

## **Simulação numérica do reforço de uma ligação viga-pilar de edifícios industriais pré-fabricados em betão armado**

**Nádia Batalha**

*CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Portugal,  
up201809163@edu.fe.up.pt*

**Hugo Rodrigues**

*RISCO, Universidade de Aveiro, Portugal, hrodrigues@ua.pt*

**Romain Sousa**

*CDRSP, ESTG, Politécnico de Leiria, Portugal, romain.r.sousa@ipleiria.pt*

**Humberto Varum**

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

### **Resumo**

Os edifícios pré-fabricados industriais de betão armado (BA) são comuns no parque industrial português, bem como em toda a Europa. Em sismos recentes, esta tipologia de edifícios apresentou um fraco desempenho ao nível estrutural, nomeadamente nas ligações entre vigas e pilares. Em levantamentos recentes ao parque industrial português constatou-se que a maioria dos edifícios construídos antes de 1980 apresenta ligações viga-pilar que podem apresentar um comportamento deficiente. Assim, considerou-se adequado e necessário propor uma solução de reforço da ligação viga-pilar. Foi realizado um estudo numérico focado no comportamento sísmico da ligação com e sem a solução de reforço. A solução numérica foi desenvolvida com base nas principais conclusões dos ensaios experimentais de uma ligação viga-pilar anteriormente realizado, com foco nas principais deficiências encontradas. A solução apresentada pretende ser simples de aplicar e não provocar interrupções significativas a fim de não prejudicar a atividade laboral. O estudo sísmico foi feito recorrendo a análises não lineares estáticas e dinâmicas.

**Palavras-chave:** Edifícios pré-fabricados, Solução de reforço, Estudo numérico, Ligação viga-pilar

Os danos causados por sismos recentes em elementos estruturais e não estruturais de edifícios industriais pré-fabricados de betão armado (BA) expuseram a vulnerabilidade deste tipo de estruturas, em particular as que foram dimensionadas sem disposições sísmicas [1]–[5]. De acordo com Bournas *et al.* [6], após o sismo de Emilia Romanha em 2011, mais da metade das estruturas pré-fabricadas existentes exibiram danos significativos. O desempenho sísmico de estruturas pré-fabricadas é amplamente regido pelo comportamento dos elementos que garantem a ligação entre os elementos estruturais e entre estes e os elementos não estruturais[1], [4]–[7],[8]. O desempenho das ligações viga-pilar, que normalmente são garantidas por atrito ou atrito e ligação mecânica (ferrolhos), representa um dos aspectos mais críticos, especialmente na ausência de ferrolhos e detalhe sísmico deficiente devido à falta de exigências de dimensionamento [9], [8]. Nesse sentido, o estudo de soluções de reforço deste tipo de estruturas tem aumentado com o objetivo de melhorar a resposta sísmica. [10]–[12].

O presente trabalho tem como objetivo o estudo das ligações viga-pilar garantidas apenas por atrito num edifício industrial pré-fabricado típico europeu, propondo uma solução de reforço sísmico. O modelo proposto visa melhorar o comportamento local da ligação viga-pilar, evitando o colapso precoce da estrutura pela falta de apoio da viga. Também será feita uma comparação entre a estrutura reforçada e a estrutura original (sem qualquer tipo de reforço). O estudo da resposta sísmica será feito por meio de métodos não lineares estáticos e dinâmicos. Será feita uma análise global do comportamento da estrutura, com e sem a solução de reforço, em termos de drift.

