimentos futuros:

- Seria interessante investigar os danos causados nas fachadas deste edifício na ocorrência de um sismo;
- Aplicação em laboratório com recurso a ensaios de modelos reduzidos;
- Estudar a aplicação deste tipo de isolamentos em edifícios já existentes, como unidades hospitalares militares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] Sapountzakis, E. J., Syrimi, P. G., Pantazis, I. A., & Antoniadis, I. A. KDamper concept in seismic isolation of bridges with flexible piers, 2017.
- [2] SPES, Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica - www.spes-sismica.org, consultado em 29 de junho de 2022.
- [3] Amaral, F. “Análise da influência da componente vertical da acção sísmica na resposta de Apoios Pendulares com Atrito.” (Masters Degree). Instituto Superior Técnico, 2013.K. Elissa, “Title of paper if known,” unpublished.
- [4] Guerreiro, L. “Isolamento de Base” [Powerpoint Presentation]. Instituto Superior Técnico, 2020.
- [5] Laço, D. “Avaliação do Desempenho Sísmico de Edifícios com Isolamento de Base”, (Masters Degree). Instituto Superior Técnico, 2021.
- [6] Whittaker, Andrew “Seismic Protective Systems”, Apontamentos do curso “CIE 619 Earthquake Engineering and Structural Dynamics II”, University of Buffalo, New York, EUA, 2013
- [7] Duarte, A., “Reabilitação Sísmica de Edifícios Através da Aplicação de Isolamento de Base.” (Masters Degree). Instituto Superior Técnico, 2017.
- [8] Skinner, R.I., Robinson, W.H., McVerry, G.H. “An Introduction to Seismic Isolation”. Chichester, Inglaterra, 1993.
- [9] Meireles, A. “Dimensionamento de sistemas de isolamento de base em estruturas de edifícios de acordo com o eurocódigo 8” (Masters Degree). Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2011.
- [10] Al-Hussaini, T.M.; Zayas, Victor; Constantinou, M.C. “Seismic Isolation of Multi-Story Frame Structures Using Spherical Sliding Isolation Systems”, Technical Report, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York, EUA, 1994
- [11] Guerreiro, L. “Sistemas de Proteção Sísmica de Estruturas”, Diploma de Formação Avançada em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, maio de 2007

FIP Industriale., Elastomeric Isolators. Italia., consultado em maio 2022