

Comportamento de pilares ocios para estados limite de dano sísmico - custos diretos de reabilitação

Pedro Delgado

proMetheus, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia (FEUP) Universidade do Porto, pdelgado@estg.ipv.pt

Naiara Silva

proMetheus, Instituto Politécnico de Viana do Castelo

Mário Marques

DREAMS, Universidade Lusófona do Porto; CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia (FEUP) Universidade do Porto

António Arêde

CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia (FEUP) Universidade do Porto

RESUMO:

Este trabalho foca a questão dos danos de pilares ocios de betão armado devido à ação sísmica, propondo uma metodologia para caracterizar os estados limites de dano sísmico sob a perspetiva do comportamento físico. Este tipo de pilares, utilizados em vários viadutos e pontes, são conhecidos pelos seus danos motivados pelos esforços de corte, sendo este aspeto particularmente sensível no caso do modo de rotura ser também de corte. Assim, propõe-se uma abordagem metodológica para a caracterização e definição de estados limite de danos sísmicos em pilares ocios, associando-lhes os respetivos custos de reparação. Neste estudo é analisada a evolução dos danos, com associação aos estados limite de danos sísmicos (ligeiros, moderados, extensos e colapso), sendo posteriormente avaliadas as possíveis técnicas de reforço para cada estado de dano, definindo um método em que seja possível identificar qual a solução com melhor custo/benefício durante a reparação dos pilares. Para que seja possível concluir quanto e qual a estratégia de reforço que proporcionará uma melhor relação custo/benefício, é necessário ter em consideração todas as etapas de reparação e qual será o custo para executar essa técnica. Tendo em conta que os pilares ocios de betão armado, na grande maioria das vezes, têm condições de acesso difíceis, a acessibilidade para a aplicação do reforço é uma característica que pode influenciar significativamente o custo global da reparação. Pretende-se, assim, discutir estratégias de reabilitação adequadas e seus custos diretos, associados a cada etapa e estado físico limite de dano sísmico. Neste trabalho é utilizada uma revisão de resultados experimentais cíclicos em pilares ocios de BA em escala reduzida, e em resultado do contato com empresas de construção especializadas, são estimados os custos diretos de reabilitação.

PALAVRAS-CHAVE:

Dano sísmico de corte, Estados limite, Custo/benefício de reabilitação, Pilares ocios de BA

1 INTRODUÇÃO

Os pilares ocos de betão armado são usualmente utilizados em pontes quando é necessário ter uma grande altura e ao mesmo tempo garantir uma grande rigidez e um peso reduzido. Os pilares ocos de betão armado são elementos estruturais que possuem uma insuficiente capacidade de resistência a esforços de corte, principalmente verificada nos casos em que os pilares foram dimensionados com regulamentação antissísmica antiga.

Devido à vulnerabilidade dos pilares ocos de betão armado sujeitos a ações sísmicas, torna-se urgente avaliar o dano por corte esperado e sua evolução com o aumento do nível de intensidade sísmica. Adicionalmente, o foco da investigação científica dedicada ao comportamento sísmico destes elementos é ainda reduzido, em particular no que diz respeito aos estados limite de danos e às consequências económicas da reabilitação dos danos físicos existentes nos pilares ocos de BA submetidos à ação sísmica. Esta informação é considerada crucial quando se trata de uma análise de custo-benefício para a definição de medidas de reabilitação de danos sísmicos.

Este estudo foi suportado em ensaios experimentais realizados a pilares ocos de betão armado com insuficiente capacidade de corte [1, 2] que tiveram como objetivo estudar o comportamento cíclico e soluções de reparação, através de um *setup* de ensaio que permite aplicar cargas cíclicas laterais e axiais. Esta campanha experimental, realizada no LESE (Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural) da FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto), consistiu em 12 provetes, em escala reduzida de ¼ relativamente ao tamanho original, subdivididos em dois tipos de pilares ocos de betão armado, secção quadrada (0.45mx0.45m) e retangular (0.90mx0.45m), uma espessura de parede de 7.5cm e altura de 1.40m.