## 2.1 Danos recorrentes nas ligações viga-pilar

As ligações entre os elementos estruturais são um dos aspectos mais importantes em estruturas pré-fabricadas [4]. Por sua vez, também são a fonte de muitos danos face à ação sísmica. Muitos autores referem as ligações em estruturas pré-fabricadas como a principal origem de danos estruturais [1], [4], [6], [7]. Mustafa [13] relatou os danos causados pelos sismos de Kocaeli e Düzce (Turquia) em 1999. A rigidez, resistência e a deficiente promenorização são apontadas como as principais causas de falha da ligação viga-pilar. Recentemente, também os sismos em Emilia-Romanha (Itália) em 2012 deram origem a vários trabalhos relacionados com estruturas pré-fabricadas. Por exemplo, Belleri *et al.* [14] referem como o dano mais gravoso ocorrido durante os sismos de Emília-Romanha em 2012 a queda da viga principal devido à falta de ligação mecânica entre a viga e o pilar como a Figura 1 sugere. Este dano ocorre quando o cachorro já não consegue acomodar mais os deslocamentos da viga e como não tem qualquer dispositivo mecânico (ferrolhos) na ligação entre o pilar e a viga, esta acaba por deslizar sobre o pilar até perder totalmente o suporte e cair. Outro problema associado à ligação viga - pilar é o comportamento para fora do plano das vigas, causando danos ao nível da ligação, no caso dos edifícios italianos, nos garfos da ligação.



Figura 1. Perda de suporte da viga devido à falha da ligação viga-pilar

## 2.2 Caracterização das ligações viga-pilar

Na Europa, a tipologia mais comum da ligação viga-pilar em edifícios industriais pré-fabricados em BA é a ligação viga-pilar conectados mecanicamente por ferrolhos [15]. Como ilustrado na Figura 2a), neste sistema a viga é mecanicamente ligada ao pilar por meio de ferrolhos verticais de aço. Esses ferrolhos, geralmente um ou dois, saindo do cachorro do pilar, encaixam-se nas mangas (negativos) deixadas junto do limite das vigas, que são posteriormente preenchidas com argamassa. Em vários casos, uma placa de neoprene é colocada entre o pilar e a viga. Estas ligações não restringem as rotações entre ambos os elementos, e a transferência de forças horizontais entre a viga e o pilar é essencialmente assegurada por atrito e mecanicamente, através dos ferrolhos. O outro tipo de ligação viga-pilar normalmente utilizadas nesta tipologia de edifícios são as ligações de atrito, representado na Figura 2b). A diferença entre a anterior é a ausência do ferrolho. Por este motivo neste tipo de ligações a transferência de forças horizontais da viga para o pilar adjacente é assegurada essencialmente pelo atrito entre estes elementos e a placa de neoprene, tornando este tipo de ligação mais vulnerável a ações sísmicas, como está representado na Figura 1, devido à falta de elementos mecânicos.

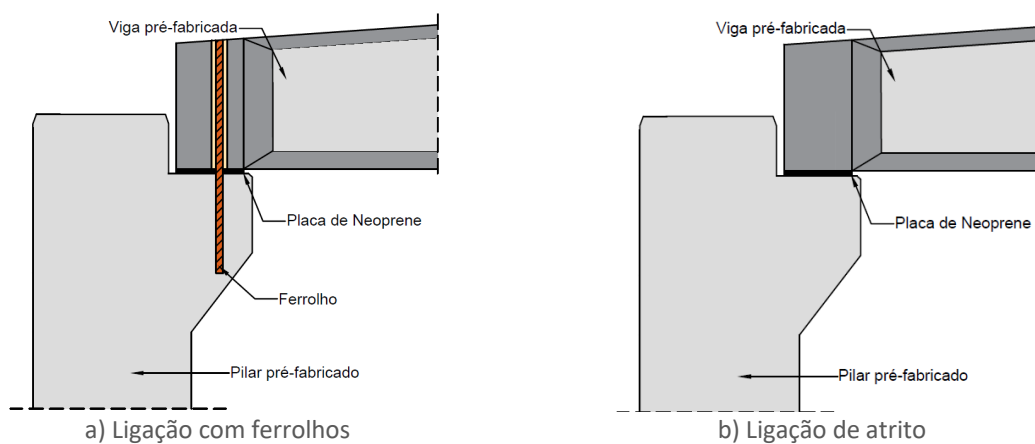


Figura 2 – Esquema da ligação entre viga-pilar comum na Europa

### 3 Caso de Estudo

#### 3.1 Descrição estrutural da estrutura original

A estrutura original do edifício industrial pré-fabricado em BA em estudo é um edifício com 1 piso constituído por um sistema porticado de vigas e pilares. O edifício é constituído por 5 vãos na direção x com 35 m de comprimento cada um, e 15 vãos na direção y com 12 m de comprimento cada um. Em planta o edifício tem uma área de  $175 \times 180 \text{ m}^2$ .

