

Análise sísmica de um edifício constituído por elementos pré-fabricados de betão

P. Ferreira ¹

H. Varum ²

J. Melo ³

A. Monteiro ⁴

RESUMO

Atualmente, a crescente procura por soluções sustentáveis e o aumento dos custos de mão de obra e materiais têm impulsionado transformações no setor da construção civil. A pré-fabricação surge como uma alternativa promissora para enfrentar estes desafios, contudo o conhecimento sobre o comportamento sísmico de estruturas pré-fabricadas é ainda limitado. Este cenário gera incerteza, especialmente na utilização desta técnica em regiões com maior atividade sísmica.

Na dissertação realizada [1], foi explorado o estado de conhecimento da pré-fabricação em edifícios habitacionais e industriais, bem como a legislação vigente aplicável para a realização de projetos de edifícios constituídos por elementos estruturais pré-fabricados de betão face à ação sísmica, com especial ênfase no Eurocódigo 8.

O objetivo principal foi analisar e avaliar o comportamento sísmico de um edifício pré-fabricado. Para tal, foram construídos vários modelos computacionais, onde se fizeram variar as tipologias das ligações e as intensidades das ações sísmicas aplicadas. A análise desses modelos permitiu entender como as diferentes configurações de ligações influenciam a resposta dinâmica da estrutura, assim como os efeitos de sismos mais intensos nos esforços e deslocamentos gerados. Adicionalmente, foram realizadas medições *in situ* para comparar as frequências e modos de vibração do edifício projetado com os dados obtidos através da análise das acelerações utilizando o *software* ARTeMIS.

Os resultados da análise sísmica mostraram que o comportamento da estrutura varia conforme a tipologia das ligações viga-pilar, permitindo uma melhor exploração da ductilidade da estrutura. Com base nesses resultados, fica evidente a necessidade de continuar a investigação e o desenvolvimento do conhecimento na área da pré-fabricação em regiões sísmicas.

Palavras-chave: Pré-fabricação; Ligações; Comportamento Sísmico; Eurocódigo 8; Medições

1. INTRODUÇÃO

A temática da sustentabilidade tem assumido um papel central na engenharia civil, impulsionando a utilização de elementos estruturais pré-fabricados como uma solução para reduzir as emissões de CO₂ associadas à construção. Estes elementos oferecem diversas vantagens em relação às estruturas convencionais moldadas *in situ*. No entanto, é necessário garantir a segurança e a fiabilidade estrutural dos edifícios constituídos por estes elementos.

¹ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Ex-aluno), Porto, Portugal. pedrondcferreira@gmail.com

² CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. hvarum@fe.up.pt

³ CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. josemelo@fe.up.pt

⁴ A400 - Projetistas e Consultores de Engenharia, Lda., Porto, Portugal. amonteiro@a400.pt

Em áreas de maior sismicidade, como o sul de Portugal, as ações sísmicas têm um impacto significativo na conceção e dimensionamento de estruturas. Nos últimos anos, estas ações têm sido objeto de intensos estudos científicos, o que se reflete no aumento de publicações sobre o tema. A evolução do conhecimento nesta área pode ser observada nas normas publicadas para o dimensionamento de edifícios resistentes a sismos, bem como nas exigências técnicas impostas.

Para projetar estruturas pré-fabricadas adequadas a regiões sísmicas, é essencial analisar cuidadosamente o seu comportamento e implementar soluções que melhorem o seu desempenho. Contudo, o *know-how* sobre o tema é ainda limitado em Portugal, especialmente quando comparado a outros países europeus, reforçando a necessidade de avanços nessa área por parte da comunidade científica.

Assim, a pré-fabricação demonstra-se como uma tendência promissora no setor da construção, mas para que tal seja possível, é necessário um maior aprofundamento no estudo da sua resposta a ações sísmicas.

2. PRÉ-FABRICAÇÃO EM BETÃO EM EDIFÍCIOS

As estruturas pré-fabricadas de betão diferenciam-se das estruturas moldadas *in situ* uma vez que os elementos que as constituem são produzidos num local distinto daquele a que se destinam a ocupar na estrutura final. A técnica da pré-fabricação é uma atividade em constante evolução, representando um dos ramos mais importantes na industrialização do setor da construção, permitindo que a produção dos elementos seja mais repetitiva, podendo assim otimizar custos em cofragem, equipamento e em particular os custos de mão de obra [2].

