

Vulnerabilidade e reforço sísmico de uma passagem superior pedonal pré-fabricada



Vasco Bernardo

Estudante de Mestrado
FCT/UNL
Caparica
v.bernardo@campus.fct.unl.pt



André Oliveira

Bolseiro de Investigação
FCT/UNL
Caparica
oliveirahoalbo@gmail.com



Filipe Santos

Professor Auxiliar
FCT/UNL
Caparica
fpas@fct.unl.pt



Corneliu Cismasiu

Professor Associado
FCT/UNL
Caparica
cornel@fct.unl.pt

SUMÁRIO

Os sismos constituem uma das manifestações mais destrutivas e violentas da natureza, sendo responsáveis por inúmeras tragédias humanas, às quais estão associadas perdas económicas significativas. É possível estabelecer, a partir de experiências associadas a sismos já ocorridos, que os danos sísmicos podem assumir uma grande multiplicidade de formas, dependendo, entre outros fatores, da solução preconizada para a estrutura em causa.

O presente estudo pretende avaliar a resposta da ligação pilar-tabuleiro de um passadiço pedonal pré-fabricado, face a um cenário sísmico, propondo medidas de reforço que permitam melhorar o seu comportamento estrutural. O principal problema abordado no estudo prende-se com o descalçamento ao nível dos apoios, que pode conduzir a um modo particularmente severo de colapso estrutural. O estudo é baseado na análise sísmica de um modelo de EF, devidamente calibrado através de ensaios dinâmicos experimentais, sendo propostas duas soluções de reforço: uma com barras de aço e outra com ligas com memória de forma.

Palavras-chave: Descalçamento dos apoios, efeito ferrolho, análise e reforço sísmico.

1. INTRODUÇÃO

As passagens superiores pedonais são estruturas normalmente sujeitas a um tráfego reduzido, sendo portanto relativamente baixa a probabilidade de ocorrência de um sismo associada à presença significativa de pessoas no tabuleiro. No entanto, quando localizadas sob vias de comunicação importantes, a ocorrência de uma ação sísmica não pode, conduzir ao colapso da obra, sob pena de comprometer a circulação do tráfego sob a passagem e a segurança dos automobilistas.

O “descalçamento” dos apoios, normalmente associado a pontes e viadutos com tramos simplesmente apoiados, conduz a uma forma potencialmente perigosa de colapso estrutural, em que ocorre o derrube do tabuleiro devido a problemas na sua interface com a mesoestrutura. Os principais problemas que podem estar na origem deste tipo de colapso estão geralmente relacionados com comprimentos de entrega insuficientes na zona dos aparelhos de apoio ou associados à degradação dos elementos estruturais responsáveis pela transmissão das cargas sísmicas nesta interface.

No caso específico das estruturas de pontes e viadutos pré-fabricados, a transmissão das forças sísmicas horizontais na interface pilar-tabuleiro é geralmente materializada por um conjunto de varões de aço (ferrolhos), colocados perpendicularmente à superfície da junta, em conjunto com placas de neoprene simples. Estes varões estão devidamente ancorados no pilar e no tabuleiro sendo que o seu posicionamento se enquadra numa zona da estrutura particularmente sensível no que diz respeito a problemas de degradação. Trata-se, geralmente, de espaços bastante confinados, com difícil acesso e de manutenção complicada, suscetíveis à acumulação de água e ao desenvolvimento de corrosão.

O comportamento dos varões de ligação, face a solicitações horizontais, é sobretudo controlado pelo efeito de “ferrolho”, que surge principalmente da existência de um espaço que medeia a base do tabuleiro e o topo do pilar, ou viga estribo.

Pretende-se neste trabalho, através da caracterização dinâmica e da modelação de um passadiço pré-fabricado, atualmente em serviço, demonstrar técnicas de reforço capazes de melhorar o desempenho e resposta sísmica da estrutura. Para o efeito, vão ser estudadas dois tipos de soluções: uma baseada em barras de aço e outra baseada em ligas com memória de forma.

2. LOCALIZAÇÃO

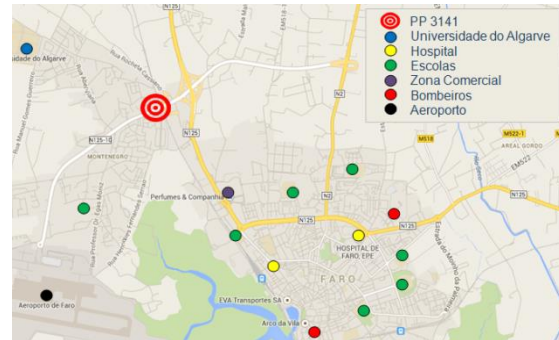
A obra de arte em estudo - PP3141- situa-se na Estrada Nacional 125 (EN125) ao km 000+420 no concelho de Faro (Fig. 1). A estrutura insere-se numa zona de risco sísmico elevado, pelo que o seu desempenho durante uma ação deste tipo deve garantir a normal circulação dos veículos sob a passagem.

O funcionamento e segurança estrutural do passadiço durante a sua vida útil é, efetivamente, de importância fulcral, uma vez que sob este é assegurada a ligação entre o

centro de Faro e várias infraestruturas prioritárias tais como a Unidade Hospitalar de Santa Maria de Faro, a Universidade do Algarve, o Aeroporto Internacional de Faro entre outras (Fig. 1b).



a) Vista em planta da estrutura



b) Vista da envolvente



c) Vista geral do alçado NE



d) Vista geral da viga SO

Figura 1 – Localização e vista geral da PP 3141

3. GEOMETRIA DA ESTRUTURA

A estrutura do passadiço é constituída maioritariamente por elementos pré-fabricados à exceção das fundações, executadas pelo método tradicional *in situ*. O tabuleiro tem um único vão, com 29,00 m de comprimento, sendo simplesmente apoiado em dois pilares principais, com secção retangular variável e dotados de capitel (Fig. 2e). A PP3141 possui 2,55 m de largura, sendo 1,75 m para circulação de peões, e é constituída por duas vigas pré-fabricadas “I” em betão armado pré-esforçado, sobre as quais foi colocada a laje do tabuleiro, materializada por pré-lajes de 5 cm, com uma lâmina de betão adicional de 10 cm (Fig. 2c). A ligação tabuleiro-pilar é materializada por quatro ferrolhos $\phi 20$ e uma lâmina de neoprene simples com 300 mm de espessura. Os ferrolhos, ancorados ao capitel do pilar, perfuram a placa de neoprene e ficam instalados no negativo das vigas (Fig. 2d), que é colmatado com argamassa de alta resistência.