A estrutura é constituída por pilares de 12 m de altura com uma seção retangular de  $0,70 \times 0,50 \text{ m}^2$  com 40 mm de recobrimento. As vigas são pré-esforçadas com seção variável em I, com 35 m de comprimento e 30 mm de recobrimento.

#### 3.2 Descrição da solução de reforço adoptada

A solução de reforço proposta da ligação está representada esquematicamente na Figura 3 e em maior detalhe na Figura 4. A solução proposta será feita por meio de um conjunto de elementos metálicos a fim de ligar o pilar e a viga, e assim reduzir os deslocamentos relativos na ligação induzidos pelas ações sísmicas.

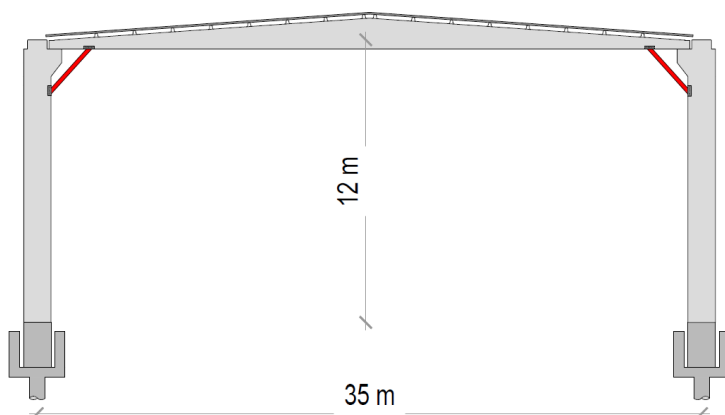


Figura 3 – Esquema do reforço proposto para a ligação viga-pilar

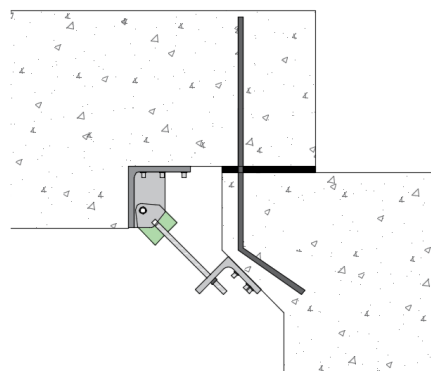


Figura 4 – Detalhe da ligação viga-pilar proposta

A solução de reforço proposta é constituída por quatro peças metálicas ligadas entre si: 2 soluções compostas com cantoneiras de  $150 \times 150 \times 18 \text{ mm}$  (uma colocada superiormente que liga à viga e outra colocada inferiormente que liga ao cachorro do pilar), dois varões roscados de 310 mm de comprimento com 16 mm de diâmetro e uma peça para fazer a ligação dos varões à peça superior. A solução é constituída por um aço A275.

#### 3.3 Modelação numérica

Foram realizadas análises não lineares estáticas e dinâmicas. Para realizar as análises, foi escolhido o software de análise estrutural *Opensees*. A estrutura foi modelada em 2D, representativa de um

pórtico do edifício apresentado anteriormente. As vigas foram modeladas como elementos com comportamento linear elástico. Os pilares foram modelados através de elementos com plasticidade distribuída e as secções com elementos de fibras.

