



DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM *SETUP* EXPERIMENTAL PARA ENSAIOS CÍCLICOS BIAXIAIS EM COLUNAS TUBULARES METÁLICAS

Elisa L. Cerqueira ^a, Marco Caragliano ^b, Rita Peres ^a, Melina Bosco ^b, Mario D’Aniello ^c e José Miguel Castro ^a

^a CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

^b Department of Civil Engineering and Architecture, University of Catania, Catania, Italy

^c Department of Structures for Engineering and Architecture, University of Naples Federico II, Naples, Italy

Resumo. Este estudo apresenta a preparação e validação de uma campanha experimental destinada a investigar o comportamento de colunas tubulares de aço sob carregamento cíclico biaxial. Descreve a seleção dos perfis, a conceção do dispositivo de ensaio e as simulações numéricas realizadas para verificar a eficácia do sistema de apoio proposto. Os resultados confirmam a capacidade do dispositivo em reproduzir condições de apoio de extremidade fixa, ao mesmo tempo em que minimiza efeitos indesejados de carga.

1. Introdução

Nas últimas décadas, registaram-se progressos significativos na compreensão e previsão do colapso estrutural de construções em aço sujeitas a ações sísmicas [1]. Durante eventos sísmicos, as forças atuam nos edifícios em múltiplas direções em simultâneo, apresentando desafios evidentes para uma previsão rigorosa da resposta estrutural. Para estimar de forma realista o comportamento de um edifício, é necessário considerar fatores como a sua orientação relativamente às forças sísmicas e a presença de irregularidades estruturais, o que conduz à crescente utilização de modelos tridimensionais. Embora as características de resposta dos elementos em aço sujeitos a carregamentos laterais monotónicos e cíclicos unidirecionais estejam já bem estabelecidas, continua a ser essencial investigar o comportamento de componentes estruturais sujeitos a flexão cíclica biaxial [2].

Paralelamente, a utilização de elementos tubulares tem vindo a ganhar popularidade, ao oferecer diversas vantagens, sobretudo devido à rigidez torsional resultante da sua forma fechada e aos elevados momentos de inércia disponíveis em direções ortogonais, o que reduz a necessidade de contraventamentos laterais quando comparados com secções abertas [3]. No entanto, a literatura existente que analisa o desempenho de elementos tubulares de aço sujeitos a carregamentos laterais cíclicos bidirecionais é ainda relativamente limitada [4].

Os ensaios experimentais destacam-se como o método mais preciso para caracterizar o comportamento dos elementos em aço, sendo, por isso, considerados a referência para a validação de modelos numéricos. Apesar da sua indiscutível precisão, a realização de ensaios experimentais encontra-se, sobretudo, limitada a contextos de investigação, devido às elevadas exigências em termos de instalações especializadas, equipamentos, pessoal técnico e recursos consideráveis, incluindo materiais, consumíveis, tempo e custos associados [5].

O trabalho aqui apresentado tem como objetivo descrever o processo de preparação de uma campanha experimental atualmente em curso, desde a seleção dos espécimes a ensaiar até à realização de análises numéricas em elementos finitos, procurando antecipar possíveis obstáculos e adaptações necessárias tanto no dispositivo experimental como no próprio laboratório onde os ensaios serão conduzidos.

2. Campanha experimental

2.1 Seleção de perfis

A campanha experimental visa avaliar o comportamento estrutural de colunas tubulares de aço. Foram selecionados um total de 3 secções ocas circulares, 4 secções ocas quadradas e 1 secção oca retangular (Tabela 1). O comprimento livre de cada provete foi fixado em 1,5 m. O nível de carga axial, n , é definido como o rácio entre a carga axial aplicada ao provete e a resistência axial da secção transversal, estimada com base nas propriedades disponíveis do aço. Foram definidos dois níveis de carga axial na campanha de ensaios: $n = 20\%$ e $n = 0\%$.