O acesso à superestrutura realiza-se por intermédio de duas rampas, apoiadas em vigas cachorro, que, por sua vez, descarregam em pilares de secção retangular $0,5 \times 0,4 \text{ m}^2$ (Fig. 2f e Fig. 2g).

As fundações são diretas, materializadas por sapatas, em todos os elementos de suporte da obra de arte.

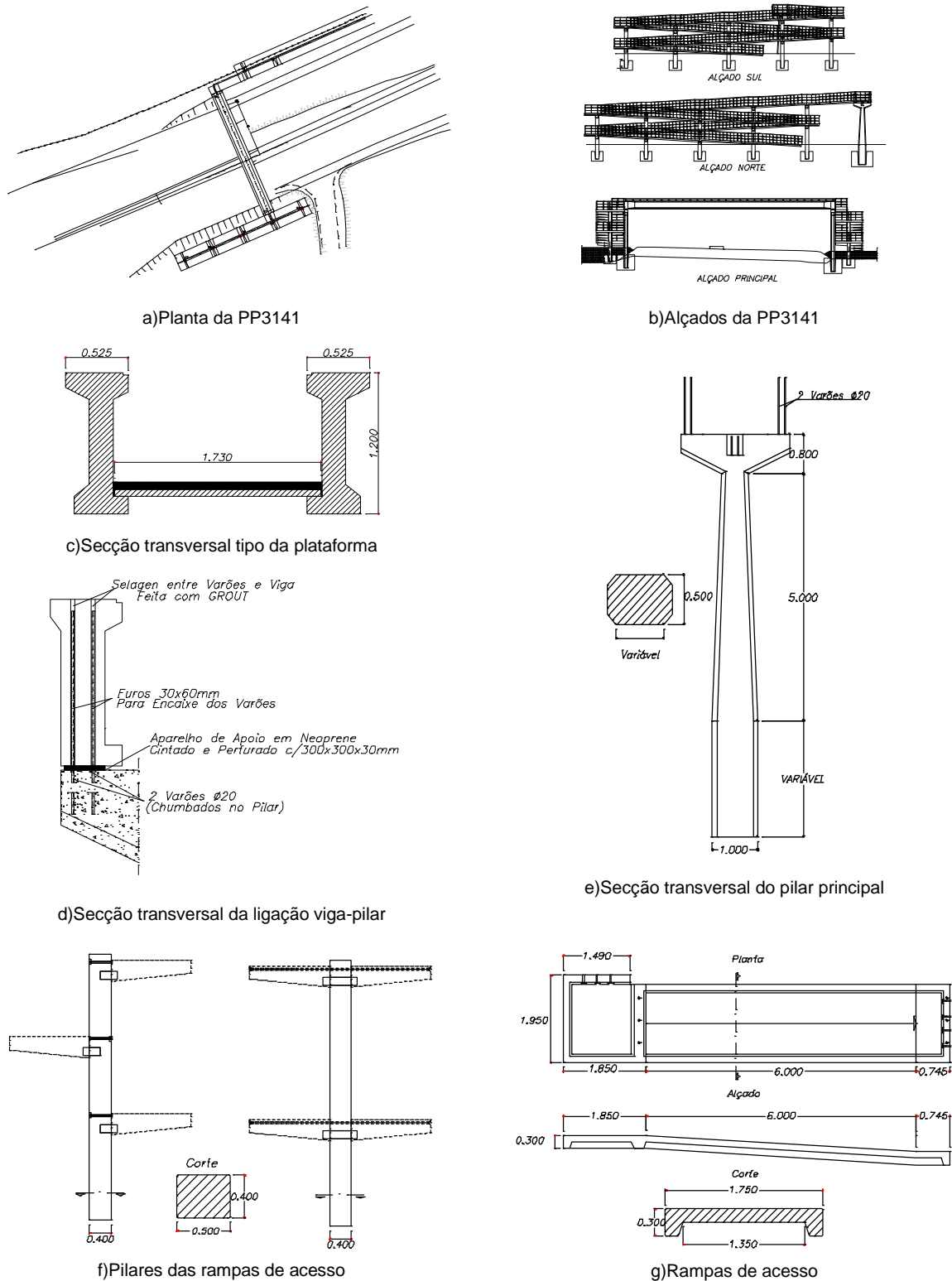


Figura 2 – Características geométricas da PP3141

4. IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS MODAIS

A identificação das propriedades modais do passadiço em termos de frequências, modos de vibração e amortecimento, efetuou-se com base num ensaio de caracterização dinâmica baseado na excitação ambiental, realizado no dia 24 de Julho de 2012, no âmbito da Dissertação de Mestrado de Ana Ferreira [1].

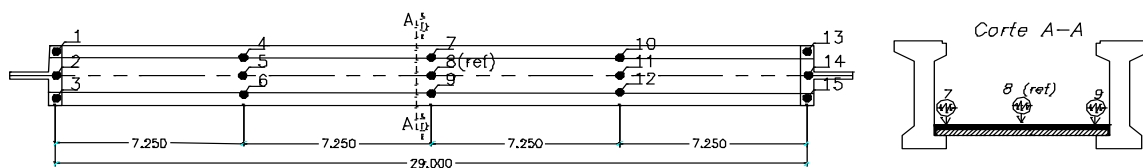
4.1 Descrição do ensaio

O ensaio de vibração ambiental realizou-se com recurso a três unidades de equipamento da marca SYSCOM Instruments, cada uma constituída por um sensor de velocidade (MS2003+), uma unidade de aquisição de dados (MR2002) e respetivas antenas GPS. Na Fig. 3 são visíveis os equipamentos utilizados (a, b e c) e uma estação de medição (d).