2 ESTADOS LIMITE DE DANOS SÍSMICOS

O presente estudo tem como objetivo a criação de uma metodologia que caracterize os estados limites de dano sísmico (ELDS) de pilares de pontes, quando estes estão sujeitos a ações cíclicas. Para o efeito, foi definido um parâmetro estrutural que define a evolução do dano dos pilares, que deriva da correlação dos valores de drift com os danos de corte identificados.

A metodologia proposta [3] define um total de quatro ELDS: Ligeiro, Moderado, Extenso e Colapso, encontrando-se em correspondência com outros estudos anteriores, [4-5]. No primeiro ELDS, os danos ainda são muito leves e não põem em causa a estabilidade estrutural. Os danos visíveis são essencialmente o início de fendilhação, em reduzida extensão e densidade, concentrando-se no terço inferior do pilar. No estado de danos moderados, existe um aumento da fendilhação, mas com aberturas de fendas ainda reduzidas, menores que 1mm, verificando-se já um padrão de fendilhação típico de fenómenos de corte, com inclinação de fendas de cerca de 45°. No estado de danos extensos, observa-se o aparecimento de fendas até 3mm de abertura e com uma elevada densidade. Neste estado de dano as fendas são essencialmente de corte nas almas, e de flexão nos banzos, encontrando-se distribuídas uniformemente por todas as faces dos pilares. É possível também observar algum destacamento do betão de recobrimento. No estado de dano mais gravoso, associado ao colapso, deixa de ser economicamente viável reparar o elemento estrutural e está seriamente comprometida a sua segurança estrutural. Entre este estado e o estado de danos extensos, existe uma evolução significativa dos danos, com particular destaque para o esmagamento do betão e um aumento do destacamento do betão de recobrimento.

As análises aos pilares ensaiados experimentalmente possibilitaram a correspondência entre estes quatro ELDS e os respetivos valores de drift, ilustrados na Fig 1 e representados na Tabela 1.



Figura 1. a) Danos Ligeiros, b) Danos Moderados, c) Danos extensos, d) Colapso

Tabela 1. Valores de drift (%) associados a cada Estado Limite de Dano Sísmico (ELDS)

ELDS	Drift
Ligeiro	0,6%
Moderado	1,3%
Extenso	2,0%
Colapso	3,0%

3 ÍNDICE DE DANO

Os estados limite de danos sísmicos, para além de caracterizados em função do valor de drift, foram também associados a um índice de dano (ou *damage index*, DI). A caracterização dos estados limite de danos permite avaliar a vulnerabilidade estrutural dos elementos em análise, perante a evolução crescente da ação cíclica atuante, que simula a intensidade da ação sísmica. Adicionalmente, procura-se também que traduzam a estimativa de perdas económicas associadas à reposição da capacidade resistente dos elementos estruturais, ou seja os custos de reparação (o que por vezes pode significar o reforço estrutural).

A metodologia escolhida neste trabalho para a determinação do índice de dano para os pilares ocios de betão armado foi também utilizada por Rodrigues [4], baseando-se na Eq. (1) proposta de Park & Ang [6], dada a sua simplicidade e rigor.

$$DI = \frac{d_{max}}{d_u} + \beta \frac{\int dE}{F_y \cdot d_u} \quad (1)$$

Em que:

d_{max} – Deslocamento máximo atingido num determinado ciclo;

d_u – Deslocamento último;

$\int dE$ – Energia dissipada;

F_y – Força de cedência;

O parâmetro β tem grande influência no resultado do cálculo, pois resulta da resposta cíclica no pilar, sendo considerado um parâmetro de degradação e podendo ser estimado através da seguinte Eq. (2) referida por Arêde [7]:

$$\beta = 0.9^{100 \cdot \rho_w} (0.37 \cdot \max\{v; 0.05\} + 0.5 \cdot (\omega_t - 0.17)^2) \quad (2)$$

em que:

ρ_w – Rácio volumétrico de confinamento;

v – Esforço axial normalizado (correspondente ao esforço axial a dividir pela área da secção transversal e pela tensão de compressão do betão);

ω_t – Rácio mecânico de armadura longitudinal (rácio entre a área dos varões longitudinais e a área de betão da secção transversal do pilar).