Atualmente, a utilização de ferramentas avançadas e processos automatizados no campo da arquitetura e da construção proporcionam maior eficiência e precisão na fabricação de elementos pré-fabricados, mantendo a liberdade criativa e o engenho dos engenheiros projetistas [3]. Fatores como a redução da necessidade de mão de obra, a precisão no formato das peças, o melhor acabamento e a pressão dos prazos justificam a adoção da pré-fabricação. O aumento dos custos na construção nova, como ilustrado na Figura 1, também contribui para essa tendência.

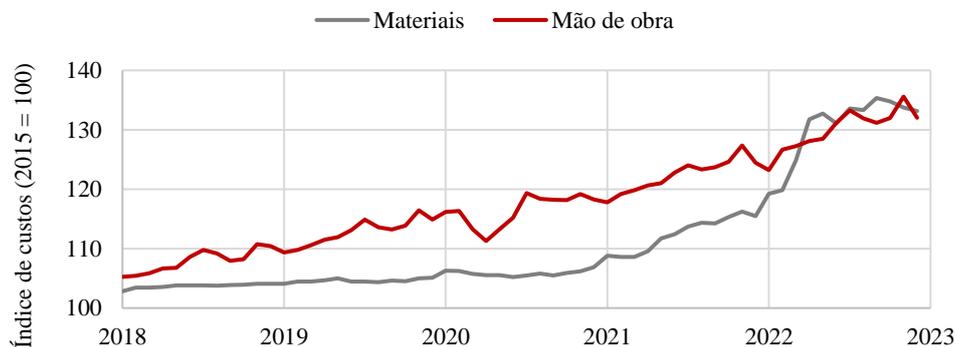


Figura 1. Índice de custos de construção de habitação nova [4]

2.1 Sustentabilidade do processo de pré-fabricação de betão

No setor da construção, a questão da sustentabilidade tem recebido crescente atenção devido ao impacto ambiental significativo, representando cerca de 30% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂). Grande parte dessas emissões está relacionada com a produção de betão, com o cimento sendo o principal responsável, representando aproximadamente 8% das emissões anuais de CO₂. Para cada tonelada de cimento produzida, é emitida aproximadamente uma tonelada de CO₂ para a atmosfera. Além disso, o setor consome cerca de 3000 milhões de toneladas de recursos por ano, destacando a sua insustentabilidade atual [5].

Para maximizar a sustentabilidade na construção é importante tentar garantir os seguintes pilares:

- a) Minimização dos custos de ciclo de vida;
- b) Garantir as condições de higiene e segurança nos trabalhos;
- c) Economia de água e energia;
- d) Maximização da durabilidade;
- e) Minimização da produção de resíduos;
- f) Utilização de materiais eco-eficientes.

A crescente utilização de betão pré-fabricado tem sido bastante benéfica para a sustentabilidade da indústria dado permitir a poupança de material devido à utilização de novas adições, entre os quais as cinzas volantes e sílicas de fumo, que permitem diminuir a utilização de constituintes poluentes, como o clínquer, e da otimização das dimensões dos elementos, traduzindo-se diretamente na poupança de energia necessária.

2.2 Vantagens e desvantagens da pré-fabricação

A conceção de uma estrutura deve ter em consideração vários aspetos como a estética, funcionalidade e custo e com a aplicação de elementos pré-fabricados nas estruturas correntes é possível alcançar estas exigências. As técnicas de pré-fabricação apresentam diversas vantagens e desvantagens como qualquer método construtivo.

A pré-fabricação permite assegurar um ambiente em obra mais seguro para os trabalhadores, visto que retira o fabrico dos elementos da obra, passando a serem fabricados em locais mais controlados, podendo ser reduzido o valor geral da obra. No entanto, a pré-fabricação pode apresentar desafios de logística de transporte das peças até à obra, bem como dificuldades de montagem das ligações entre os elementos em obra.

No Quadro 1 são sintetizadas as principais vantagens e desvantagens associadas ao processo de pré-fabricação de estruturas de betão.

<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
Custo	Transporte
Tempo	Montagem
Qualidade / Durabilidade	Ligações
Estética	Arquitetura
Segurança	Conhecimento
Menores secções	-

2.3 Tipos de ligações

Nas estruturas pré-fabricadas de betão, o aspeto mais importante é a conceção das ligações entre os elementos estruturais visto que o seu papel principal é a transmissão de forças entre os elementos e proporcionar a estabilidade necessária para a estrutura. As ligações são partes essenciais da estrutura e devem ser concebidas com o rigor necessário, dado que uma falha na ligação pode levar à instabilidade estrutural.