O betão utilizado na modelação foi o proposto por Kent-Scott-Park com rigidez de carga / descarga linear com degradação, denominada *Concrete 01* [16], [17]. Para o aço foi escolhido o modelo *Steel 02* proposto por Menegotto & Pinto [18]. A modelação das ligações viga-pilar consistiu num elemento *zero-length* (o nó final da viga e do pilar possuem as mesmas coordenadas), conforme representado na Figura 5. Neste tipo de ligações viga-pilar, a transferência das forças da viga para o pilar adjacente (força de inércia no caso de um sismo) é assegurada essencialmente pelo atrito entre esses elementos e a placa de neoprene, à semelhança do modelo proposto por Sousa *et al.* [19]. Se essa força for menor que a força correspondente ao atrito estático, a deformação da ligação é igual à deformação transversal da placa de neoprene. A partir do momento que a força aplicada seja igual à força correspondente ao atrito estático, a ligação não consegue aguentar forças laterais superiores e a deformação lateral aumenta, através do escorregamento da viga, enquanto a deformação da placa de neoprene permanece constante com uma amplitude correspondente à da aplicação da força de atrito estático. Este comportamento é replicado com as duas molas alinhadas em série no modelo *zero-length* representado na Figura 5.

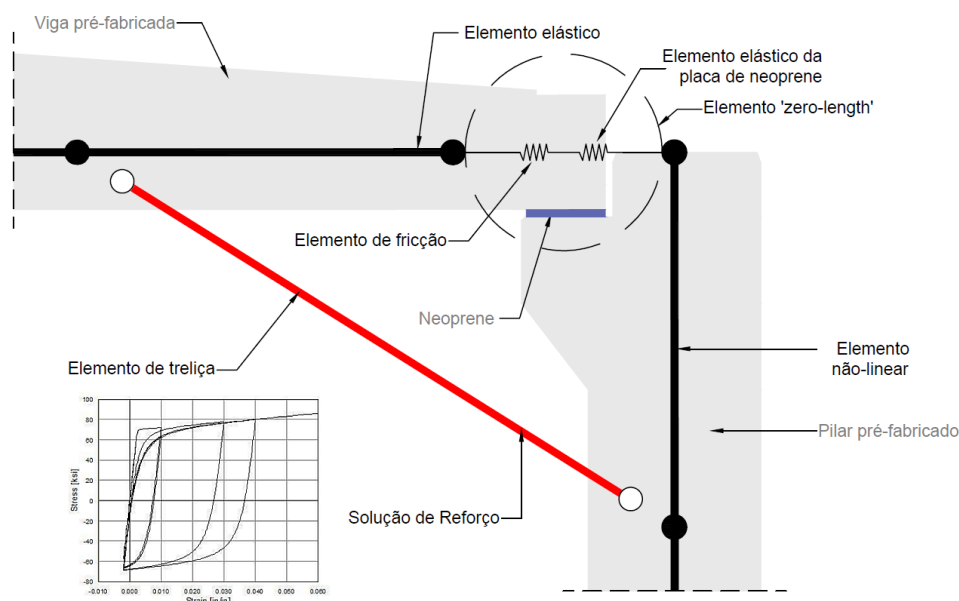


Figura 5 – Elementos numéricos versus elementos na ligação reforçada

A solução de reforço foi modelada com um elemento de treliça, representado a vermelho na Figura 5 e o material utilizado foi o *Steel 02* proposto por Menegotto & Pinto [18].

## 4 Resultados

A análise pushover foi feita aplicando uma força lateral equivalente ao nível do primeiro andar, ou seja, onde a massa foi introduzida, de forma a simular as forças induzidas pela componente horizontal da ação sísmica. A curva pushover obtida é a que está representada na Figura 6.