Tabela 1: Parâmetros geométricos avaliados

Espécime	b/t (MPa)	Class (EC3)
C219x10-0	21.9	1
C219x10-20	21.9	1
C219x6-0	36.5	2
C219x6-20	36.5	2
C219x4-0	54.8	3
C219x4-20	54.8	3
S220x10-0	22.0	1
S220x10-20	22.0	1
S220x8-0	27.5	1
S220x8-20	27.5	1
S220x6-0	36.7	1
S220x6-20	36.7	1
S220x5-0	44.0	1
S220x5-20	44.0	2
R200x100x10-0	20.0	1
R200x100x10-20	20.0	1

2.2 Trajetórias e Protocolo de Carregamento

Os espécimes serão submetidos a carregamentos laterais em regime controlado por deslocamento, com amplitudes crescentes, seguindo um protocolo de carregamento baseado no protocolo cíclico simétrico definido na norma ANSI/AISC 341-16 [6], apresentado na Fig. 1. A representação esquemática das trajetórias de carregamento encontra-se igualmente ilustrada na

Fig. 1. Na trajetória unidirecional 0° , os provetes são unicamente sujeitos a deformações na direção x. Na trajetória unidirecional 90° , os provetes são exclusivamente deformados na direção y. No caso de carregamentos bidirecionais, as trajetórias consistem em ciclos de deslocamento com formas quadradas, circulares e losangulares no espaço de deslocamento lateral. Embora trajetórias de carregamento bidirecionais sejam frequentemente utilizadas na literatura, estas podem não captar de forma integral a complexidade das ações sísmicas reais. São, portanto, necessárias investigações adicionais para desenvolver protocolos de carregamento que representem de forma mais precisa a natureza dinâmica dos eventos sísmicos.

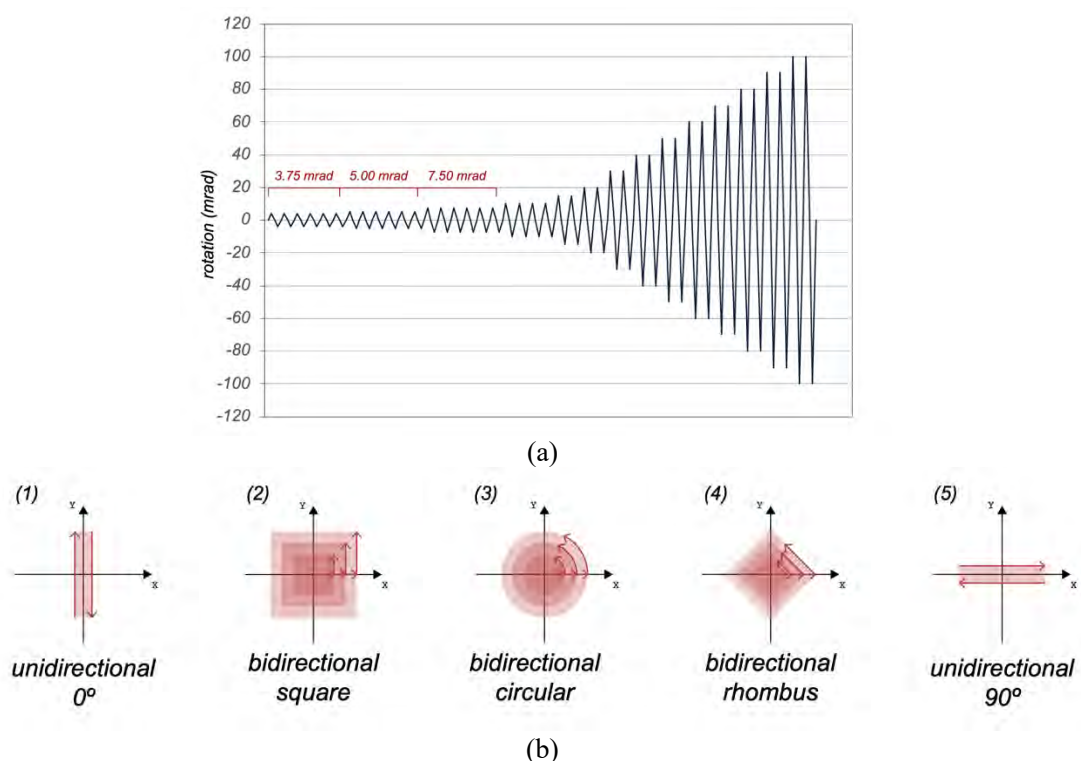


Fig. 1: (a) Protocolo proposto para a campanha experimental e (b) trajetórias de carregamento