Figura 3 - Equipamento utilizado na campanha experimental

A resposta ambiental da estrutura foi avaliada em termos de velocidades nas direções longitudinal, transversal e vertical para os 15 pontos instrumentados, conforme Fig. 4a. Durante a realização dos ensaios (Fig. 4b), foi mantido um sensor na posição de referência (8), alterando os restantes sensores de localização. Os registos de velocidades teve uma duração de 15 minutos e foram adquiridos a frequências de amostragem de 100 Hz.



a) Pontos instrumentados sobre o tabuleiro



b) Instrumentos de medição

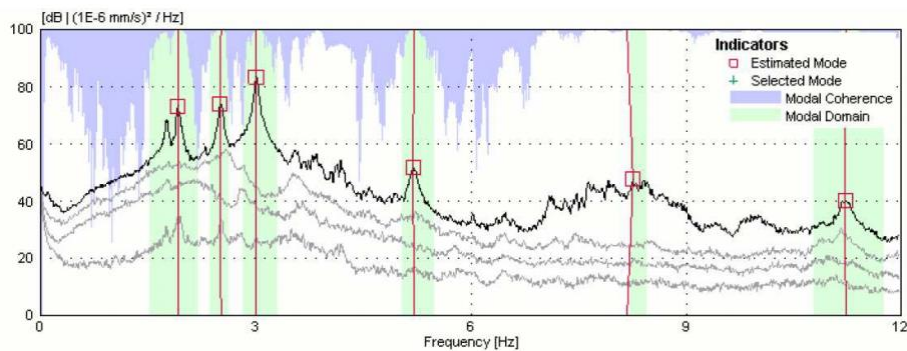
Figura 4 - Posicionamento dos instrumentos de medição durante o ensaio

4.2 Resultados experimentais

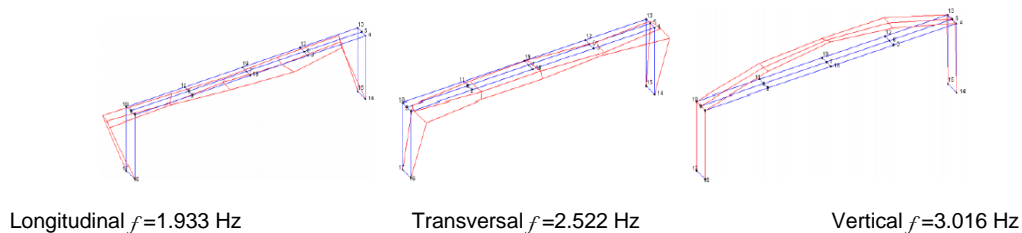
A análise da informação recolhida durante a campanha experimental foi tratada no software comercial ARTeMIS [2], por aplicação da versão melhorada do método de decomposição no domínio da frequência (EFDD). Este método baseia-se na decomposição em valores singulares da matriz dos espectros de resposta da estrutura para cada frequência. Nesta técnica, a identificação das frequências naturais é realizada com base na avaliação da abcissa em correspondência com os picos dos valores singulares, sendo as configurações modais determinadas a partir da informação dos vetores singulares correspondentes.

A Fig. 5a apresenta os valores singulares médios e normalizados da matriz de espetros, por aplicação da técnica de análise modal EFDD. Observa-se que este método foi eficiente ao determinar modos de vibração muito próximos entre si.

Na Fig. 5b observam-se os modos de vibração longitudinal, transversal e vertical, bem como as respetivas frequências identificadas experimentalmente.



a) Espectros de resposta pelo método EFDD



b) Modos de vibração experimentais do tabuleiro

Figura 5 - Modos de vibração e frequências experimentais do tabuleiro

5. MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico tridimensional do passadiço, desenvolveu-se com recurso ao programa de cálculo não linear de estruturas SismoStruct [3]. Este programa considera os efeitos da não linearidade física e geométrica, permitindo analisar o comportamento das estruturas durante a fase elástica e inelástica. A modelação do passadiço foi efetuada utilizando elementos finitos de barra, de acordo com os elementos geométricos constantes no projeto.

Foram considerados encastramentos ao nível da base dos pilares à cota correspondente à face superior das sapatas.

O modelo numérico global da estrutura do passadiço ilustra-se na Fig. 6.



Figura 6- Modelo tridimensional do passadiço em SismoStruct

O tabuleiro é pré-esforçado, com cabos de traçado reto ao longo do vão, dispostos no banzo inferior das vigas principais. Esta ação foi simulada através da aplicação de forças estáticas equivalentes, aplicadas no centro de gravidade da secção do tabuleiro.

O comportamento não linear do betão baseou-se no modelo constitutivo de Mander *et al.* [4] e o das armaduras num modelo bi-linear. A classe de betão utilizada foi de C35/45, para os elementos pré-esforçados, e C25/30 nos restantes. No que diz respeito às armaduras foi considerado um aço do tipo A500NR. Os parâmetros de resistência e propriedades dos materiais estão de acordo a NP EN 1992-1:2010 [5].

A ligação entre o tabuleiro e os pilares principais foi modelada através de molas axiais na direção longitudinal e transversal. A rigidez das molas foi obtida com recurso ao programa comercial de cálculo não linear de estruturas *Extreme Loading for Structures (ELS)* [6], a partir de uma análise do tipo *pushover* (Fig. 7). Deste modo, foi possível quantificar a resistência total do nó de ligação, na interface pilar-tabuleiro, bem como obter uma descrição mais detalhada do comportamento estrutural associado ao “efeito de ferrolho”. Na Fig. 7b está representada a curva de capacidade da ligação pilar-tabuleiro obtida, em termos da relação força de corte na ligação – deslocamento relativo. Esta lei de comportamento foi implementada no modelo global do passadiço, para descrever o comportamento da ligação pilar-tabuleiro, tendo sido aproximada por um modelo constitutivo bi-linear.