Nas estruturas, a capacidade de dissipação de energia a uma ação sísmica é muito afetada pelas tipologias de ligações existentes e da sua localização na estrutura.

As ligações entre elementos estruturais podem ser distinguidas pela sua capacidade de transmissão de forças como: ligações rígidas (continuidade total), ligações semirrígidas (continuidade parcial) e ligações articuladas. O comportamento das ligações é clarificado pela Figura 2.

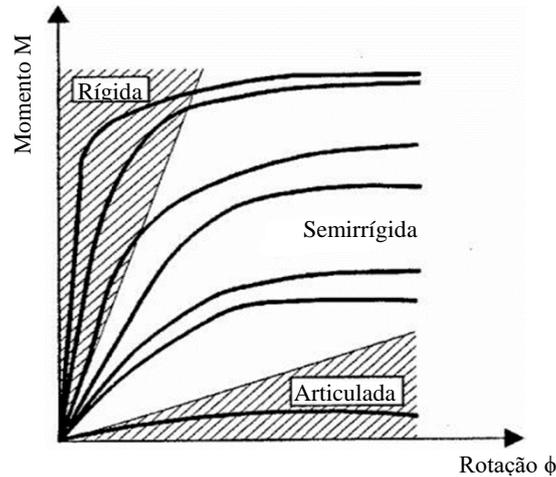


Figura 2. Classificação das ligações [6]

É possível ainda distinguir, de acordo com os tipos de elementos ligados, onde podemos enumerar as seguintes tipologias: ligação pilar-fundação (PF), pilar-pilar (PP), viga-pilar (VP), viga-viga (VV), laje-viga (LV), laje-laje (LL) e painel-viga (Pa-V). As diferentes tipologias de ligação são exploradas com detalhe na dissertação, contudo é de salientar que as ligações viga-pilar representam as ligações mais relevantes para a resposta sísmica e estabilidade geral da estrutura. As ligações, segundo o EC8, podem ser classificadas em três grupos distintos [7]:

- Ligações localizadas claramente fora das zonas críticas, não afetando a resposta inelástica do sistema estrutural nem a capacidade de dissipação de energia da estrutura;
- Ligações localizadas dentro das zonas críticas, mas sobredimensionadas em relação ao resto da estrutura, nas quais, em situação de projeto sísmica, ocorrem respostas elásticas em contraste com as zonas críticas, onde ocorrem respostas não elásticas;
- Ligações localizadas dentro das zonas críticas com ductilidade considerável, cuja principal função é a dissipação de energia.

A classificação das ligações tem influência direta no coeficiente de comportamento da estrutura, Eq. (1), e no dimensionamento das mesmas, visto que, face à sua classificação, o EC8 prevê a majoração do momento fletor atuante ou a aplicação de um coeficiente γ_{Rd} igual a 1,2 ou 1,35 ao invés de 1,0 no cálculo para a capacidade real.

$$q_p = k_p \cdot q \quad (1)$$

2.4 Lições de sismos recentes

Ao analisar os impactos da atividade sísmica nos edifícios em zonas sísmicamente ativas como a Nova Zelândia, Turquia e Itália somos capazes de identificar os danos ocorridos e aprender para os futuros sismos. Após inspeção dos locais, foi possível enumerar os principais danos ocorridos nos edifícios, entre os quais:

- Formação de rotulas plásticas na base dos pilares;
- Falha estrutural em pilares curtos;
- Falha na zona superior do pilar.



Figura 3. Rotura da base do pilar (Esquerda) [8]; Falha de um pilar curto (Direita)[9]

Nesta tipologia de estruturas, a ligação viga-pilar assume uma preocupação redobrada, uma vez que a falta de suporte e conseqüente queda das vigas foram os danos mais severos verificados nas ligações articuladas viga-pilar. De modo a prevenir estes danos, devem ser previstos ferrolhos (*dowel*) no interior das vigas, em complemento à resistência por atrito no contacto entre a consola curta e a base da viga.

Na nova geração de normas, existe uma grande cautela no dimensionamento dos nós viga-pilar monolíticos para que ocorra o efeito “viga fraca – pilar forte” e, nos sismos observados, a formação das rótulas plásticas nas extremidades das vigas foi bem visível, verificando-se a capacidade destas ligações e validando as formulações utilizadas.

