

EDIFÍCIOS MODULARES PRÉ-FABRICADOS EM BETÃO

COMPORTAMENTO SÍSMICO DE ESTRUTURAS MODULARES PRÉ-FABRICADAS EM BETÃO ARMADO

André Furtado¹, Romain Sousa², Ricardo do Carmo³ e Eduardo Julio¹

¹ CERIS - Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa

² Vigobloco SA & RISCO-UA – Universidade de Aveiro

³ CERIS & ISEC-Instituto Politécnico de Coimbra

A crescente procura por habitação, impulsionada por fatores como o aumento populacional e a urbanização, exige soluções construtivas mais rápidas, eficientes e sustentáveis. A construção modular em betão armado surge como uma resposta inovadora, oferecendo vantagens significativas em termos de tempo e custo, sem comprometer a qualidade e a durabilidade. No entanto, a utilização de edifícios modulares pré-fabricados em regiões sujeitas a atividade sísmica levanta questões importantes sobre o comportamento dessas estruturas e a capacidade de as ligações entre os elementos estruturais suportarem os esforços gerados durante um sismo [1, 2].

A industrialização da construção civil traz uma abordagem de fabricação em massa e montagem rápida, sendo uma alternativa promissora à construção tradicional *in situ*. A modularização permite padronização, controle de qualidade e a produção em fábrica de elementos estruturais, melhorando a eficiência. No entanto, em regiões sísmicas, torna-se essencial avaliar o comportamento dessas estruturas para garantir que atendam aos requisitos de segurança previstos nas normas [3].

Este estudo teve como objetivo principal avaliar numericamente o comportamento sísmico de um edifício modular pré-fabricado em betão

armado. A análise incluiu a determinação das frequências naturais e modos de vibração, além da realização de análises estáticas não lineares *pushover*, onde foi verificado o desempenho da estrutura quando sujeita a ações sísmicas. O foco principal deste estudo esteve na caracterização do comportamento sísmico de um edifício com um sistema estrutural à base de paredes autoportantes ligadas entre si através de ligações secas e lajes alveolares. Os resultados deste estudo preliminar forneceram uma base para melhorar o projeto estrutural deste tipo de edifícios em zonas com diferentes níveis de sismicidade.

DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO E METODOLOGIA

O caso de estudo trata-se de um edifício de habitação com 6 pisos (rés-do-chão e 5 pisos superiores), conforme ilustrado na Figura 1, apresentando uma altura total de 12,30 m acima da cota do terreno. O rés-do-chão tem uma altura de 3,30 m, enquanto cada um dos 5 pisos superiores possui 3,00 metros de altura. A planta do edifício apresenta uma área de implantação retangular com 308 m² (28,00 m de comprimento por 11,00 m de largura). O edifício apresenta duas caixas de

escadas e elevadores localizadas em ambas as extremidades. A modelação numérica foi realizada com o programa SeismoStruct [4], amplamente utilizado para simulação do comportamento de estruturas em situações de avaliação do comportamento sísmico. O edifício modular em questão é composto por paredes estruturais de betão armado interligadas por dois varões Ø40, que conectam verticalmente as extremidades das paredes, dispostos a 0,20 m das faces laterais de cada parede. Cada parede é armada com uma malha de varões Ø6 // 0,20 m, em ambas as faces. As lajes alveolares de 0,16 m de espessura foram consideradas no modelo, garantindo a transferência adequada de cargas. O betão utilizado foi da classe C50/60, com resistência à compressão de 50 MPa e módulo de elasticidade de 35 GPa, enquanto o aço para as armaduras foi da classe A500 NR [5].

ANÁLISE MODAL

A análise modal foi realizada para determinar os modos de vibração e as frequências naturais do edifício. Os três primeiros modos de vibração identificados foram: translação nas direções longitudinal e transversal, com frequências de 1,49 Hz e 2,10 Hz, respectiva-

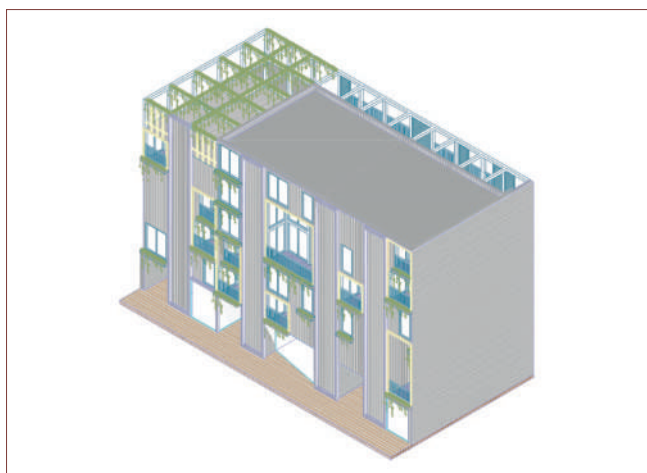


Figura 1> Caso de estudo: vista 3D.