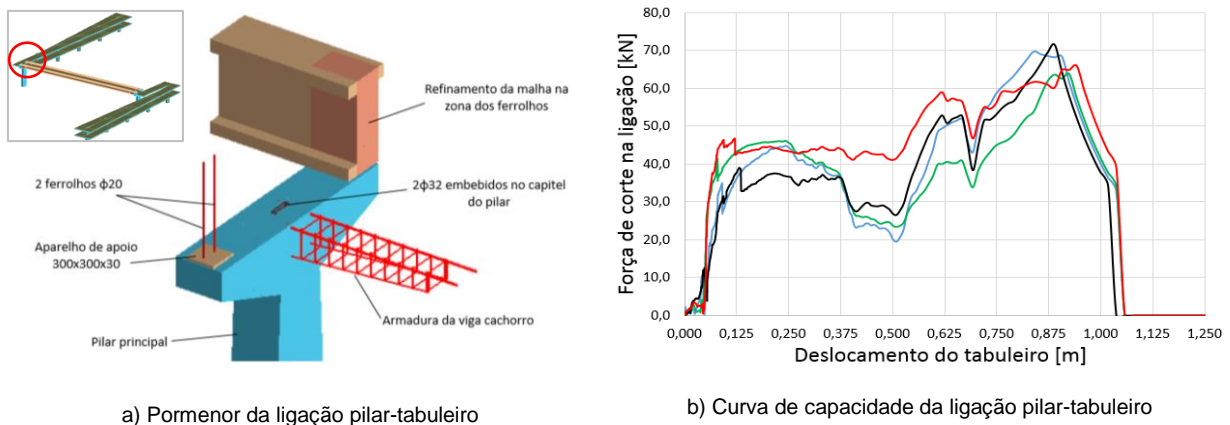


Figura 7 - Modelo tridimensional do passadiço em *Extreme Loading for Structures*

Verifica-se que a ligação atinge o patamar de cedência para um deslocamento relativo médio (para os 4 ferrolhos) de 20 mm e uma força média de 40 kN. A rigidez adotada para a mola foi calculada em conformidade, tendo-se obtido um valor de rigidez total para a ligação, para o domínio elástico, de 25000 kN/m.

Na Fig. 8 representam-se as configurações modais obtidas com o modelo de EF bem como as frequências correspondentes.

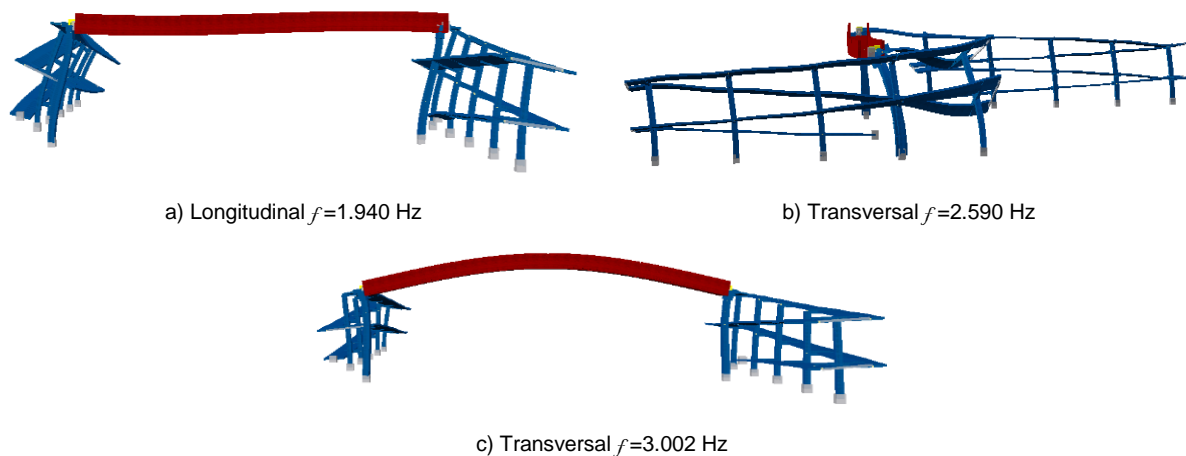


Figura 8 - Modos de vibração e frequências do modelo numérico tridimensional

A análise dos valores das frequências naturais de vibração, presentes na Fig. 8 e no Quadro 1, evidenciam uma boa correlação relativamente aos valores obtidos por via experimental, apresentando erros inferiores a 5%. A avaliação da correlação entre os modos de vibração experimentais e numéricos foi efetuada através dos coeficientes MAC (Modal Assurance Criterion), observando-se coeficientes da diagonal principal iguais ou superiores a 90%. Desta forma, verifica-se uma boa correspondência entre as configurações modais obtidas com o modelo numérico e as experimentais.

Quadro 1 - MAC - correlação entre os valores experimentais e numéricos

	Modelo numérico (SismoStruct)				% erro
	f [Hz]	1,940	2,590	3,002	
EFDD (ARTeMIS)	1,933	0,9570	0,0523	0,0019	1,91
	2,522	0,0418	0,8999	0,0439	4,65
	3,016	0,0018	0,0231	0,9716	1,25

6. AÇÃO SÍSMICA

A análise sísmica da estrutura, em regime não linear, teve como base a aplicação de um conjunto de acelerações sísmicas, geradas artificialmente a partir do espectro de resposta elástico regulamentar do EC8 [7]. A geração dos acelerogramas foi efetuada com base nos espectros de resposta regulamentares [8].

