

# Custo de reparação e reforço de pilares ocos de betão armado

## Cost of repair and retrofit of reinforced concrete hollow columns

Pedro Delgado  
Nelson Sá  
Mário Marques  
António Arêde

### Resumo

Os pilares ocos de betão armado são conhecidos pelos seus danos motivados pelos esforços de corte a que estão sujeitos. Este aspeto é particularmente sensível no caso de pilares em que o modo de rotura se relaciona geralmente com o comportamento de corte. Existem muito poucos estudos sobre as consequências económicas da reparação e reforço dos danos físicos existentes em pilares ocos de betão armado submetidos à ação sísmica. Esta informação é muito importante quando se equaciona a análise custo-benefício de medidas de prevenção ou reparação de danos sísmicos.

Portanto, o presente trabalho pretende discutir as adequadas estratégias de reparação e reforço, bem como os seus custos, associados a cada estado limite de dano sísmico. Para tal, será realizada uma análise de resultados experimentais de ensaios cíclicos em pilares ocos de betão armado realizados na Universidade do Porto, e serão estimados os custos de reparação em parceria com empresas de construção especializadas.

### Abstract

The hollow piers of reinforced concrete are well known because of shear effects to which are often subjected. This aspect is particularly true in the case of hollow piers in which the failure modes generally relate to shear behavior. There are very few studies on the economic consequences of the repair and strengthening of physical damages existing in hollow piers of reinforced concrete subjected to the seismic action. This information is very important when it equates the cost-benefit analysis of measures to prevent or repair earthquake damage.

Therefore, this paper discusses the appropriate strategies for repair and strengthening of the hollow piers, as well as the costs associated with each limit state of seismic damage. This requires an analysis of experimental results from cyclic tests on reinforced concrete hollow piers conducted at the University of Porto, and repair costs will be estimated in collaboration with construction companies existing in Portugal.

**Palavras-chave:** Custo de reparação / Dano de corte / Pilares ocos de BA / Comportamento cíclico não linear

**Keywords:** Repair cost / Shear damage / RC hollow piers / Non-linear cyclic behavior

## Pedro Delgado

Doutor  
Instituto Politécnico de Viana do Castelo / CONSTRUCT-LESE  
Viana do Castelo, Portugal  
pdelgado@estg.ipvc.pt

## Nelson Sá

Mestre  
Instituto Politécnico de Viana do Castelo  
Viana do Castelo, Portugal

## Mário Marques

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

## António Arêde

Doutor  
CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia (FEUP)  
Universidade do Porto  
Porto, Portugal  
aarede@fe.up.pt

## Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

## Legal notice

*The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.*

DELGADO, Pedro [et al.] – Custo de reparação e reforço de pilares ocos de betão armado. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 3. ISSN 2183-8488. (março 2017) 83-94.

## 1 Introdução

Os pilares de secção oca são utilizados com frequência em pontes de grande altura, nomeadamente quando é necessário garantir uma elevada rigidez e simultaneamente um peso reduzido, conduzindo assim a uma construção mais económica. Os pilares ocos podem ser comparados a paredes de betão armado, no entanto quando este tipo de elementos está sujeito a ações sísmicas de elevada intensidade podem, em certas circunstâncias, revelar-se muito vulneráveis, devido predominantemente à sua menor capacidade resistente ao corte e à deformação.

Em virtude da esperada vulnerabilidade destes pilares, quando sujeitos à ação dos sismos, torna-se premente avaliar quais os danos esperados e a sua evolução com o incremento do nível de intensidade. Do mesmo modo, constata-se que o enfoque da investigação científica dedicada ao comportamento sísmico destes elementos é ainda reduzido, em particular no que se refere à caracterização dos danos e à definição dos estados limites de dano, sob a perspetiva do comportamento físico e estimativa de custos de reparação. Após identificados quais os danos e consequente estado limite de dano, o processo de estimativa do custo de reparação e reforço dos pilares ocos torna-se mais fácil. Assim, como forma de estabelecer uma correspondência entre os diversos estados limites de danos e o custo de reparação e reforço, analisou-se um conjunto de resultados de ensaios experimentais quase-estáticos conduzidos na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto [1-3].

## 2 Descrição dos ensaios experimentais realizados

A campanha de ensaios experimentais foi realizada no LESE (Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural), localizado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, onde se desenvolveu um *setup* de ensaio que serviu para vários trabalhos de investigação neste domínio. O *setup* do ensaio, ilustrado na Figura 1, é uma estrutura constituída por 2 pórticos de reação construídos por perfis metálicos.



Figura 1 *Setup* de ensaio

Um dos pórticos está equipado com um atuador horizontal que permite aplicar cargas até 500 kN. O outro pórtico está equipado com um atuador vertical, para a simulação de cargas axiais, com uma capacidade de aplicar cargas até 700 kN. Este segundo atuador

está preparado para que a carga possa ser sempre constante independentemente do deslocamento do topo do pilar. A sapata do pilar e os pórticos de reação estão ligados ao pavimento rígido através de tirantes de aço de alta resistência, pré-esforçados para prevenir deslocamentos e rotações indesejáveis.

Esta campanha de ensaios experimentais foi constituída por 12 pilares, 6 quadrados (PO1) e 6 retangulares (PO2). Os pilares retangulares têm uma secção de 0,90 × 0,45 m e uma espessura de parede de 7,5 cm. Todos os pilares têm 1,40 m de altura e foram construídos a uma escala de ¼ relativamente ao tamanho original. No Quadro I encontram-se as características dos pilares [1-3].

Relativamente à instrumentação foram utilizados LVDT's numa das faces laterais e foram também registadas imagens e vídeo (pelo exterior e interior). Nas Figuras 2 e 3 ilustram-se a pormenorização da armadura e a disposição dos LVDT's, respetivamente.