Após proceder ao cálculo do índice de dano de cada pilar, seguindo a metodologia anteriormente referida, foi possível obter um valor de índice de dano final para cada estado ELDS, representado na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores do índice de dano associados a cada Estado Limite de Dano Sísmico

	Drift	Índice de dano
S/dano	0,0%	0,00
Ligeiros	0,6%	0,22
Moderados	1,3%	0,56
Extensos	2,0%	0,82
Colapso	3,0%	1,07

4 REABILITAÇÃO SÍSMICA

Atualmente, existem diversas técnicas que permitem reforçar e reparar as estruturas, com vista a assegurar a reposição ou melhorar o seu comportamento face às ações sísmicas. No sentido da seleção da técnica que garanta simultaneamente o cumprimento dos objetivos de desempenho estrutural e económico, é necessário primeiramente avaliar a extensão dos danos, para que se possa identificar com precisão quais as técnicas mais adequadas. O custo associado a cada método de reabilitação pode ser estimado em função do nível de dano e da extensão do elemento estrutural [3], tendo sido elaborada uma estimativa detalhada do custo unitário de cada fase de reparação e reforço.

4.1 Danos Ligeiros

Os danos ligeiros, quando ocorrem, não necessitam de intervenções significativas, visto que os danos são quase impercetíveis visualmente. Apesar de não existir nenhum comprometimento estrutural ou risco para a estrutura, podem detetar-se pequenas fissuras (entre 0.1 e 0.5mm), e como consequência poderá ser necessária a reparação da superfície de modo a recuperar as características estéticas originais do pilar [8].

4.2 Danos Moderados

O estado de danos moderados é caracterizado por fendas pequenas nas faces do pilar, correspondendo a uma abertura entre 0.5 e 1.0mm. Não existe o comprometimento da estabilidade estrutural, sendo desnecessário qualquer tipo de intervenção estrutural. Para reparar as aberturas de fendas, a técnica de reparação mais adequada é a injeção de resina epóxi, que deverá respeitar a EN 1504-5 [9], referente a injeções em estruturas de betão armado.

4.3 Danos Extensos

As fendas que aparecem neste estado de dano são já mais significativas, tendo as fendas médias uma abertura de 2.0mm até 3.0mm. Este estado também é caracterizado pelo destacamento do betão de

recobrimento. A estabilidade da estrutura, neste caso, poderá estar comprometida, ou seja, é necessário assegurar a reposição ou melhoria das condições estruturais originais do elemento afetado pelo dano.

Existem três técnicas de reforço estrutural que são mais utilizadas no mercado, nomeadamente: aumento da secção com recurso a betão armado, colagem de chapas metálicas, bem como a aplicação de laminados ou mantas de materiais compósitos. Os materiais compósitos normalmente utilizados variam entre fibras de carbono (CFRP), fibras de vidro (GFRP) e fibras de aramida (AFRP), também conhecida como KEVLAR.

5 ESTIMATIVA DE CUSTO DE REABILITAÇÃO DOS PILARES

Após a identificação dos custos unitários associados às tarefas e recursos necessários para cada técnica de reabilitação e reforço dos pilares, foi quantificada a evolução do custo em função da resposta do elemento estrutural. O comportamento do pilar evolui em função das suas características materiais e geométricas, e do nível da ação sísmica. Considerou-se o drift como parâmetro de resposta, permitindo assim estimar o custo da reabilitação dos pilares para cada estado limite de dano sísmico [10]. A qualidade da estimativa do custo de reparação ou reforço constitui um elemento de maior importância numa fase de identificação da técnica a adotar. No caso de obras de reabilitação a construção apresenta diversas fontes de incerteza, devido por exemplo à dificuldade na execução de algumas das tarefas, tornando-se difícil quantificar os recursos necessários, como mão de obra e equipamentos necessários na intervenção. No entanto, tendo por base uma estimativa mais detalhada do custo unitário de cada fase de reparação e reforço realizada anteriormente [3], neste trabalho foi realizada uma estimativa de custos médio de reparação de um pilar em função do respetivo o estado limite de dano e separando o custo por tipo de trabalhos a realizar, isto é, custo dos materiais, custo da mão de obra e custo do acesso à zona do pilar a reparar e outros trabalhos adicionais.

Para o estado limite de danos ligeiros, se as fissuras apresentarem aberturas inferiores a 0.5mm, deverá realizar-se a reparação da superfície fissurada, correspondente ao terço inferior do pilar, neste caso aproximadamente igual à dimensão da secção transversal. A Tabela 3 ilustra a separação dos custos de reparação em função do tipo de trabalhos a realizar.