O estudo dos passadiços teve como base a ação sísmica horizontal tipo 1 (magnitude elevada e maior distância focal), com duração de 30 s, em virtude de ser a mais desfavorável para estruturas de baixas frequências. O espectro de resposta elástico que serviu de base à geração dos acelerogramas utilizados, Fig. 9a, foi definido considerando a sismicidade adequada à região de Faro, para um terreno de fundação tipo C [9] e aceleração máxima de referência do solo de 2,0 m/s², considerando uma classe III de importância. O espectro de potência associado, Fig. 9b, foi definido para uma frequência máxima de 200 rad/s com um incremento de 0,2 rad/s.

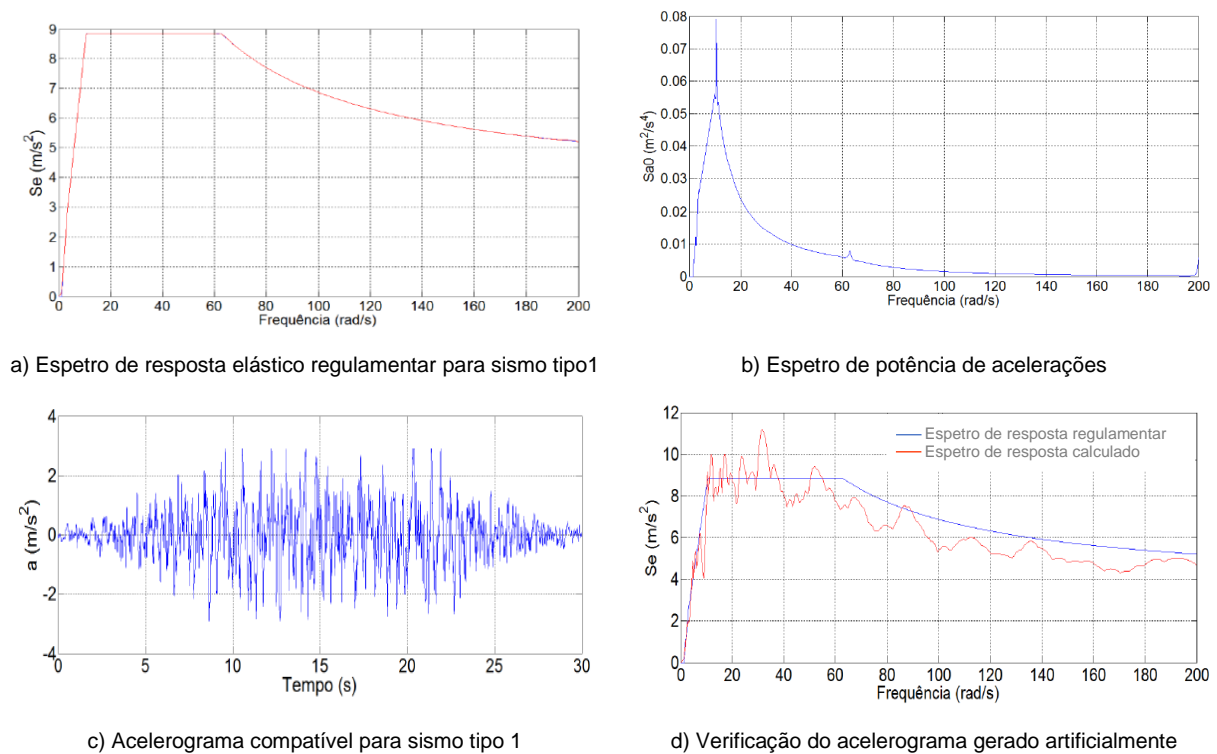


Figura 9 – Geração de acelerogramas artificiais através do espectro de resposta elástico

Como ilustrado na Fig. 9d, o espectro de resposta calculado a partir do acelerograma considerado é compatível com o espectro de resposta regulamentar, confirmando a adequação do acelerograma gerado. No estudo do passadiço foram geradas cinco séries de acelerações.

7. RESPOSTA SÍSMICA DA LIGAÇÃO TABULEIRO/PILAR

A vulnerabilidade sísmica do passadiço, associada à ligação pilar-tabuleiro, está patente na Fig. 10, onde está sintetizada a resposta desta ligação durante uma ação sísmica. Os eventuais efeitos das réplicas e abalos premonitórios foram também avaliados, considerando o percentil de 60% do sismo principal e uma duração total da ação de 100s.