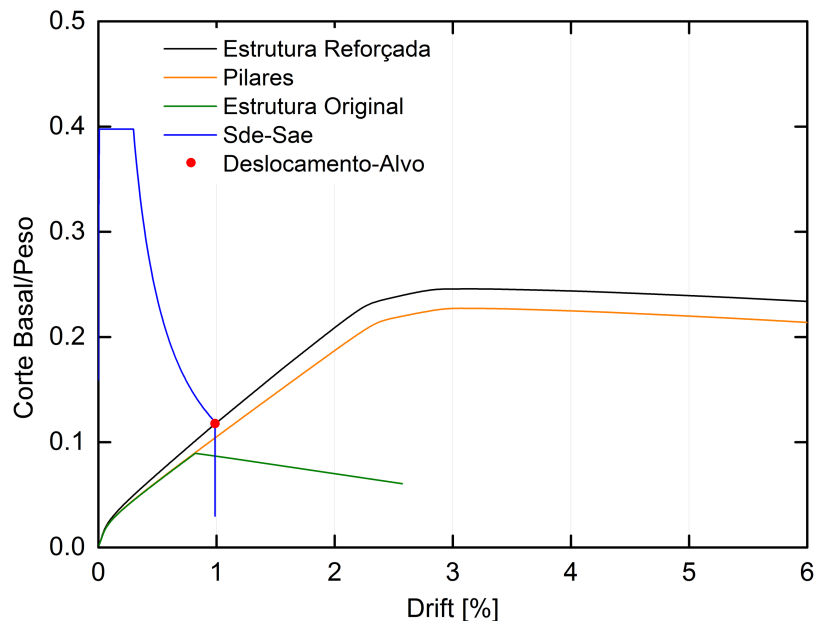


Figura 6 – Curva pushover

Através da curva representada na Figura 6, pode-se concluir que a cedência da estrutura com a ligação reforçada ocorre para um drift de aproximadamente 2,2%, correspondendo a um corte basal de aproximadamente 133 kN. O deslocamento-alvo, representado pelo ponto a vermelho na Figura 6, foi obtido a partir do método N2, descrito no Eurocódigo 8 – Parte 1 [20]. A curva laranja representa a curva de capacidade dos pilares e a verde representa a curva de capacidade da estrutura original. Comparando estas duas curvas pode-se concluir que o baixo desempenho da estrutura original deve-se ao fraco desempenho das ligações de atrito viga-pilar. Com a solução de reforço das ligações, a estrutura melhorou o seu desempenho frente às cargas impostas, representada pela curva preta.

Para a análise não-linear dinâmica foram utilizados um conjunto de 20 registos sísmicos selecionados a partir de eventos reais de acordo com o método proposto por Araújo *et al.* [21]. As acelerações foram divididas em 10 registos do Tipo 1 (Figura 7a) e 10 registos do Tipo 2 (Figura 7b). Acelerações de solo unidireccionais foram aplicadas para cada análise. O espectro elástico correspondente é mostrado na Figura 7.

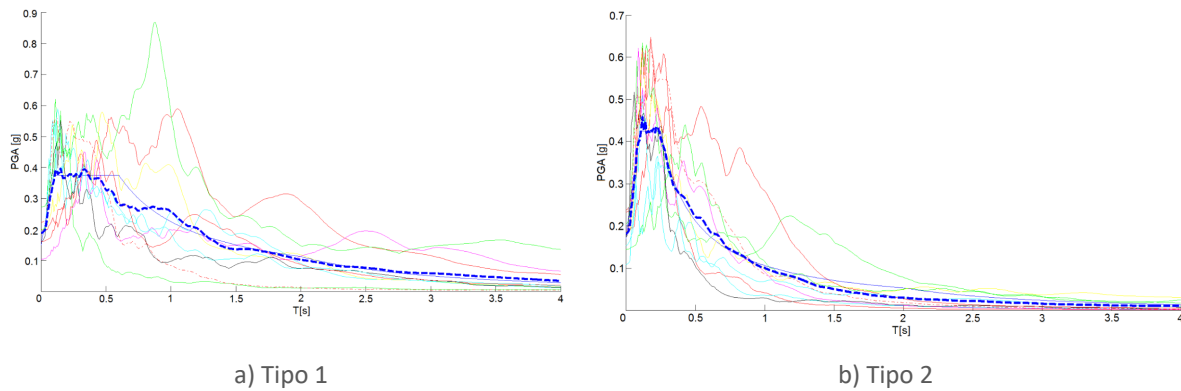


Figura 7 – Espectro elástico de acelerações do solo utilizado

As figuras a seguir apresentadas representam os resultados das análises dinâmicas em termos de drift e das acelerações que os diferentes sismos induziram na estrutura. As linhas laranja correspondem aos sismos do Tipo 1 e as verdes correspondem aos sismos do Tipo 2, em ambas as figuras. A Figura 8 representa os resultados da estrutura original (sem reforço), enquanto a Figura 9 representa os resultados da estrutura com o reforço da ligação.