3. Setup Experimental

A Figura 2 apresenta o dispositivo a utilizar na campanha experimental. O sistema é constituído por dois atuadores horizontais, cada um com capacidade de 500 kN e curso de ± 150 mm, responsáveis pela aplicação dos carregamentos laterais, e por um atuador vertical com capacidade de 700 kN para aplicação do carregamento axial. Serão utilizados dois pórticos de reação em aço e uma parede lateral de reação para suportar o dispositivo. Os provetes e os pórticos de reação devem ser ancorados à laje do laboratório através de barras de aço pré-esforçadas, de modo a evitar deslizamentos ou tombamentos durante os ensaios.

Conforme referido anteriormente, será aplicado às colunas um carregamento axial constante, enquanto o carregamento lateral será cíclico, em regime controlado por deslocamento. Como o atuador de carga axial permanece estacionário enquanto o provete sofre deslocamentos laterais durante o ensaio, foi concebido um dispositivo, composto por duas chapas de aço deslizantes, colocado entre a extremidade superior da coluna e o atuador, com o objetivo de minimizar forças de fricção indesejadas.

Uma vez que o ensaio simula o comportamento de uma coluna em consola, esta deve estar completamente fixa na base. Para tal, será utilizado o dispositivo de ensaio em caixa de aço

disponível no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) [7]. Devido às características do dispositivo em caixa de aço (500 mm de altura) e ao comprimento livre dos provetes de aproximadamente 1500 mm, as colunas deverão ter um comprimento total de 2000 mm. Os ensaios serão conduzidos até à rutura do provete ou até ao limite de curso dos atuadores.

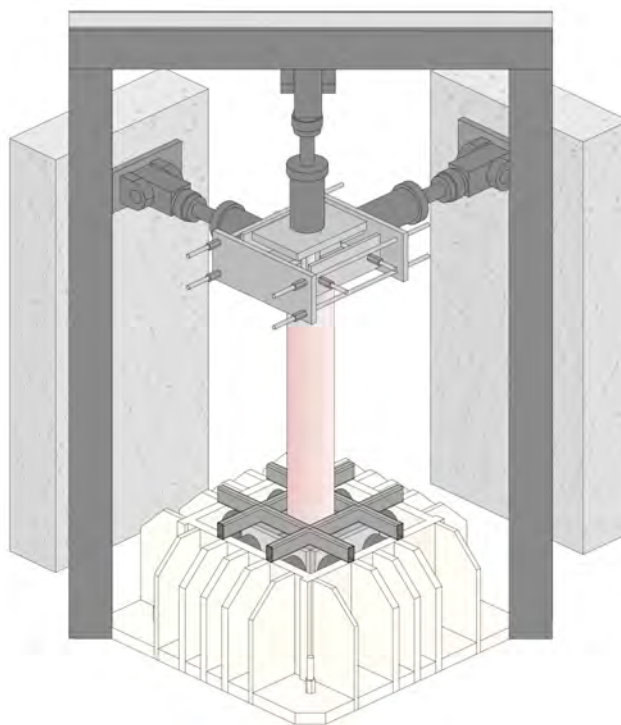


Fig. 2: *Setup experimental*

3.1 Dispositivo de Ensaio

O dispositivo de ensaio inclui uma placa base em aço com dimensões de 1400 x 1400 x 60 mm, rigidamente ancorada à laje através de quatro varões Ø25 mm inseridos em furos localizados próximos aos cantos. O sistema integra quatro placas laterais em aço, cada uma com 500 mm de altura e 50 mm de espessura, soldadas entre si e à placa de base. Para aumentar a rigidez da ligação à placa de base, foram soldados cinco enrijecedores no exterior de cada placa lateral. Esta configuração resulta em dimensões internas da caixa de aço de 750 x 750 mm.