Nos pilares ensaiados foram aplicados dois tipos de carregamento, uma carga axial de 250 kN, constante ao longo do tempo, e uma horizontal, responsável pelo deslocamento do topo do pilar, variável ao longo do tempo, dependendo do deslocamento desejado.

Para a imposição dos deslocamentos foi criada uma sequência de deslocamentos, repetida três vezes em cada intensidade. A sequência de deslocamentos encontra-se representada no Quadro II, bem como os correspondentes *drifts*.

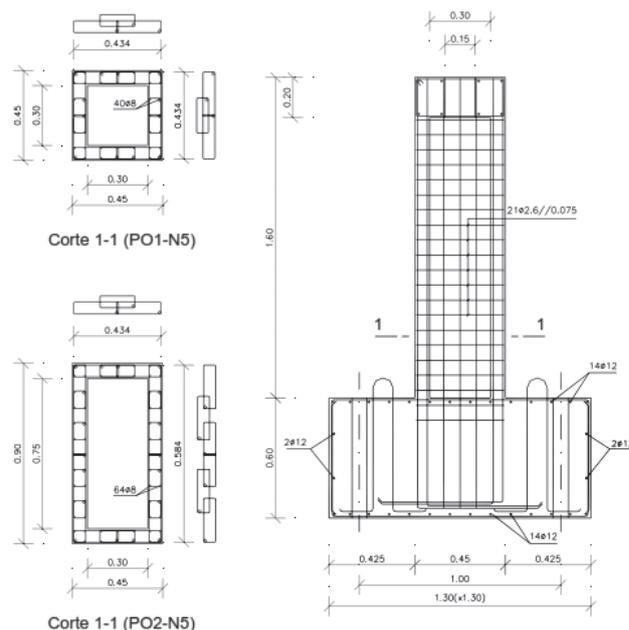


Figura 2 Pormenorização da armadura

Quadro I Propriedades dos pilares ensaiados

Designação	Geometria	$f_{cm}$ (MPa)	Arm. Long.			Arm. Transv.	
			Área	$f_{sy}$ (MPa)	$\varnothing$ (mm)	$f_{sy}$ (MPa)	tipo
PO1-N1	Quadrado	19,8	40φ8	625	3,8	390	2 ramos
PO2-N1	Retangular	19,8	64φ8	625	3,8	390	2 ramos
PO1-N2	Quadrado	27,9	40φ8	435	2,6	437	2 ramos
PO1-N3	Quadrado	27,9	40φ8	435	2,6	437	2 ramos
PO2-N2	Retangular	27,9	64φ8	435	2,6	437	2 ramos
PO2-N3	Retangular	27,9	64φ8	435	2,6	437	2 ramos
PO1-N4	Quadrado	28,5	40φ8	560	2,6	443	2 ramos
PO1-N5	Quadrado	28,5	40φ8	560	2,6	443	2 ramos (EC8)
PO1-N6	Quadrado	28,5	40φ8	560	2,6	443	4 ramos (EC8)
PO2-N4	Retangular	28,5	64φ8	560	2,6	443	2 ramos
PO2-N5	Retangular	28,5	64φ8	560	2,6	443	2 ramos (EC8)
PO2-N6	Retangular	28,5	64φ8	560	2,6	443	4 ramos (EC8)

Quadro II Sequência de deslocamentos

Desl. (mm)	1	3	5	10	4	14	17	7	25	30	33	40	45
Drift (%)	0,07	0,21	0,35	0,7	0,28	1,0	1,2	0,5	1,8	2,1	2,4	2,9	3,2

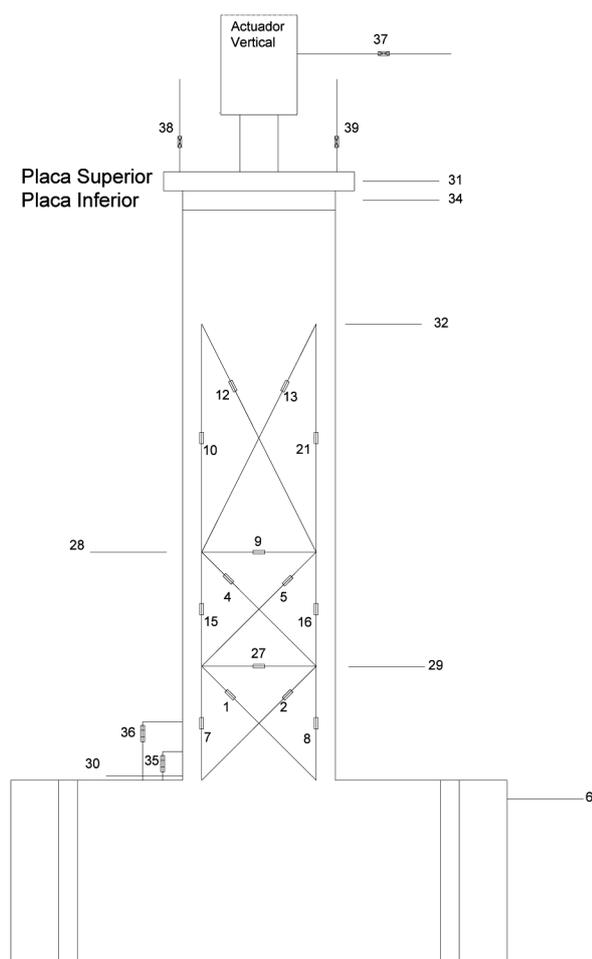


Figura 3 Disposição dos LVDT's

### 3 Estados limite de danos sísmicos

Com a análise dos ensaios experimentais foi possível realizar uma avaliação dos danos neste tipo de pilares ocos. Os danos tipicamente de corte que foram encontrados nestes pilares podem ser resumidamente classificados como: fissuração, destacamento do betão de recobrimento e esmagamento do betão. Depois de quantificados e analisados os danos em função do deslocamento do topo do pilar foi necessário criar diversos patamares de resposta que correspondem aos estados limite de danos sísmicos (ELDS). Os estados limite de danos sísmicos escolhidos para o presente trabalho foram os definidos por Delgado *et al.* [4]. Esses estados limite de danos sísmicos estão em linha com outros estudos e documentos, [5-6].