Tabela 3. Custos de reparação dos pilares com danos ligeiros

	Custo médio
Material - reparação da superfície (€)	77
Mão de obra (€)	49
Acessibilidade e outros trabalhos (€)	21
Total (€)	154

Para o estado limite de danos moderados com fissuras entre 0.5mm e 1mm deverá utilizar-se a injeção de resina epóxi. Neste caso, cerca de 2/3 da superfície do pilar encontra-se fissurada, incluindo-se na Tabela 4 os custos de reparação associados a cada tarefa.

Tabela 4. Custos de reparação dos pilares com danos moderados

	Custo médio
Material - Injeção de resina epoxi (€)	112
Mão de obra (€)	98
Acessibilidade e outros trabalhos (€)	49
Total (€)	259

O estado de dano extenso caracteriza-se pelo agravamento do estado da estrutura, com o aparecimento de fendas de grandes dimensões, tendo aberturas que podem variar entre 1mm e 33, distribuídas por todas as faces do pilar, sendo também possível verificar o destacamento do betão de recobrimento. Quando o pilar atinge este estado de dano, o tratamento superficial do elemento não é suficiente para garantir os requisitos mínimos necessários, sendo assim necessário proceder a um reforço estrutural do elemento. A tabela 5 representa os diferentes custos por tipologia para reparação dos pilares ensa-

ados, tendo em conta uma estimativa média das três técnicas de reforço estrutural nomeadamente: aumento de secção com betão armado, reforço com adição de perfis metálicos e reforço com mantas de fibras de carbono (CFRP).

Tabela 5. Custos de reparação dos pilares com danos extensos

	Custo médio
Material - reparação e reforço (€)	245
Mão de obra (€)	252
Acessibilidade e outros trabalhos (€)	105
Total (€)	602

Finalmente, para o estado limite de dano de colapso, que é caracterizado por um grande destacamento do betão de recobrimento, torna-se economicamente inviável a sua reparação. Assim, a demolição e a construção de um novo pilar correspondem aos trabalhos a aplicar neste caso. O custo total irá refletir a todos os trabalhos de demolição do pilar, envolvendo a reciclagem de todos os materiais, carga, transporte e descarga, bem como as tarefas acessórias necessárias para a limpeza do local. O custo de construção de um novo pilar inclui a execução de um pilar em betão armado idêntico, incluindo o fornecimento, colocação, compactação e cura do betão. O preço total de demolição e construção deste pilar em betão armado é de cerca de 699€. Na Tabela 6 apresentam-se os custos separados em função do tipo de trabalhos a realizar. Os custos unitários foram estimados através do gerador de preços da Top Informática (<http://www.topinformatica.pt/>) e validados através do contato com empresas de construção especializadas.

Tabela 6. Custos de demolição e a construção de um novo pilar correspondente ao danos colapso

	Custo médio
Material - reparação e reforço (€)	209
Mão de obra (€)	280
Acessibilidade e outros trabalhos (€)	210
Total (€)	699

A fim de tornar esta análise mais global, optou-se por representar a evolução do rácio entre o custo de reparação e o custo de substituição do pilar em função do drift, tal como ilustrado na Fig. 2, para cada ELDS. Esta evolução de transferência de danos em custos fornece um indicador importante para qualquer estimativa de custos em pilares ocios de betão armado. Adicionalmente, permite também avaliar o impacto e eficiência de cada técnica de reparação ou reforço. A Fig. 2 revela que os custos de reparação associados aos níveis de dano Extenso e Colapso implicam ser pouco viável a reparação do elemento estrutural. Contudo, mesmo no caso de danos Ligeiros e Moderados os respetivos custos são já bastante significativos