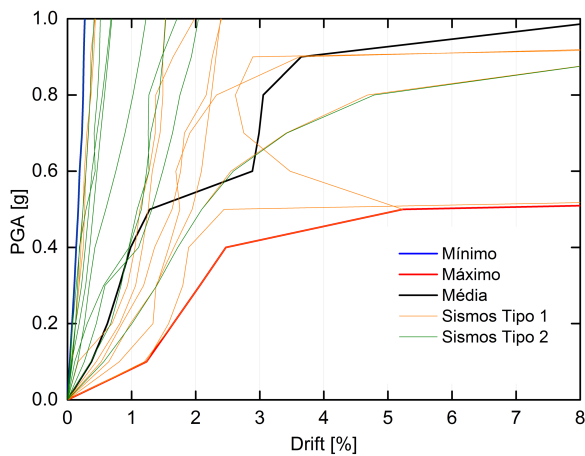


Figura 8 – PGA vs Drift para os diferentes sismos considerados na análise da estrutura não reforçada (original)

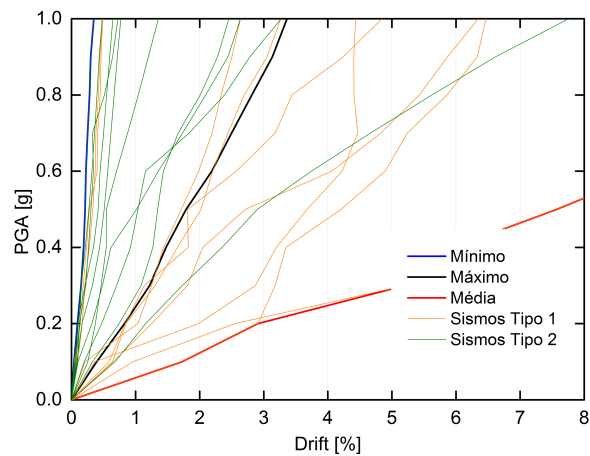


Figura 9 – PGA vs Drift para os diferentes sismos considerados na análise da estrutura reforçada

Comparando as figuras anteriores, pode-se concluir que a estrutura com o reforço da ligação leva a maiores *drifts*, o que é espetável uma vez que a solução de reforço leva a uma maior exigência dos pilares, já que há uma nova ligação que une o pilar e a viga. Assim, a figura a seguir (Figura 10) compara a ligação viga-pilar antes e depois da implementação da solução de reforço. Apenas os resultados relacionados aos sismos do Tipo 1 serão exibidos, pois é o que mais condiciona a resposta sísmica da estrutura.

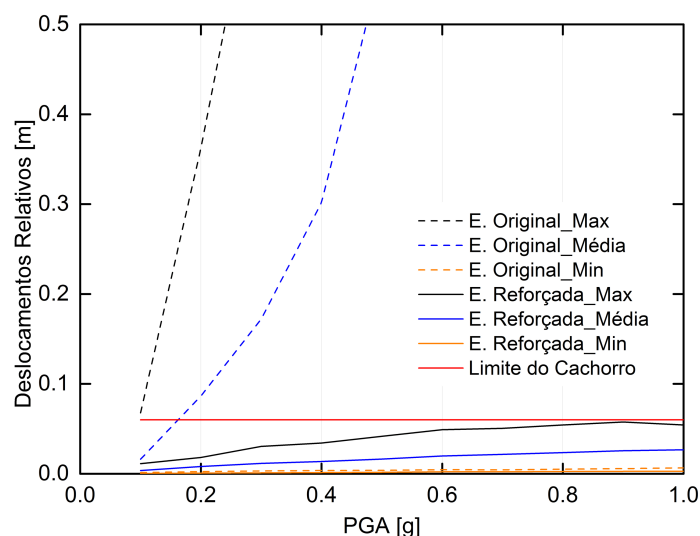


Figura 10 – Deslocamentos relativos das ligações vs PGA da estrutura original e a estrutura com a ligação reforçada