A metodologia proposta por Delgado *et al.* [4] define um total de quatro estados limite de dano. O primeiro estado de dano é o de danos ligeiros. Neste estado, 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. O segundo

estado de dano, designado de danos moderados, distingue-se face ao anterior estado limite pelo aumento da fendilhação. As fendas apresentam aberturas reduzidas, menores que 1 mm, sendo grande parte das fendas típicas de corte, que atingem um máximo de 1 mm de abertura. O terceiro estado de dano é o estado de danos extensos. Quando um pilar chega a este patamar de danos o elemento já requer atenção e uma reparação significativa. Os danos mais visíveis nos pilares são o aparecimento de fendas até 3 mm de abertura e com uma elevada densidade. Neste estado de dano as fendas são essencialmente de corte nas almas, e nos banzos de flexão, notando-se também o efeito de *shear lag*. As fendas estão distribuídas uniformemente por toda a face do pilar. É possível também observar algum destacamento do betão de recobrimento. O estado de dano mais gravoso é o estado de colapso. Quando os danos no pilar atingem este nível 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. Numericamente este estado é definido quando o esforço de corte é superior ao valor teórico de corte resistente ou ocorre a rotura convencional. A Figura 4 ilustra a evolução dos danos, nos diversos estados limites, do pilar PO2-N6.

Depois de definidos os diversos estados de dano, é necessário identificar um parâmetro de resposta capaz de definir a evolução do dano do pilar em cada um dos estados limite supracitados. Assim, e tendo como finalidade a utilização de um único parâmetro estrutural para todos os estados limite, capaz de ser facilmente avaliado em qualquer modelação numérica, seleccionou-se o parâmetro de resposta *drift* para correlacionar com os danos do pilar. A correspondência entre os quatro estados limite de dano definidos anteriormente e os respetivos valores de *drift* foi estabelecida a partir da análise detalhada dos ensaios experimentais dos pilares ocos, e tendo em consideração a descrição de cada estado limite. A análise aos ensaios experimentais teve principal enfoque no pilar PO2-N6. O Quadro III traduz os valores limite de *drift* associados a cada estado físico de danos

Quadro III Estados limite e correspondente valor de *drift*

Estado Limite	<i>Drift</i> (%)
Ligeiro	0,71
Moderado	1,21
Extenso	2,14
Colapso	3,21

### 4 Técnicas de reparação e reforço

Uma vez definidos os estados limite de danos sísmicos é possível analisar quais as melhores técnicas para a reparação e reforço ao corte dos pilares. Nos pontos seguintes serão descritas quais as

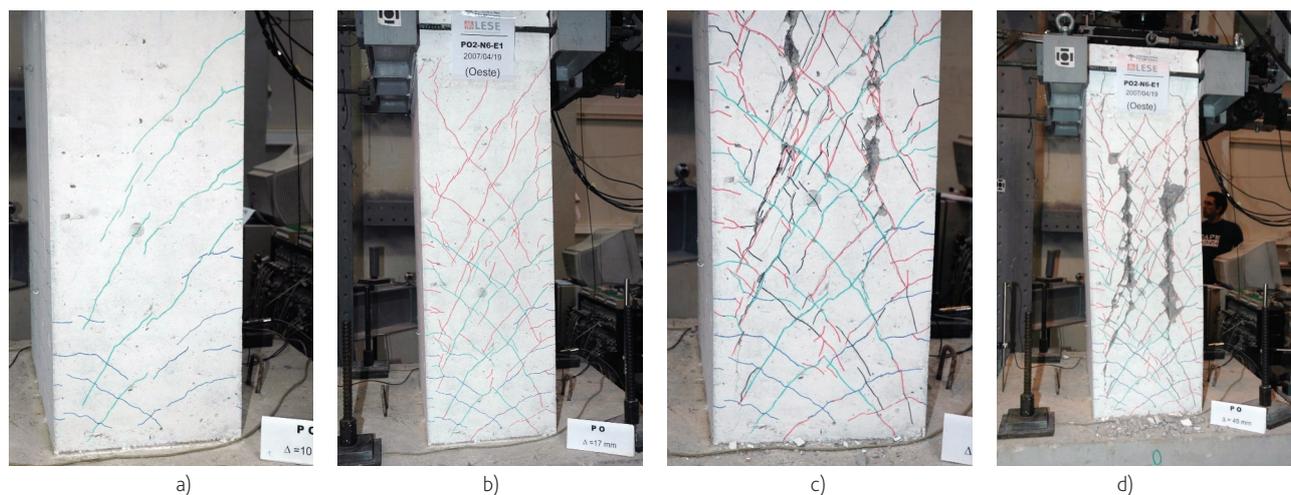


Figura 4 a) Danos ligeiros, b) Danos moderados, c) Danos extensos, d) Colapso

melhores técnicas de reparação e reforço para cada estado de dano. Neste estudo seguiu-se a abordagem e caracterização de técnicas de reparação propostas no projeto de investigação *PRISE – Avaliação de Perdas e Risco Sísmico dos Edifícios em Portugal* [7], financiado pela FCT, no qual os autores deste estudo estiveram envolvidos. Neste projeto foram também estimados os custos unitários dos trabalhos de reparação e reforço estrutural.