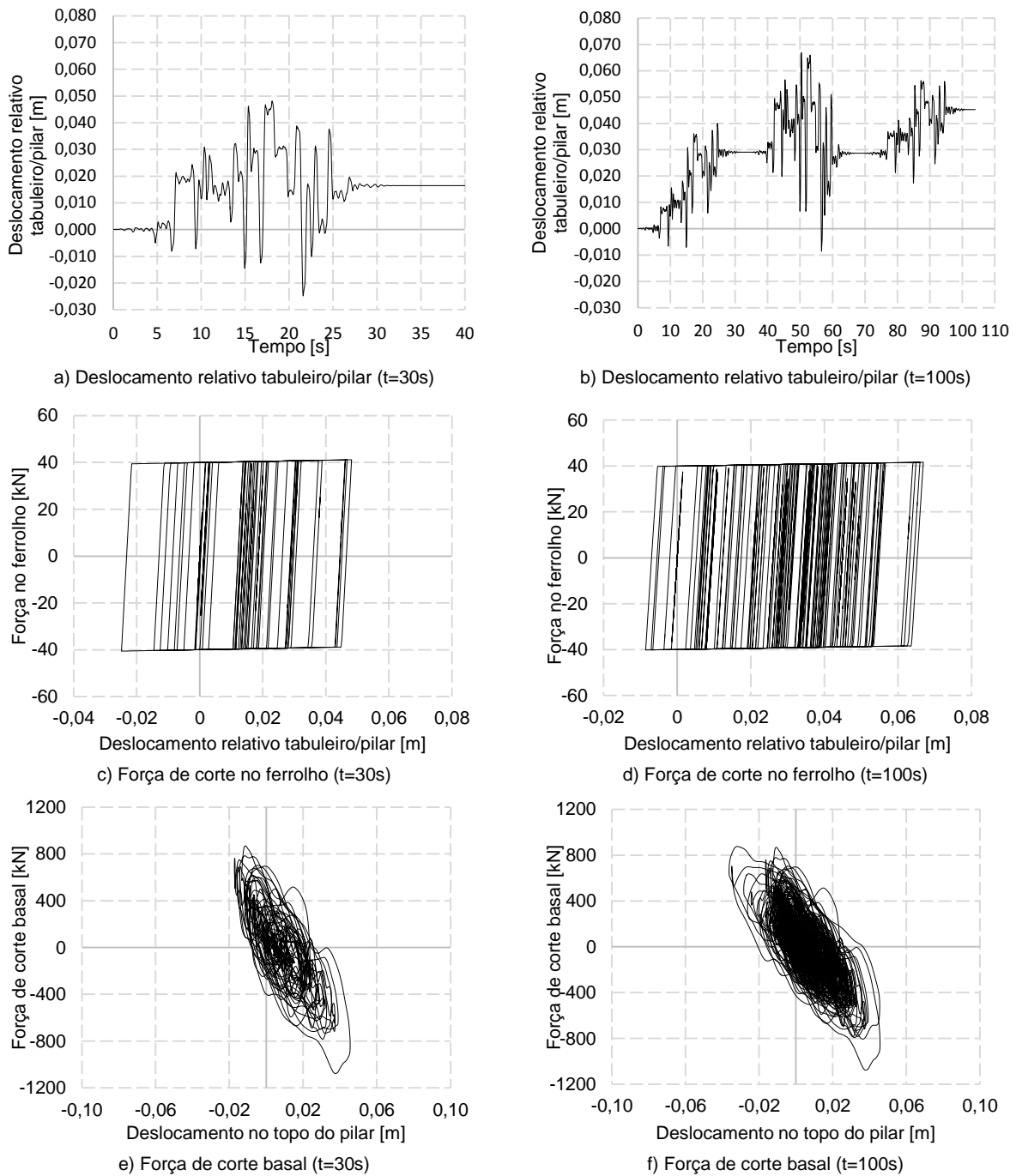


Figura 10 - Resposta sísmica da ligação tabuleiro/pilar

A análise ao comportamento sísmico da ligação pilar-tabuleiro, permite verificar que a cedência dos ferrolhos que materializam esta ligação, Fig. 10c e Fig. 10d, associada à formação de rótulas plásticas no topo dos pilares, impede que grande parte das deformações, sofridas pelo tabuleiro, sejam impostas ao pilar. Deste modo, e tal como se observa na Fig. 10e e Fig. 10f, o pilar apresenta um comportamento essencialmente elástico, sendo a maioria da energia dissipada pela cedência dos ferrolhos.

Durante um sismo regulamentar, constata-se através da observação da Fig. 10a, que os deslocamentos relativos entre o tabuleiro e o pilar não colocam em risco a ligação, em termos do “descaçamento” dos apoios, tendo em conta que o capitel do pilar apresenta, em planta, uma área suficiente para acomodar deslocamentos desta ordem de grandeza.

Contudo, a formação de rótulas plásticas nos elementos de ligação, durante a eventual possibilidade da ocorrência de réplicas e de sismos preliminares, pode comprometer a resposta da estrutura, uma vez que se desenvolvem deslocamentos relativos de alguma relevância. Estes deslocamentos podem por em causa a segurança do passadiço, nomeadamente devido à rotura local por “descaçamento” dos apoios, Fig. 10b.

8. REFORÇO SÍSMICO DA LIGAÇÃO TABULEIRO/PILAR

De forma a reduzir a vulnerabilidade da estrutura, perante eventuais sismos, propõe-se a utilização de duas técnicas de reforço distintas: A aplicação de um sistema composto por barras de aço, com diâmetro nominal $\phi 10$, vastamente utilizado como técnica de reforço, e outro composto por ligas de memórias de forma (LMF) de secção efetiva $\phi 11$, na sua fase austenítica.

As LMF na fase austenítica caracterizam-se pelo seu comportamento superelástico, i.e., pela sua capacidade de suportar grandes deformações (até cerca de 8%) sem deslocamentos residuais, desenvolvendo, durante um ciclo mecânico de carga-descarga, uma histerese. Este ciclo histerético traduz-se na capacidade do material dissipar energia, o que, aliado à sua elevada capacidade de reposicionamento, estabilidade e resistência à corrosão, faz com que as LMF sejam, cada vez mais, utilizadas em soluções de reforço sísmico.

A aplicação de ambos os sistemas de reforço, revelaram uma melhoria no comportamento da ligação, cuja resposta sísmica se encontra sintetizada nas Fig. 11, Fig. 12 e Fig. 13. Os elementos de reforço adicionais permitem tirar partido da ductilidade do pilar, como se verifica na Fig. 13, sendo que os pilares passam a ser responsáveis pela dissipação de parte da energia. Assim, consegue-se reduzir substancialmente o deslocamento relativo da ligação pilar/tabuleiro, conforme se pode verificar na Fig. 11.

A diferença entre as soluções de reforço propostas está essencialmente presente ao nível dos deslocamentos residuais da ligação, verificando-se valores superiores para aplicação de barras de aço. De facto, ao entrarem em cedência, na Fig. 12a e Fig. 12b, as barras de aço conduzem à inevitável acumulação de deslocamentos residuais. As propriedades superelásticas das LMF permitem uma boa resposta do elemento face a ações cíclicas, evitando assim deformações irreversíveis, Fig. 12c e Fig. 12d.