A Figura 10 representa a diferença entre o deslocamento da viga e o deslocamento no topo do pilar (deslocamentos relativos), antes e depois da implementação da solução de reforço. As linhas tracejadas representam a estrutura original e as linhas a cheio a estrutura com as ligações reforçadas. Para uma melhor compreensão, a figura representa apenas os deslocamentos máximo, mínimo e médio. A linha vermelha representa o comprimento do cachorro do pilar – 6 cm – conforme sugerido por Cornali *et al.* [22].

Com a adoção da solução de reforço denotou-se uma melhoria no comportamento ao nível da ligação viga-pilar, como se pode observar nos resultados observados na Figura 10. Esta melhoria pode ser facilmente analisada pela posição das linhas contínuas, ou seja, as linhas contínuas máximas, mínimas e médias da estrutura reforçada estão abaixo da linha horizontal vermelha, que representa o limite do cachorro.

## 5 Conclusões

A avaliação sísmica de estruturas pré-fabricadas em BA mostrou que as ligações viga-pilar representam um dos elementos mais vulneráveis dessa tipologia de estruturas.

Neste trabalho avaliou-se o desempenho sísmico de uma solução de reforço proposta para ligações viga-pilar de um edifício industrial pré-fabricado em BA. O edifício em estudo foi considerado relevante por se enquadrar na tipologia mais recorrente do parque industrial em Portugal – estrutura de um piso com pilares encastrados na base e vigas pré-esforçadas com secção variável suportada pelos pilares –, e devido ao fraco desempenho que esta tipologia demonstrou em eventos sísmicos recentes, nomeadamente ao nível da ligação viga-pilar. Por esse motivo, nas ligações entre vigas e pilares da estrutura original foi considerada a ligação com pior desempenho sísmico: ligações de atrito. Deste modo foi proposta uma solução de reforço ao nível da ligação para melhorar o desempenho da estrutura.





Os resultados apresentados mostraram a eficácia da solução, diminuindo amplamente o deslocamento entre o pilar e a viga num cenário sísmico.

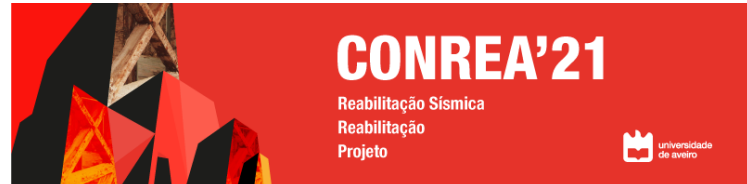
Por fim, este estudo destaca a importância do reforço da ligação de atrito entre viga e pilar a fim de melhorar o desempenho sísmico. Também permitiu demonstrar que não é necessária uma solução sofisticada para obter bons resultados.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Projeto POCI-01-0145-FEDER-028439 SeismicPRECAST – Seismic performance Assessment of existing Precast Industrial buildings and development of Innovative Retrofitting sustainable solutions” – financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e com o apoio financeiro da FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC). O primeiro autor agradece à FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia pela Bolsa de Doutoramento com a referência SFRH/BD/139723/2018.