#### 4.1 Estado limite de danos ligeiros

Como referido anteriormente, este estado limite é caracterizado por danos pouco relevantes e quase impercetíveis visualmente. Os danos caracterizam-se por abertura de fendas muito pequenas, até 0,5 mm de abertura. Em termos de fendilhação muito pequena, menor ou igual a 0,1 mm, identificam-se três possíveis técnicas de reparação e que podem ocorrer ou não em conjunto, nomeadamente: a pintura da superfície; reboco da superfície do pilar; preenchimento da superfície com resina epóxi. Se as condições de agressividade ambientais forem nulas, não é necessário realizar nenhuma reparação.

A pintura das superfícies de betão dos pilares deve ser realizada segundo o esquema de pintura monocamada de base aquosa. Essa pintura deve ser realizada em duas demãos, com acabamento liso, resistente aos álcalis dos ligantes hidráulicos e cumprindo os mínimos da EN 1504-2 [8]. Esta pintura deverá ser realizada com tintas elásticas com o objetivo de prevenir nova fissuração do pilar. A técnica de reparação de rebocar a superfície consiste num tratamento generalizado das fissuras do pilar, em local não especificado. O mesmo reboco deve ser realizado com uma argamassa adjuvada. A última técnica de reparação para a fendilhação com uma abertura menor que 0,1 mm é a de esfregar a superfície com resina epóxi. A execução desta técnica de reparação consiste na aplicação de produto de impregnação com uma demão, resistente aos álcalis dos ligantes hidráulicos e cumprindo também os requisitos mínimos da EN 1504-2 [8]. A Figura 5 ilustra as técnicas de reparação acima descritas.

Para as aberturas de fendas maiores, para as fendas com aberturas entre os 0,1 mm e os 0,5 mm, a técnica de reparação mais adequada é a injeção de resina epóxi. Essa injeção de resina epóxi deverá respeitar a EN 1504-5 [9], que diz respeito a injeções em estruturas de betão armado. A Figura 6 ilustra a execução desta mesma técnica.



Figura 5 a) Pintura da superfície, b) Rebocar a superfície



Figura 6 Injeção de resina epóxi

## 4.2 Estado limite de danos moderados

O presente estado de dano apresenta abertura de fendas superiores ao do estado anterior, mas não pondo ainda em causa a estabilidade estrutural do elemento. Neste estado de dano as fissuras variam entre os 0,5 mm e 1 mm de abertura. Relativamente à técnica de reparação a utilizar é a mesma que foi identificada no estado de dano anterior, para as fendas maiores, ou seja para as fendas com abertura até 0,5 mm, isto é, injeção de resina epóxi.

## 4.3 Estado limite de danos extensos

No estado limite de danos extensos a abertura de fendas é de aproximadamente 2 a 3 mm, assim como se verifica algum descolamento do betão de recobrimento. Quando um pilar atinge este estado de dano já requer alguma atenção, ou seja, necessita de reparação rapidamente e a estabilidade estrutural está comprometida. Por isso mesmo, poderá ser também necessário proceder a um reforço estrutural do elemento. A técnica de reparação para as fissuras consiste na injeção de resina epóxi, respeitando a EN 1504-5 [9], como referido anteriormente. Quando o pilar apresenta fissuras e já algum descolamento, é necessário proceder à reconstrução do pilar. Relativamente ao reforço estrutural do elemento este pode ser realizado de três formas distintas: aumento da secção com recurso a betão armado; colagem de chapas metálicas; envolvimento do pilar com mantas de fibras de carbono (CFRP).

Quando o pilar apresenta algum descolamento do betão de recobrimento é necessário substituir esse mesmo betão. Em primeiro lugar é necessário remover o betão degradado, limpar e realizar um tratamento da superfície com recurso a um martelo de agulhas. Depois de limpo o betão degradado é necessária a colocação de um novo betão, respeitando a EN 1504-2 [9]. A Figura 7 [10] ilustra o processo de betonagem das zonas onde tenha ocorrido descolamento do betão.

Relativamente ao reforço estrutural é possível proceder-se ao aumento da seção com recurso a betão armado. Esse aumento deve consistir num incremento mínimo, para cada um dos lados, de 50 mm no caso de se usar betão projetado e de 70 mm para

o caso de betão moldado, isto é, é necessário aumentar a secção em pelo menos 100 mm. Relativamente à armadura a adicionar, a armadura longitudinal deverá ter um diâmetro mínimo de 10 mm e a armadura transversal mínima deverá ser de  $\varnothing 8//0,15$  m. Se forem utilizados perfis metálicos, as espessuras mínimas são de 40 mm e de 60 mm, respetivamente, para betão projetado e betão moldado. Relativamente aos perfis metálicos a incorporar, os perfis longitudinais deverão ser cantoneiras de abas iguais, com uma secção mínima de L 50.50.5 mm e os perfis transversais, de secção retangular, com secção mínima de 25.4 mm ou varões de  $\varnothing 10//0,10$  m. No caso de se usar este tipo de reforço é necessário ter o cuidado da amarração das novas armaduras. A Figura 8 ilustra a técnica de reforço utilizando betão armado, mostrando em pormenor a armadura exterior adicional.