No interior da caixa estão instalados cilindros hidráulicos compactos, quatro em cada face interna. Cada cilindro apresenta um curso de 60 mm e uma capacidade de 45 t. Em cada placa lateral, os cilindros estão ligados entre si por tubos rígidos, que transportam o fluido de alta pressão proveniente da Unidade de Potência Hidráulica (HPU) até aos cilindros. Foi instalada uma válvula para cada cilindro — num total de cinco por placa lateral: uma para cada cilindro e uma para o sistema da própria placa — permitindo ao operador ativar seletivamente apenas os atuadores pretendidos.

Para assegurar um encastramento basal adequado e uma transferência eficaz dos carregamentos, devem ser posicionadas peças adicionais de enchimento em aço entre os cilindros e o provete, conforme ilustrado na Fig. 3. Foram concebidos três conjuntos de peças em aço para envolver as extremidades inferiores dos perfis a ensaiar (um para cada secção selecionada: circular, quadrada e retangular). Dado que as dimensões exteriores das secções se repetem (variando apenas a espessura), é possível utilizar cada conjunto para todos os perfis com a mesma

geometria. Além disso, quatro chapas de aço serão colocadas entre as peças e os cilindros. Importa salientar que as peças foram concebidas considerando uma pequena folga em relação ao elemento, de modo a garantir que, aquando da ativação dos cilindros, sejam as peças a entrar em contacto primeiro com a coluna. Este procedimento impede que os componentes se limitem a ser apenas apertados entre si, o que deixaria o perfil solto.

Para além da utilização das peças e chapas de aço para preencher a parte interna da caixa, conforme anteriormente referido, propõe-se o enchimento da parte inferior da secção tubular, localizada no interior da caixa, com betão. O objetivo é que o betão impeça a deformação do perfil devido ao aperto e à fricção entre os cilindros (e as chapas de enchimento) e as paredes das colunas.

A Unidade de Potência Hidráulica (HPU) existente no laboratório funciona a 700 bar. A fim de proporcionar maior segurança durante a utilização dos cilindros hidráulicos, estes cilindros não devem ser sujeitos a quaisquer cargas verticais nos seus êmbolos. Para evitar a geração de forças laterais verticais, foi proposta a colocação de uma grelha metálica sobre os provetes, rigidamente aparafusada à caixa de ensaio. Esta grelha deve possuir rigidez suficiente para evitar deformações que poderiam, de outro modo, introduzir forças de fricção. Adicionalmente, para minimizar ainda mais a fricção, propõe-se a colocação de uma chapa de Teflon entre as faces dos cilindros e as chapas metálicas em contacto com estes.

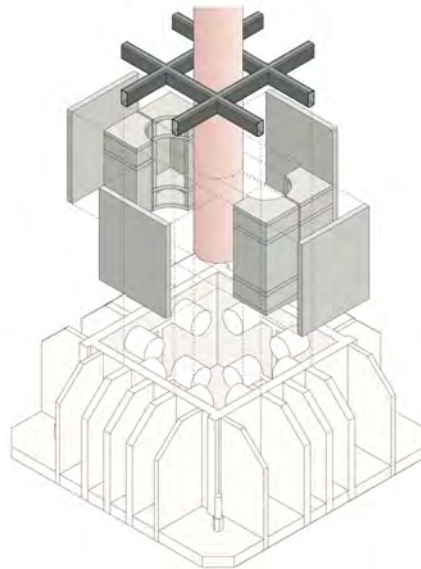


Fig. 3: Ilustração esquemática da montagem do dispositivo de ensaios

4. Validação Numérica

Para avaliar a eficácia da solução proposta para simular as condições de apoio fixo dos elementos a ensaiar, foram realizadas análises numéricas para validar as estratégias sugeridas, ou seja, i) o enchimento com betão, ii) a utilização de peças e chapas metálicas que restringem e conduzem os carregamentos aplicados e iii) a grelha. Uma coluna circular oca inserida no dispositivo foi modelada numericamente sob carregamento monotónico biaxial e cíclico biaxial. Posteriormente, os resultados obtidos foram comparados com os obtidos em condições idealizadas/teóricas — base completamente fixa em todas as direções.