## REFERÊNCIAS

- [1] A. Belleri, E. Brunesi, R. Nascimbene, M. Pagani, and P. Riva, “Seismic performance of precast industrial facilities following major earthquakes in the Italian territory,” *J. Perform. Constr. Facil.*, pp. 1–31, 2014.
- [2] H. Sezen and A. Whittaker, “Seismic Performance of Industrial Facilities Affected by the 1999 Turkey Earthquake,” *J. Perform. Constr. Facil.*, no. February, pp. 28–36, 2006.
- [3] L. Liberatore, L. Sorrentino, D. Liberatore, and L. Decanini, “Failure of industrial structures induced by the Emilia (Italy) 2012 earthquakes,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 34, pp. 629–647, 2013.
- [4] G. Magliulo, M. Ercolino, C. Petrone, O. Coppola, and G. Manfredi, “The Emilia earthquake: Seismic performance of precast reinforced concrete buildings,” *Earthq. Spectra*, vol. 30, no. 2, pp. 891–912, 2014.
- [5] N. Batalha, H. Rodrigues, and H. Varum, “Seismic performance of RC precast industrial buildings — learning with the past earthquakes,” *Innov. Infrastruct. Solut.*, pp. 1–13, 2019.
- [6] D. Bournas, P. Negro, and F. F. Taucer, “Performance of industrial buildings during the Emilia earthquakes in Northern Italy and recommendations for their strengthening,” *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 12, no. 5, pp. 2383–2404, 2013.
- [7] C. Casotto, V. Silva, H. Crowley, R. Nascimbene, and R. Pinho, “Seismic fragility of Italian RC precast industrial structures,” *Eng. Struct.*, vol. 94, pp. 122–136, 2015.
- [8] G. Magliulo, M. Ercolino, M. Cimmino, V. Capozzi, and G. Manfredi, “FEM analysis of the strength of RC beam-to-column dowel connections under monotonic actions,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 69, pp. 271–284, 2014.
- [9] A. Belleri, E. Brunesi, R. Nascimbene, M. Pagani, and P. Riva, “Seismic Performance of Precast Industrial Facilities Following Major Earthquakes in the Italian Territory,” *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 29, no. 5, p. 04014135, 2015.



- [10] A. Belleri, M. Torquati, P. Riva, and R. Nascimbene, “Vulnerability assessment and retrofit solutions of precast industrial structures Vulnerability assessment and retrofit solutions of precast industrial structures,” no. March, 2015.
- [11] S. Yildirim, A. Kalyoncuoglu, B. Erkus, and Y. Tonguc, “Seismic Retrofit of Industrial Precast Concrete Structures Using Friction Dampers : Case Study from Turkey,” in *Second ATC & SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures*, 2015, no. December.
- [12] B. Morgen and Y. Kurama, “A Friction Damper for Post-Tensioned Precast Concrete,” *PCI J.*, 2004.
- [13] M. Erdik, “Report on 1999 kocaeli and düzce (turkey) earthquakes mustafa erdik,” 1999.
- [14] A. Belleri, E. Brunesi, R. Nascimbene, M. Pagani, and P. Riva, “Seismic Performance of Precast Industrial Facilities Following Major Earthquakes in the Italian Territory,” *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 29, no. 5, p. 04014135, 2015.
- [15] D. A. Bournas, P. Negro, and F. J. Molina, “Pseudodynamic tests on a full-scale 3-storey precast concrete building: Behavior of the mechanical connections and floor diaphragms,” *Eng. Struct.*, vol. 57, pp. 609–627, 2013.
- [16] D. C. Kent and R. Park, “Flexural members with confined concrete,” *J. Struct. Div.*, vol. 97, no. 7, pp. 1969–1990, 1971.
- [17] R. P. B. D. Scott and M. J. N. Priestley, “Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates,” *J. Proc.*, vol. 79, no. 1.
- [18] M. Menegotto and P. E. Pinto, “Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending,” in *IABSE symposium of resistance and ultimate deformability of structures*, Lisbon, Portugal, 1973, pp. 5–22.
- [19] R. Sousa, N. Batalha, and H. Rodrigues, “Numerical simulation of beam-to-column connections in precast reinforced concrete buildings using fibre-based frame models,” *Eng. Struct.*, 2019.
- [20] CEN, “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. EN 1998-3, Comité Européen de Normalisation,” Brussels, Belgium, 2005.
- [21] M. Araújo, L. Macedo, M. Marques, and J. M. Castro, “Code-based record selection methods for seismic performance assessment of buildings,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, pp. 129–148, 2016.
- [22] F. Cornali, A. Belleri, A. Marini, and P. Riva, “Influence of modelling assumptions in the expected loss evaluation of a precast industrial building,” *Procedia Eng.*, vol. 199, pp. 3510–3515, 2017.