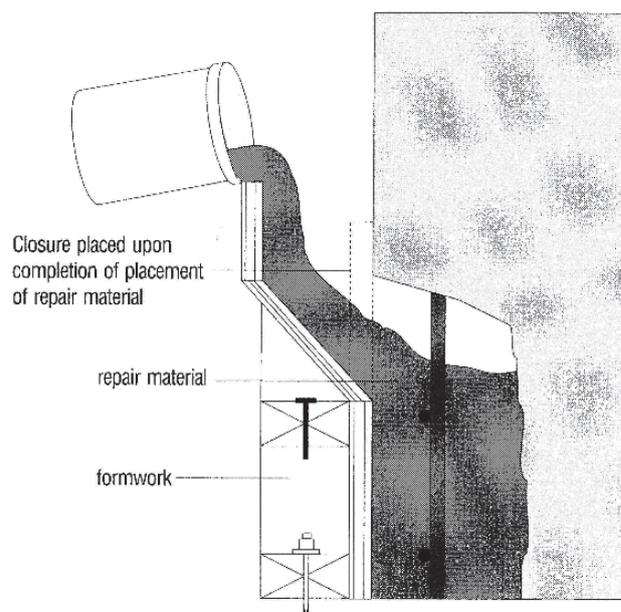


Figura 7 Processo de betonagem das zonas com problemas de descolamento de betão [10]



Figura 8 Pormenor da armadura adicional na técnica de reforço utilizando betão armado

O reforço utilizando perfis metálicos é uma técnica usada quando não há alternativa para realizar o aumento da secção dos pilares. Neste tipo de reforço é necessário ter cuidado com as ligações aos nós existentes. A Figura 9 ilustra o resultado final de um pilar reforçado com adição de perfis metálicos.



Figura 9 Pilar reforçado com perfis metálicos

A última técnica de reforço proposta corresponde ao encamisamento das secções com materiais compósitos, sendo frequentemente utilizado o compósito CFRP. Esta técnica de reforço tem a vantagem de provocar um aumento mínimo da secção e aumentar bastante a sua capacidade resistente. Esta técnica consiste na colagem de mantas de fibras de carbono com recurso a resinas epóxi e depois um acabamento final com uma argamassa própria. Neste tipo de reforço é necessário garantir que as extremidades estão bem coladas, o que é sempre mais gravoso no caso de lajes e vigas. A Figura 10 ilustra o resultado final de um pilar reforçado com CFRP. Todas estas colagens referidas nos reforços anteriores têm de respeitar a norma EN 1504-4 [11]. Este tipo de reforço ao corte de pilares ocios de betão armado com mantas de CFRP foi amplamente testado por Delgado *et al.* [1, 3], não tendo sido conclusiva a necessidade e o benefício do reforço dos pilares pelo seu interior.



Figura 10 Pilar reforçado com CFRP

#### 4.4 Estado limite de colapso

Como referido anteriormente, o estado limite de dano correspondente ao colapso é caracterizado por um grande destacamento do betão de recobrimento e no qual a resistência teórica é ultrapassada. Assim, quando um pilar atinge este estado de dano, torna-se economicamente inviável a sua reparação. Caso não seja possível a operação de demolição, não existe nenhuma técnica de reparação exequível sendo apenas possível proceder ao reforço estrutural, usando as técnicas de reforço acima descritas.

### 5 Estimativa de custos de reparação e reforço estrutural por técnica construtiva

Neste capítulo serão apresentados os custos associados a cada técnica de reparação e reforço, a aplicar aos pilares danificados. No final será apresentada a evolução dos custos em função dos estados de dano e a relação entre o custo de reparação/reforço e o custo de demolição e construção de um novo pilar. Acrescenta-se que os custos unitários associados a cada trabalho e técnica foram quantificados no âmbito do projeto de investigação PRISE.

#### 5.1 Estado limite de danos ligeiros

Ao presente estado limite de dano estão associados os trabalhos de pintura das superfícies, estando refletido no custo unitário de 10 €/m<sup>2</sup> desta técnica o fornecimento, carga, transporte, descarga e aplicação. Considerando que se irá pintar toda a superfície do pilar em estudo (PO2-N6), o custo de pintura do mesmo será de 37,8 €. No caso de ser também necessário rebocar a superfície do pilar com uma argamassa adjuvada, esta técnica terá um custo unitário de 8 €/m<sup>2</sup>, e o custo total de reparação seria de 30,2 €. Se, por outro lado, for necessário recorrer à aplicação superficial de resina epóxi, com o custo unitário de 13 €/m<sup>2</sup>, o custo de reparação utilizando esta técnica seria de 49,1 €.

Se as fissuras apresentarem aproximadamente uma abertura de 0,5 mm, deverá utilizar-se a injeção de resina epóxi, que tem um custo de 10 €/m. O custo unitário desta técnica inclui a limpeza da superfície envolvente, todos os trabalhos e materiais. Assim, assumindo-se uma densidade de fissuras de 6 m/m<sup>2</sup> de superfície, e cerca de 50% da superfície do pilar fissurada, esta técnica representará um custo de 113,4 €. Para que a superfície fique igual à superfície inicial é necessário proceder à pintura da mesma. O Quadro IV ilustra a evolução dos preços de reparação em função do *drift* em danos ligeiros.

Quadro IV Custos das técnicas de reparação em função do *drift* para o estado de danos ligeiros

Técnica de reparação	Drift	Custo
Pintura da superfície	0,36%	37,8 €
Rebocar a superfície	0,36%	30,2 €
Esfregar resina epóxi	0,36%	49,1 €
Injeção de resina epóxi	0,71%	151,2 €

## 5.2 Estado limite de danos moderados

Como referido anteriormente, a técnica de reparação a aplicar para este nível de danos corresponde à injeção de resina epóxi. Considerando que a densidade das fissuras é de 8 m/m<sup>2</sup> e que 100% da superfície do pilar está fissurada, esta técnica terá um custo de 302,4 €. Para que a superfície fique igual à superfície inicial é necessário proceder à pintura da mesma. O Quadro V ilustra a evolução dos preços de reparação em função do *drift* em danos moderados.