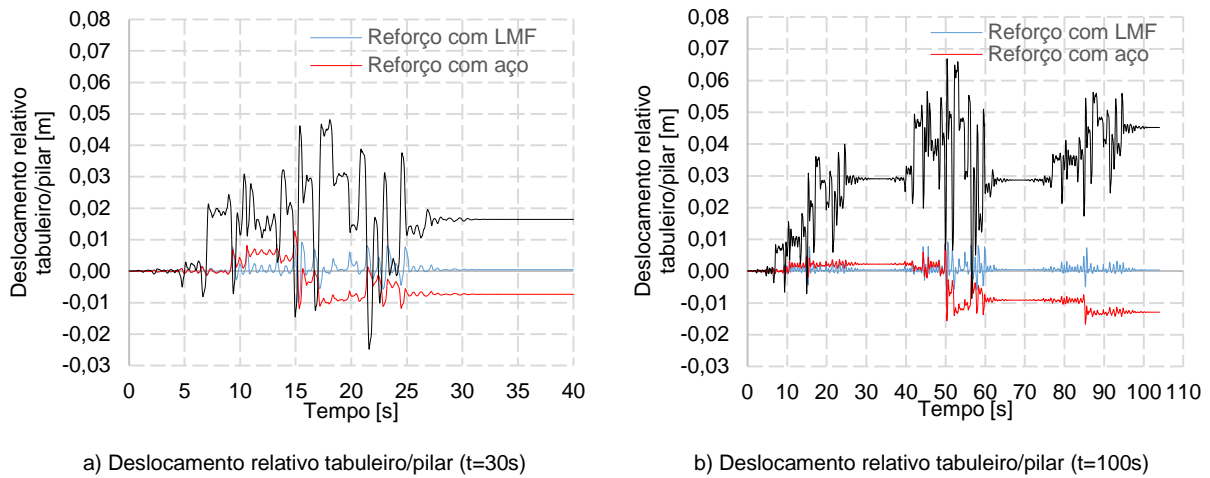


Figura 11 - Resposta sísmica da ligação tabuleiro/pilar – Pré e Pós Reforço
Deslocamentos Relativos

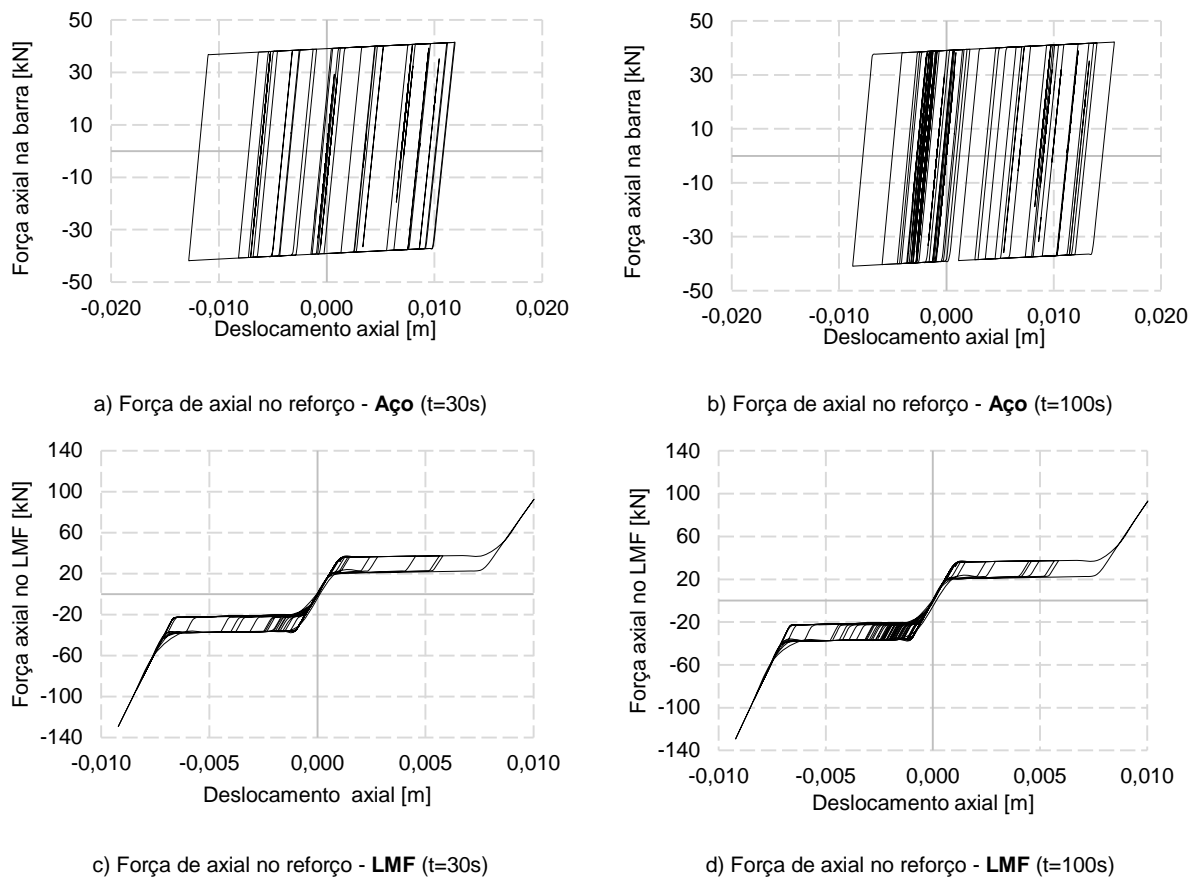


Figura 12 - Resposta sísmica da ligação tabuleiro/pilar – Após Reforço
Força Axial no Reforço