4.1 Modelo de Elementos Finitos

O modelo, desenvolvido no software ABAQUS [8], consiste num elemento tubular oco em aço com secção circular (como referido anteriormente, o comprimento livre é de 1500 mm, mas

deve considerar-se um comprimento adicional de 500 mm dentro da caixa). As placas do membro foram modeladas utilizando elementos de casca quadrática (S4R), conhecidos por captarem com precisão o comportamento pós-encurvadura. Para garantir a precisão e simular quaisquer fenómenos de encurvadura lateral e torsional, foi utilizada uma malha muito fina de $b/20$, com densidade uniforme ao longo de todo o comprimento dos elementos.

Na base do perfil de aço, foi modelado um enchimento de betão com 500 mm de comprimento, utilizando elementos sólidos do tipo C3D20R. À mesma altura, criou-se uma partição no elemento de aço, dividindo-o em duas partes (uma com 500 mm e outra com 1500 mm — o comprimento livre). Foram utilizadas as propriedades do aço descritas na Tabela 2 — considerando-se uma lei de endurecimento isotrópico-cinemático combinada, sem efeitos da taxa de deformação [9], com coeficiente de Poisson igual a 0,3 e módulo de Young (E) igual a 210 GPa — e o betão foi modelado assumindo comportamento linear-elástico, com coeficiente de Poisson igual a 0,2 e módulo de Young (E) igual a 30 GPa.

Tabela 2: Parâmetros de endurecimento isotrópico e cinemático não linear

Material	σ_0 (MPa)	C_1 (MPa)	γ_1	C_2 (MPa)	γ_2
S355	402.9	180605	930.3	6.4	499.3

As peças de aço, chapas e a grelha apresentadas na Fig. 3 foram modeladas considerando os mesmos parâmetros de material utilizados para os tubos ocos, conforme apresentado na Tabela 2. Foram criadas interações do tipo “*surface-to-surface*” entre as peças de aço, chapas, grelha e o elemento. As interfaces foram caracterizadas especificando “contacto rígido” na direção normal, permitindo a separação da interface em condições de tração, enquanto impede a penetração em condições de compressão. Foi utilizado um coeficiente de atrito de 0.3 [10]. Nas faces externas das peças, foram modeladas outras chapas de aço para simular a caixa e os atuadores, e estas chapas externas tiveram os seus deslocamentos e rotações restringidos em todas as direções, conforme pode ser observado na Fig. 4.

A extremidade superior da coluna foi carregada sob um regime monotónico biaxial, com um ângulo de 30° relativamente à direção x, formando uma diagonal com componentes nas direções x e y.