**Quadro V** Custos das técnicas de reparação em função do *drift* para o estado de danos moderados

Técnica de reparação	<i>Drift</i>	Custo
Injeção de resina epóxi	1,21%	340,2 €

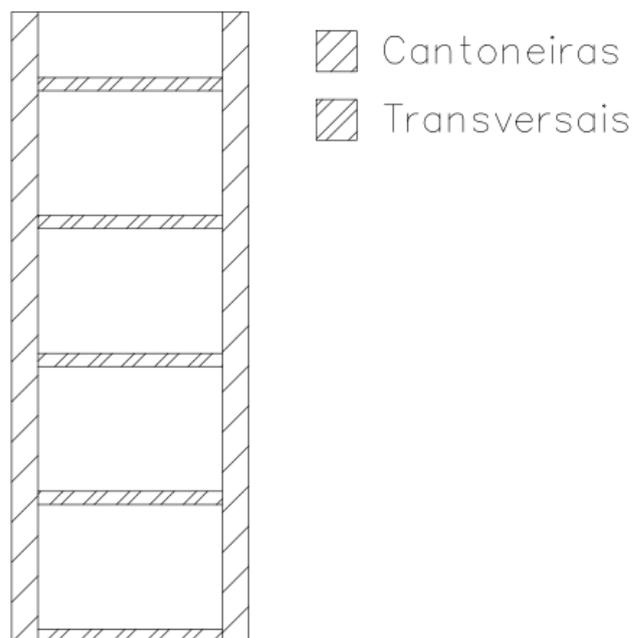
## 5.3 Estado limite de danos extensos

Neste estado de dano é possível distinguir dois tipos distintos de intervenção e respetivos custos. O primeiro é o custo associado à reparação do pilar e o segundo é o custo de reforço estrutural do pilar. Neste estado de dano, como referido anteriormente, verificam-se fissuras e algum destacamento de betão. A técnica de reparação para as fissuras é também a injeção de resina epóxi. Considerando que a densidade das fissuras é de 10 m/m<sup>2</sup> de superfície e que 100% da superfície do pilar está fissurada, esta técnica terá um custo de 378,0 €. A técnica de reparação para o dano de destacamento do betão de recobrimento é a limpeza da envolvente e aplicação de um novo betão. O custo desta técnica de reparação inclui a reparação do pilar com aplicação de uma argamassa, incluindo a remoção do betão degradado, limpeza e tratamento da superfície com recurso a martelo de agulhas, fornecimento, colocação, materiais, equipamentos e execução. Considerando que no nível de *drift* mais elevado existirão 4 faixas de betão destacado com cerca de 5 cm de espessura (sendo colocados 10 cm de betão, visto ser necessário proceder à limpeza das beiras do betão degradado) e 1,20 m de altura, o custo final desta reparação será de 7,20 €. Portanto, para reparar um pilar que atingiu este estado de dano, o custo será de 45 €, isto porque é necessário reparar tanto as fissuras como o betão destacado. No final e para que o pilar fique idêntico ao original é necessário proceder à pintura do mesmo. Essa pintura terá um custo total de 37,8 €, visto ser necessária a pintura de toda a superfície. Sendo assim o custo final de execução desta reparação é de 423,0 €.

Relativamente ao reforço estrutural do pilar, existem três tipos de reforço. O primeiro tipo é realizado através do aumento da secção do pilar com o encamisamento com betão armado. O custo desta técnica de reforço, para o caso do pilar PO2-N6, será de 114,4 €.

Se a técnica de reforço estrutural a usar for a colagem de perfis metálicos, já é necessária a consideração de dois preços: o custo de reparação do betão destacado e o custo de aplicação dos perfis metálicos. O preço de reparação do betão degradado é igual ao acima descrito. Relativamente ao reforço com chapas metálicas, o custo total refere-se à aplicação de chapas metálicas em aço de qualidade não ligado laminado a quente, de classe de resistência

S275 JR, coladas e fixadas mecanicamente com resina epóxi e bucha. Assim, serão aplicadas 4 cantoneiras na longitudinal e 20 barras na transversal. Como já referido anteriormente, a secção mínima das cantoneiras é de 50.50.5 mm e das barras transversais a secção a utilizar é de 25.5 mm. As barras transversais são aplicadas a igual distância e com um espaçamento de 0,25m. A Figura 11 ilustra a disposição das chapas metálicas a aplicar. O peso das cantoneiras é de 3,77 kg/m e o das chapas transversais é de 0,98 kg/m. Assim será necessário um total de 18,1 kg para as cantoneiras, e para as barras transversais um total de 11,27 kg, perfazendo um total 29,37 kg, a que corresponde um custo de 146,85 €. Somando o preço do aço a aplicar com o preço de reparação do betão degradado, o custo total de reforço do pilar é de 154,1 €. No final e para que o pilar fique idêntico ao original é necessário proceder à pintura do mesmo. Sendo assim, o custo final de execução desta reparação é de 191,9 €.



**Figura 11** Disposição das chapas metálicas a aplicar

No caso de se reforçar o pilar através da aplicação de mantas de CFRP, há que considerar duas fases: a reparação do betão degradado, com um custo igual ao referido anteriormente; e posteriormente a aplicação das próprias mantas de fibra de carbono. No custo desta segunda parte dos trabalhos, de 40 €/m<sup>2</sup>, está incluída a aplicação das mantas de fibra de carbono, coladas com resinas epóxi, fornecimento, limpeza e preparação da superfície, o preenchimento com uma camada de recobrimento com reboco tradicional com 1,5 cm, todos os trabalhos, materiais e a execução. A Figura 12, ilustra a disposição das mantas de CFRP. O custo total da reparação e reforço do pilar é de 206,1 €. Sendo no final necessário proceder à pintura do pilar, o custo final de execução desta reparação é de 243,9 €.

O Quadro VI ilustra a evolução dos preços de reparação e reforço em função do *drift* para o estado limite de danos extensos.