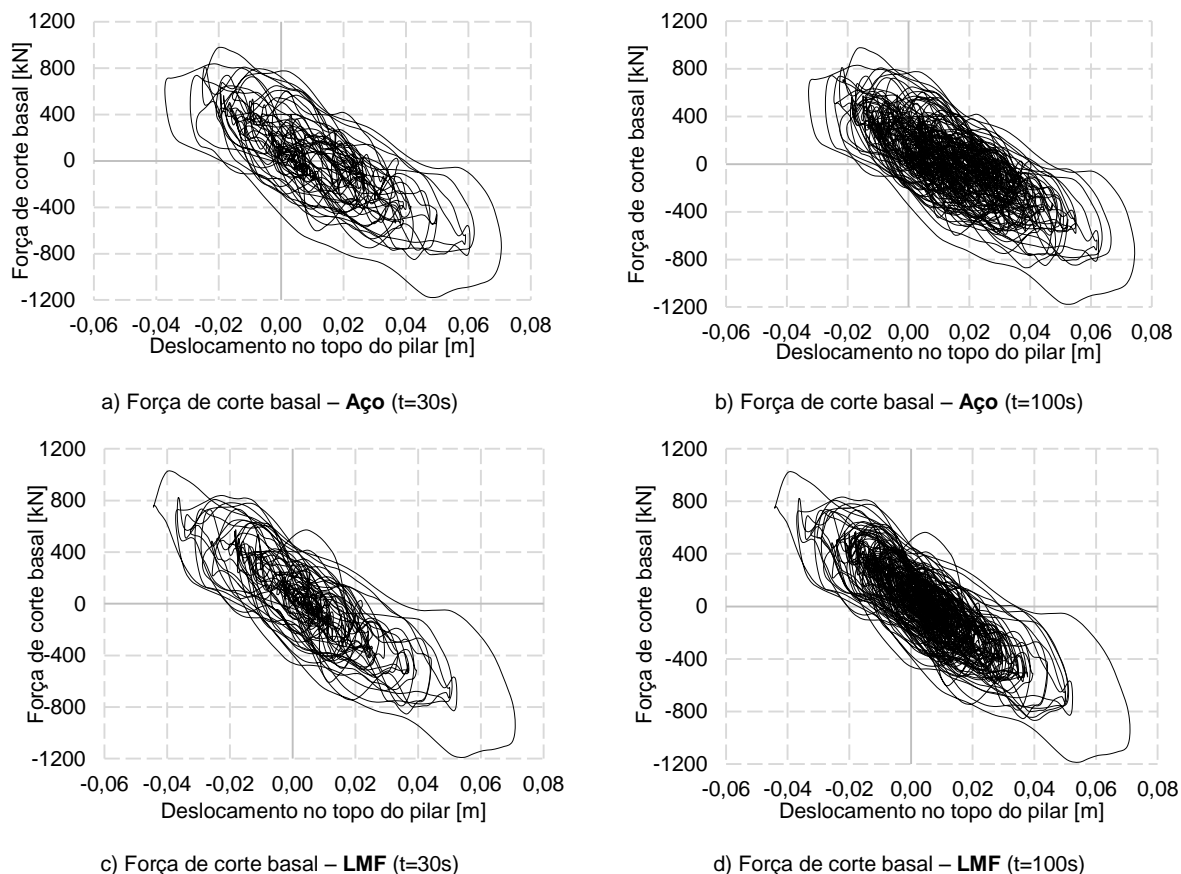


Figura 13 - Resposta sísmica da ligação tabuleiro/pilar – Após Reforço
Força de Corte Basal

9. CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos através das simulações efetuadas para o passado, permitiu identificar que durante um evento sísmico regulamentar, não ocorre a rotura local da ligação tabuleiro/pilar por “descaçamento do apoio”, uma vez que os deslocamentos relativos, desenvolvidos na interface, são relativamente limitados. Contudo, verificou-se, nos elementos de ligação – ferrolhos, responsáveis pela transmissão de forças horizontais para os pilares, a formação de rótulas plásticas e elevados ciclos de carga/descarga, associados à dissipação da maior parte da energia sísmica. Isto traduz-se num comportamento aproximadamente elástico do pilar.

Com o objetivo de tirar partido da ductilidade do pilar e reduzir as forças sísmicas nos ferrolhos, foram implementados dois sistemas de proteção/reforço sísmico: barras de aço e aplicação de ligas com memória de forma. Ambos os sistemas conduziram a uma melhoria no comportamento da ligação, nomeadamente na redução substancial dos deslocamentos relativos entre tabuleiro e o capitel, e no aumento da contribuição do pilar como elemento dissipador de energia.

O sistema de reforço composto por ligas com memória de forma, demonstrou ser uma solução mais eficiente, na medida em que a sua resposta superelástica, permite obter, após uma ação sísmica, deslocamentos residuais próximos de zero, sendo portanto uma alternativa interessante a adotar no ponto de vista do reforço sísmico do passadiço.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho faz parte do projeto de investigação financiado pela Fundação para Ciência e Tecnologia (FCT), PTDC/ECM/117618/2010 SUPERB – Prevenção do descalçamento devido à ação sísmica – Elementos de reforço para pontes.

REFERÊNCIAS

- [1] Ferreira, A. N.: “Identificação Modal e Actualização de Modelos de Elementos Finitos”, Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2013;
- [2] SVS, Structural Vibration Solutions, Denmark: ARTeMIS software – www.svibs.com;
- [3] SeismoSoft LTD, Italy, SeismoStruct: User Manual – www.seismosoft.com;
- [4] Mander J, B, Priestley J. N., Park, R.: *Theoretical stress-strain model for confined concrete*, ASCE, 1988;
- [5] CEN, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2004;
- [6] Applied Science International, Advanced Nonlinear Dynamic Analysis Simplified for Everyday Engineers, Extreme Loading for Structures, 2010 - www.extremeloading.com;
- [7] CEN, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 2: Bridges, November 2005;
- [8] Hudson, D. E.: *Response Spectrum Techniques in Engineering Seismology* – 1ª Conferência Mundial de Eng. Sísmica, Berkeley, 1956;
- [9] Lopes, H.: “Comparação do Eurocódigo 8 com o RSA/REBAP, Dimensionamento Sísmico de Estruturas de Betão Armado”. Tese de Mestrado, IST: Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.