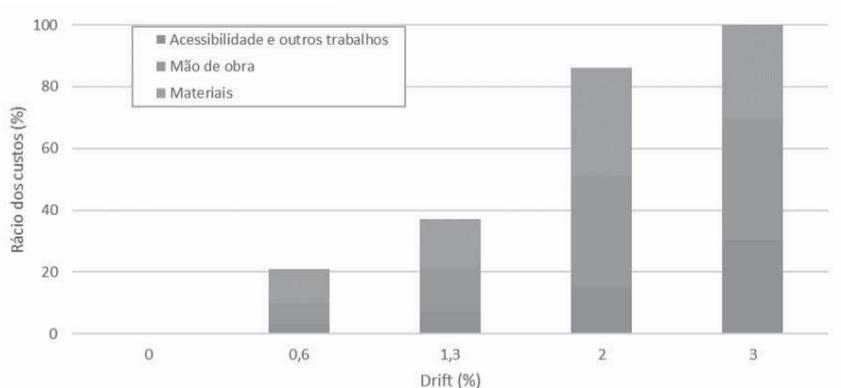


Figura 2. Evolução do custo das intervenções de reparação (em %) em função dos drift limite

No caso deste estudo, para estruturas que sofreram com o impacto de um sismo e portanto que necessitam de reabilitação, deve-se ter em consideração os fatores como o tipo, dimensão da ponte e como será feita acessibilidade à mesma. Os locais onde se encontram estruturas que estão danificadas por sismos, normalmente são de difíceis acessos, sendo que os destroços no local e a dimensão da estrutura contribuem para um acréscimo considerável no orçamento. Os pilares anteriormente estudados são normalmente implementados em diferentes tipos de pontes, com diferentes dimensões e que, em termos de acessibilidade, podem variar entre acesso fácil, acesso moderadamente difícil e de acesso difícil.

CONCLUSÃO

Neste estudo, procurou obter uma metodologia que seja capaz de prever uma avaliação dos danos para os diferentes pilares, e a determinação do custo de reforço e reparação dos pilares, permitindo no final aferir, de uma maneira simplificada, a estimativa do custo da reabilitação de pilares com insuficiente capacidade de corte para cada estado limite de dano sísmico. A metodologia proposta permite concluir que a reparação de pilares ociosos de betão armado apresentam custos significativos mesmo para danos moderados, e sendo praticamente idênticos os custos de substituição para a situação de colapso e para danos extensos. Assim, quer do ponto de vista dos custos como da segurança sísmica, este estudo identifica a premência de ser verificada a capacidade de corte de pilares de pontes e, no caso de ser insuficiente, proceder ao seu reforço de forma a serem evitados os ELDS mais severos ou colapso.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto proMetheus – Unidade de Investigação em Materiais, Energia e Ambiente para a Sustentabilidade, Ref. FCT UID/05975/2020, financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES.

Este trabalho foi também financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 e Financiamento programático - UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

REFERÊNCIAS

- [1] Delgado, P., 2009. "Avaliação de Segurança Sísmica de Pontes". PhD Thesis, FEUP, Porto.
- [2] Delgado R, Delgado P, Vila Pouca N, Arêde A, Rocha P, Costa A. 2009 "Shear effects on hollow section piers under seismic actions: experimental and numerical analysis." *Bulletin of Earthquake Engineering*. 7:3:77-89.
- [3] Delgado, P., Sá, N., Marques, M. & Arêde, A., 2017. "Custo de reabilitação de pilares ociosos com base nos estados limite de dano sísmico", CREPAT- Congresso da reabilitação do património, Aveiro, Portugal, 29 a 30 de Junho.
- [4] Rodrigues, H., Arêde, A., Varum, H. & Costa, A., 2013. Damage evolution in reinforced concrete columns subjected to biaxial loading. *Bull Earthquake Eng*, pp. 1517-1540.
- [5] FEMA, 2003. HAZUS MR4. Washington DC: National Institute of Building Sciences.
- [6] Park, Y.-J. & Ang, A.-S., 1985. "Mechanistic seismic model for Reinforced concrete". *Journal of Structural Engineering*, pp. 111.722-739.
- [7] Arêde, A., 1997. "Seismic Assessment of Reinforced Concrete Frame Structures with a New Flexibility Based Element", PhD Thesis, FEUP, Porto.
- [8] CEN, 2006. NP EN 1504-2. Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 2: Sistemas de protecção superficial do betão. Brussels: European Standard.
- [9] CEN, 2006. NP EN 1504-5. Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão - Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 5: Injeção do betão. Brussels: European Standard.
- [10] PRISE, "Avaliação de Perdas e Risco Sísmico dos Edifícios em Portugal", projeto financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, 2013-2015 (<http://prise.fe.up.pt>).