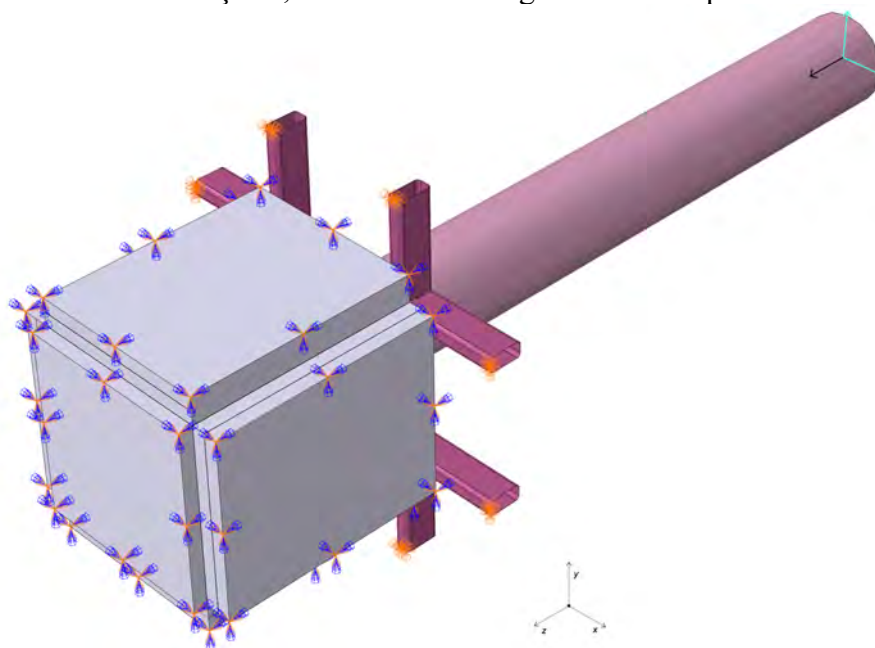


Fig. 4: Modelo de elementos finitos da configuração experimental proposta.

Para o modelo teórico, na base do elemento, as translações nas direções x , y e z , bem como a rotação em torno do eixo z , estão impedidas numa extremidade. Nesta mesma extremidade, é introduzida uma mola de flexão para restringir as rotações em torno dos eixos x e y , simulando a deformabilidade do dispositivo experimental. Neste modelo, o dispositivo experimental não foi modelado, sendo aplicado a mesma trajetória de carregamento.

Os resultados obtidos com o modelo numérico do dispositivo foram comparados com aqueles obtidos em condições idealizadas/teóricas (Fig. 5 e Fig. 6) e demonstram que foi alcançada uma boa correlação entre os dois modelos analisados neste estudo (teórico e simulando o dispositivo experimental, respetivamente), indicando forte concordância entre os resultados. Adicionalmente, as cargas verticais calculadas nas chapas externas foram muito reduzidas e a deformação da grelha foi mínima (cerca de 0,5 mm na pior situação), confirmando a aplicabilidade do dispositivo desenvolvido para os ensaios experimentais.

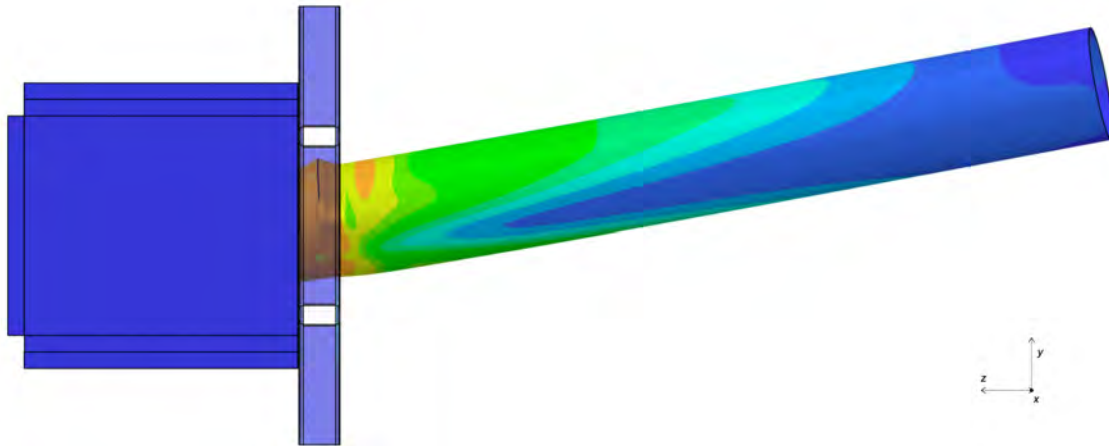


Fig. 5: Modo de encurvadura de um perfil tubular sob carga biaxial monotónica considerando a configuração experimental proposta.