Figura 12 Disposição das mantas de CFRP a aplicar

Quadro VI Custos das técnicas de reparação em função do *drift* para o estado de danos extensos

Técnica de reparação	<i>Drift</i>	Custo
Betonagem e Injeção	2,14%	423,0€
Encamisamento com BA	2,14%	114,4€
Chapas metálicas	2,14%	191,9€
CFRP	2,14%	243,9€

## 5.4 Estado limite de colapso

Na secção anterior referiu-se que para o estado limite de colapso é economicamente inviável a reparação ou reforço do pilar. Deste modo, a demolição e a construção de um novo pilar correspondem aos trabalhos a aplicar neste caso. Assim, o custo total irá refletir a demolição do pilar com a respetiva triagem na própria obra, reciclagem de todos os materiais, carga, transporte e descarga, todas as tarefas acessórias necessárias para a efetivação dos trabalhos, assim como para a limpeza do local. Portanto, o custo de demolição do pilar PO2-N6 é de 20,2 €. O custo de construção de um novo pilar é de 353,2 € para o betão, correspondendo à execução de um pilar em betão armado normal “cinzento”, incluindo o fornecimento, colocação, compactação e cura do betão. O betão tem incorporação de hidrófugo inclui-se, ainda, transporte, montagem, óleo descofrante e limpeza de cofragem para betão à vista com superfície lisa e escoramento. Relativamente à armadura, no custo estão incluídos o fornecimento, colocação, carga e descarga, desperdícios e empalmes e elementos de montagem de armaduras e todos os trabalhos, materiais e execução. Assim, o preço da armadura (como descrito no capítulo 2) é de 31,7 €. Portanto, o preço total de demolição e

construção deste pilar em betão armado é de 444,1 €. Os presentes preços unitários foram retirados do gerador de preços da Top Informática (<http://www.topinformatica.pt/>).

O Quadro VII ilustra a evolução dos preços de reparação em função do *drift* para o estado limite de colapso.

Quadro VII Custos das técnicas de reparação em função do *drift* para o estado limite de colapso

Técnica de reparação	<i>Drift</i>	Custo
Demolição e construção	3,21%	444,1€

## 5.5 Evolução de custos de intervenção estrutural

Depois de analisados os custos de cada técnica de reparação e reforço estrutural é necessário perceber como é que ocorre a evolução do custo em função da resposta estrutural, considerando neste caso o *drift* como parâmetro de resposta. Assim, será possível quantificar o peso económico de cada estado limite para a reparação ou reforço do pilar. Esta informação encontra-se presente na Figura 13.

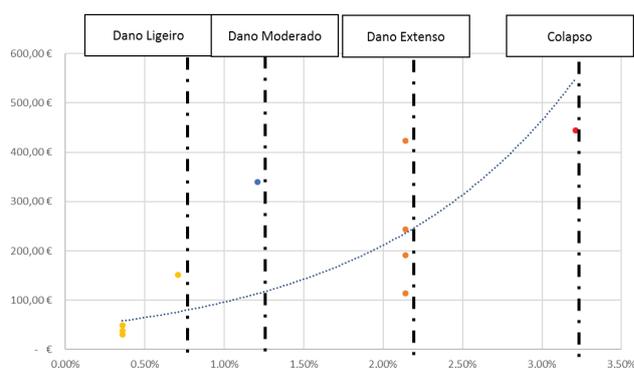


Figura 13 Evolução dos custos de reparação e reforço em função do *drift* em colapso

A figura anterior procura representar os custos desagregados por técnica de reparação ou reforço, para cada estado limite de dano. Analisando esta informação podemos concluir que a evolução do custo é uma evolução exponencial. No entanto, identifica-se um custo que se afasta significativamente da curva ajustada, sendo esse o valor do reforço estrutural utilizando chapas metálicas. A evolução dos custos pelos diferentes estados de danos é traduzida pela expressão (1) (coeficiente de determinação  $R^2 = 0,64$ ).

$$y = 43,704 * e^{78,846x} \quad (1)$$

Como forma de melhor identificar o impacto de cada estado limite no custo de reparação e para verificar a sua viabilidade económica, optou-se por representar a mesma evolução em termos do rácio de custo de reparação por custo de substituição do pilar, ilustrando-se essa evolução na Figura 14. O Quadro VIII mostra o custo de cada técnica bem como o rácio anteriormente descrito.

Analisando o rácio de todas as técnicas de reparação e reforço estrutural, pode-se verificar que existe uma evolução constante e

crecente entre os diferentes estados de dano. No entanto, é de notar que o rácio do reforço estrutural é bastante inferior ao rácio da técnica de reparação para esse mesmo estado de dano. Em relação as técnicas de reforço pode-se concluir que a técnica de reparação mais vantajosa é o encamisamento com BA, tendo as restantes técnicas quase o mesmo rácio. Simultaneamente, identifica-se que a utilização de CFRP corresponde à técnica mais dispendiosa.

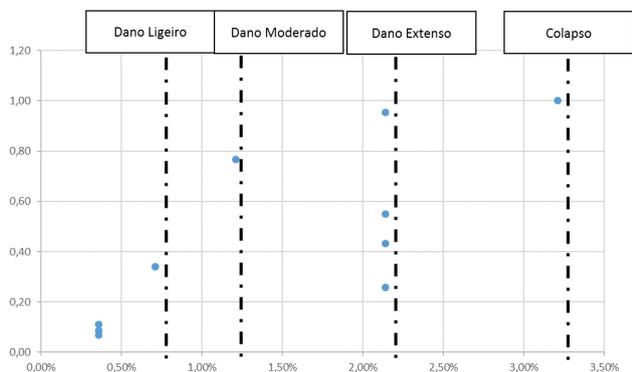


Figura 14 Rácio preço reparação/preço novo pilar vs. drift

Quadro VIII Custo e rácio de cada técnica de reforço/reparação

EL Dano	Técnica de reparação/Reforço	Drift	Preço	Rácio
Ligeiro	Pintura	0,36%	37,8 €	0,09
	Rebocar	0,36%	30,2 €	0,07
	Esfregar Resina epóxi	0,36%	49,1 €	0,11
	Injeção de Resina epóxi	0,71%	151,2 €	0,34
Moderado	Injeção de Resina epóxi	1,21%	340,2 €	0,77
Extenso	Betonagem e Injeção	2,14%	423,0 €	0,95
	Encamisamento com BA	2,14%	114,4 €	0,26
	Chapas Metálicas	2,14%	191,9 €	0,43
	CFRP	2,14%	243,9 €	0,55
Colapso	Demolição e construção	3,21%	444,1 €	1,00

A Figura 15 ilustra a evolução do rácio em função do drift, para cada técnica de reparação (sendo de notar que se exclui desta análise os custos de reforço). A evolução do custo, tal como se mostrou anteriormente, é crescente, sendo possível ajustar uma função polinomial de 2.º grau a esta tendência.