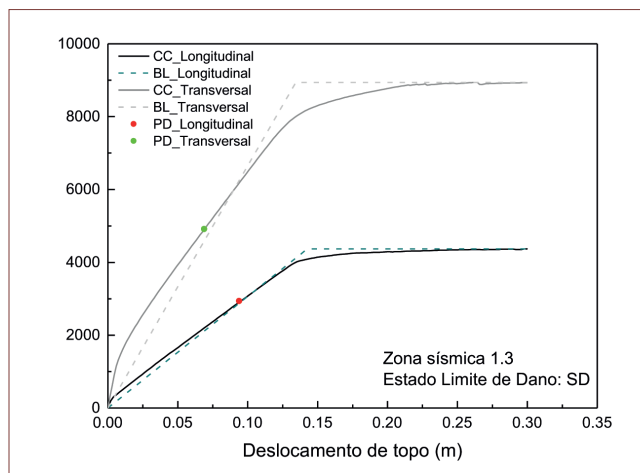


Figura 2> Curvas de capacidade para a zona sísmica 1.3.

mente, e torção, com frequência de 2,15 Hz. Esses modos estavam diretamente relacionados com a distribuição de rigidez e massa do edifício. As frequências naturais comparadas com os espectros de resposta definidos no Eurocódigo 8 [6]. A análise revelou que os modos de translação foram os mais condicionantes, especialmente para a ação sísmica do Tipo 1, com uma aceleração espectral de 0,34g.

ANÁLISE NÃO LINEAR PUSHOVER

A análise estática não-linear *pushover* foi conduzida para avaliar a capacidade resistente da estrutura e seu comportamento quando sujeita a sismos. Na direção transversal, a rigidez da estrutura foi 2,07 vezes maior que na longitudinal, devido ao maior número de paredes resistentes. Na direção longitudinal, a resistência foi 48 % inferior, indicando vulnerabilidades. O ponto de cedência foi atingido com deslocamentos de 0,14 metros na transversal, sendo 6 % superior na longitudinal. As curvas de capacidade (Figura 2) mostraram que, em zonas de sismicidade moderada, a estrutura manteve-se no regime elástico. Contudo, em zonas de maior sismicidade, como a 1.1, os deslocamentos foram maiores, e a estrutura entrou em regime plástico, sugerindo a necessidade de reforço nas ligações secas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise mostrou que o edifício modular teve bom desempenho sísmico em zonas de

sismicidade moderada. A direção transversal, com mais paredes, apresentou maior rigidez, enquanto a longitudinal apresentou maiores *drifts*, ultrapassando o limite de 1 %. Para corrigir isso, sugere-se aumentar o número de paredes resistentes na direção longitudinal e reforçar as ligações secas. O uso de varões de maior diâmetro nas ligações pode aumentar a resistência da estrutura. Os *drifts* entre pisos foram mais pronunciados nos pisos superiores, exigindo estratégias para limitar essas deformações, como dissipadores de energia nas ligações. Embora a modularização ofereça vantagens construtivas, o comportamento sísmico depende da otimização das ligações e da distribuição adequada das paredes. Novos estudos experimentais serão necessários para validar estas conclusões e melhorar a segurança.

CONCLUSÕES

Este estudo conclui que a estrutura modular pré-fabricada em betão armado proposta apresentou um desempenho sísmico satisfatório em regiões de sismicidade moderada. No entanto, para zonas de elevada sismicidade, é necessário adotar medidas adicionais, como o aumento do número de paredes resistentes e o reforço das ligações entre os módulos. A modularização oferece uma solução eficaz para a construção rápida e eficiente, mas requer atenção especial ao comportamento dinâmico em regiões sísmicas. Ensaios experimentais futuros são recomendados para validar as soluções propostas e garantir a

segurança estrutural de edifícios modulares em betão armado.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do financiamento à unidade de investigação CERIS com a referência UIDB/04625/2020. Este artigo foi desenvolvido no âmbito do Pacto de Inovação "R2UTechnologies ffl Modular systems" (C644876810-00000019), pelo consórcio "R2UTechnologies", cofinanciado pelo NextGenerationEU, através do investimento "Agendas para a Inovação Empresarial" do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR). ■

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," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 29, no. 5, p. 04014135, 2015, doi: doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000617.
- [2] M. Ercolino, G. Magliulo, and G. Manfredi, "Failure of a precast RC building due to Emilia-Romagna earthquakes," *Engineering Structures*, vol. 118, pp. 262-273, 2016/07/01/ 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.054.
- [3] FIB, "Bulletin No. 101 - Precast Concrete in Tall Buildings. State-of-the-art report (234 pages, ISBN 978-2-88394-153-3, December)," 2021.
- [4] SeismoSoft, "SeismoStruct - A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures," 2023.
- [5] IPQ, "EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings" 2004.
- [6] CEN, "Eurocode 8 - Part 1: Design of structures for earthquake resistance: General rules, seismic actions and rules for buildings," 2010.