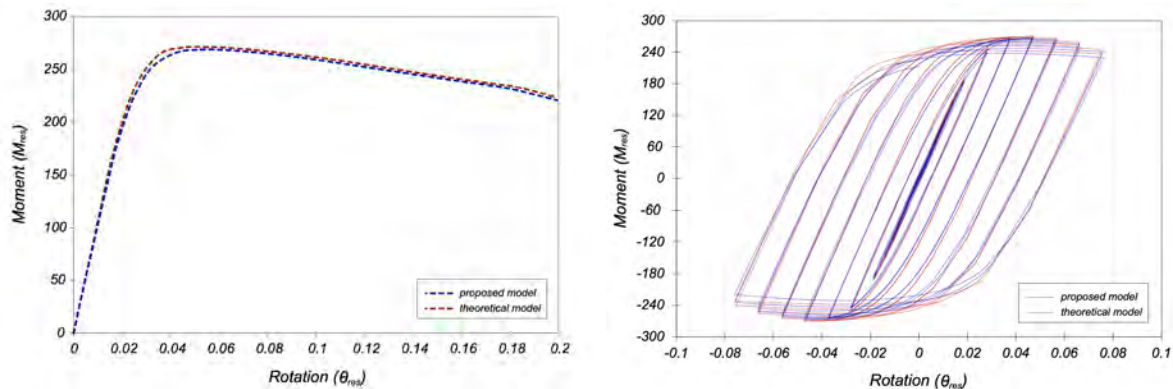


Fig. 6: Comparação entre as curvas (a) monotónicas e (b) histeréticas obtidas para a configuração proposta (linha azul) e o modelo teórico (linha vermelha).

Conclusões

O dispositivo experimental proposto foi validado numericamente e demonstrou replicar de forma eficaz as condições de apoio fixo idealizadas. O sistema revelou-se capaz de assegurar uma correta transferência de cargas e de restringir deslocamentos e rotações indesejados, tornando-o adequado para a realização de ensaios em colunas tubulares de aço submetidas a carregamento monotónico e cíclico biaxial.

Agradecimentos

Este trabalho é apoiado pelo projeto “R2UTechnologies - sistemas modulares”, contrato C644876810-00000019, projeto de investimento 48, financiado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) e pela União Europeia – NextGeneration EU. Esta investigação contou também com o apoio do UID/ECI/04708/2019 – CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções, financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC). O primeiro autor agradece o apoio financeiro fornecido pela “FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia”, Portugal, nomeadamente através da bolsa de doutoramento com a referência 2022.12364.BD.

Referências

- [1] H. Rodrigues, “Biaxial seismic behaviour of reinforced concrete columns,” PhD Thesis, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2012.
- [2] H. Rodrigues, A. Furtado, and A. Arêde, “Behavior of Rectangular Reinforced-Concrete Columns under Biaxial Cyclic Loading and Variable Axial Loads,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 142, no. 1, Jan. 2016, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001345.
- [3] H. Takizawa and H. Aoyama, “Biaxial effects in modelling earthquake response of R/C structures,” *Earthq Eng Struct Dyn*, vol. 4, no. 6, pp. 523–552, Oct. 1976, doi: 10.1002/eqe.4290040602.
- [4] A. Ucak and P. Tsopelas, “Load Path Effects in Circular Steel Columns under Bidirectional Lateral Cyclic Loading,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 141, no. 5, May 2015, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001057.
- [5] H. R. G. S. Augusto, “Characterization of the Behaviour of Partial-Strength Joints Under Cyclic and Seismic Loading Conditions,” *Doutoramento*, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2017.
- [6] AISC, “Seismic Provisions for Structural Steel Buildings Supersedes the Seismic Provisions for Structural Steel Buildings,” 2016 [Online]. Available: www.aisc.org
- [7] A. Silva, Y. Jiang, L. Macedo, J. M. Castro, R. Monteiro, and N. Silvestre, “Seismic performance of composite moment-resisting frames achieved with sustainable CFST members,” *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 312–332, Sep. 2016, doi: 10.1007/s11709-016-0345-y.
- [8] Dassault Systemes, “ABAQUS/STANDARD user’s manual,” 2007.
- [9] M. Bosco, M. D’Aniello, R. Landolfo, C. Pannitteri, and P. P. Rossi, “Overstrength and deformation capacity of steel members with cold-formed hollow cross-section,” *J Constr Steel Res*, vol. 191, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107187.
- [10] Z. Tao, Z. Bin Wang, and Q. Yu, “Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression,” *J Constr Steel Res*, vol. 89, pp. 121–131, 2013, doi: 10.1016/j.jcsr.2013.07.001.