Como se mostra na figura anterior, a qualidade do ajuste é elevada (coeficiente de determinação de 0,98), o que faz com que esta função contínua de transferência de danos em custos forneça 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.

$$y = -0,0464x^2 + 0,5218x - 0,426 \quad (2)$$

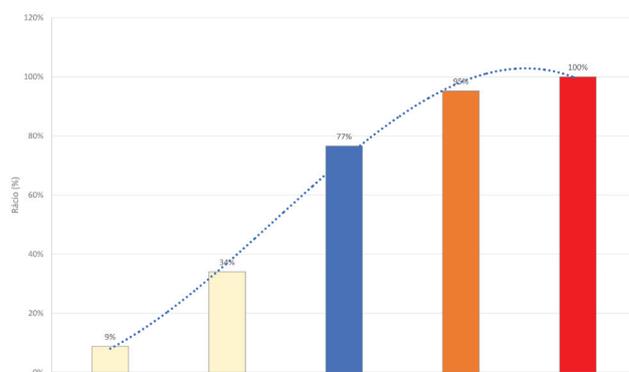


Figura 15 Evolução do rácio em % em função do drift limite das técnicas de reparação

## 6 Conclusões

No presente estudo foi analisada a evolução dos danos estruturais em pilares ocios de betão armado (cujo comportamento é também representativo de paredes de betão armado) devidos à ação dos sismos, com a finalidade de definir estados limite de dano, e que assenta nas propostas apresentadas em Delgado *et al.* (2016). A estas informações associaram-se técnicas de reparação e reforço admissíveis e típicas da realidade da construção em Portugal. Foram, por fim, estimados os respetivos custos, o que permitiu caracterizar a evolução dos custos de reparação e reforço dos pilares em função da resposta estrutural. Este trabalho teve como ponto de partida a definição das técnicas construtivas e dos seus custos unitários, estabelecidos no âmbito do projeto PRISE.

Deste modo foi possível observar a tendência de evolução crescente do tipo de danos estruturais (quantificado pelo parâmetro de resposta drift), e estado limite, com o custo de reparação estimado para as técnicas propostas. Ao mesmo tempo, identificou-se que esta evolução do custo é exponencial, sendo traduzida pela equação (1). Em relação ao reforço dos pilares é de notar que a solução do reforço do pilar utilizando CFRP é aquela que representa um custo mais elevado, de entre as técnicas apresentadas.

A evolução do rácio custo de reparação (ou reforço) por custo de substituição do pilar permitiu concluir quanto à viabilidade da introdução de uma determinada técnica de reparação. Através desta evolução, que pode ser traduzida por um polinómio de 2.º grau, equação (2), podemos também concluir que para o estado de dano moderado a melhor solução passa por demolir o pilar e reconstrução do mesmo dado que o custo de reparação é muito semelhante ao custo de demolição e reconstrução. Neste estado, visto o pilar estar muito danificado, o custo de reparação é muito superior em relação ao custo de demolição e construção de um novo, sendo que os custos podem variar significativamente entre técnicas e até ser economicamente mais vantajoso o reforço.

Assim, o estudo que se apresentou serve como uma base de trabalho para uma análise mais detalhada de custo e benefício para a intervenção estrutural em pilares ocios de betão armado, podendo ser igualmente importante para análises de risco sísmico ao nível do edifício ou a uma escala regional.

## Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: Projeto POCI-01-0145-FEDER-007457 – CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P.



## Referências

- [1] Delgado, P. – *Avaliação de Segurança Sísmica de Pontes*. Porto: FEUP, 2009.
- [2] Delgado, R.; Delgado, P.; Vila Pouca, N.; Arêde, A.; Rocha, P., Costa, A. – “Shear effects on hollow section piers under seismic actions: experimental and numerical analysis”. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2009; 7:377-89.
- [3] Delgado P.; Arêde, A.; Vila Pouca, N.; Rocha, P.; Costa, A.; Delgado, R. – “Retrofit of RC Hollow Piers with CFRP Sheets”. *Composite Structures*. 2012, 94: 1280-1287.
- [4] Delgado, P.; Sá, N.; Marques, M.; Arêde, A. – “Metodologia para caracterização de estados limite de dano sísmico em pilares ocos”. *Sísmica2016 – 10.º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica*, Açores, 2016.
- [5] Rodrigues, H.; Arêde, A.; Varum, H.; Costa, A. – “Damage evolution in reinforced concrete columns subjected to biaxial loading”. *Bull Earthquake Eng*, 2013, 1517-1540.
- [6] FEMA – HAZUS MR4. Washington DC: National Institute of Building Sciences, 2003.
- [7] 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>)
- [8] CEN, 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. 2006.
- [9] CEN, 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. 2006.
- [10] Kamran, M. N. – *Point Shilshole Condominium Building Concrete Deterioration*. Seattle 2006.
- [11] CEN, NP EN 1504-4 – Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 4: Colagem estrutural. Brussels: European Standard. 2006.