3. CASO DE ESTUDO

O edifício em estudo é constituído por um corpo retangular em planta, bastante regular apesar da sua ligeira assimetria, com dimensões de 30 x 15 m² e contabilizando 12 pisos acima do solo para utilização habitacional. Cada piso possui um pé-direito de 3 metros, totalizando o edifício 36 metros de altura. Relativamente aos elementos resistentes às ações laterais, o edifício é constituído por duas paredes resistentes, junto às faces laterais, com 20 cm de espessura, um núcleo rígido de dimensões consideráveis situado na zona central da face superior e pilares no interior e no perímetro do mesmo. A planta estrutural do piso tipo é apresentada na Figura 4.

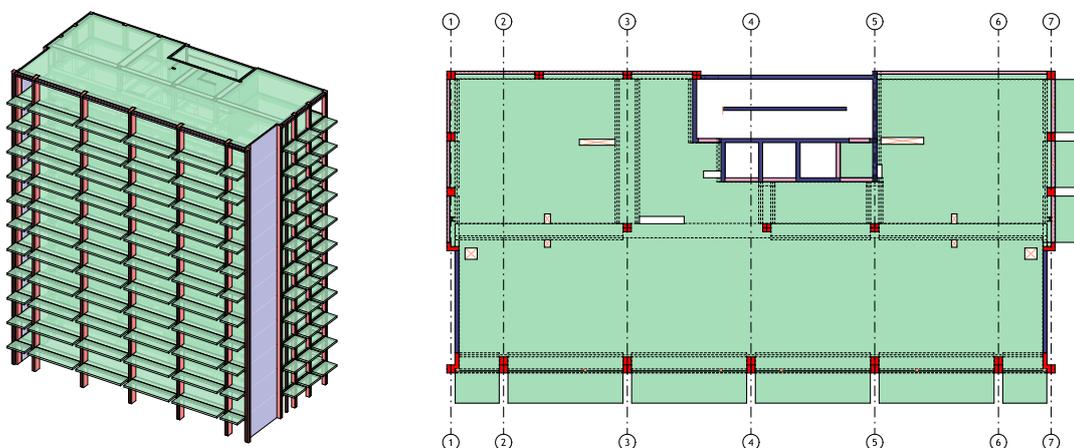


Figura 4. Modelo tridimensional e planta do piso da estrutura do edifício

As ligações viga-pilar foram concebidas como ligações simplesmente apoiadas onde a transmissão de momentos entre estes elementos é nula, contudo a excentricidade do apoio da viga na consola curta foi cuidadosamente modelada uma vez que produz um esforço de flexão adicional nos pilares.

3.1 Ações

Conforme o Eurocódigo 0, 1 e 8, foram definidas e quantificadas as ações relevantes de acordo com as características do edifício em estudo. Para o presente estudo foram consideradas as ações relativas ao peso dos materiais estruturais (peso próprio), ao peso dos revestimentos e das paredes divisórias interiores e exteriores (restantes cargas permanentes, RCP), às atividades inerentes à utilização do edifício (sobrecarga), ao vento e ao sismo.

Quadro 2. Valores das ações consideradas

Tipo de carga		Valor [kN/m ²]
Permanente	Restantes Cargas Permanentes (RCP)	3.0
Variável	Pavimentos	2.0
	Cobertura	0.4

Para caracterização da ação sísmica foi considerado um terreno tipo B e acelerações de 0,35 m/s² e 0,80 m/s² para o tipo 1 e tipo 2, respetivamente.

3.2 Análise sísmica

Procedeu-se à avaliação da regularidade em planta do edifício através do estipulado pelo EC8, tendo-se obtido um edifício não regular em planta, visto que não respeitava as condições presentes em 4.2.3.2(6) da norma. Através da análise modal foi possível obter os modos de vibração e as frequências associadas, onde se verificou que o edifício exibia flexibilidade torsional em torno do eixo Z (vertical).

Após a análise estrutural e modal foram determinados, para o edifício em estudo, os *drift's* e os coeficientes de sensibilidade ao deslocamento relativos entres pisos (efeitos de segunda ordem) tendo-se verificado que estes parâmetros eram pouco condicionantes e que cumpriam os limites estabelecidos pela norma.

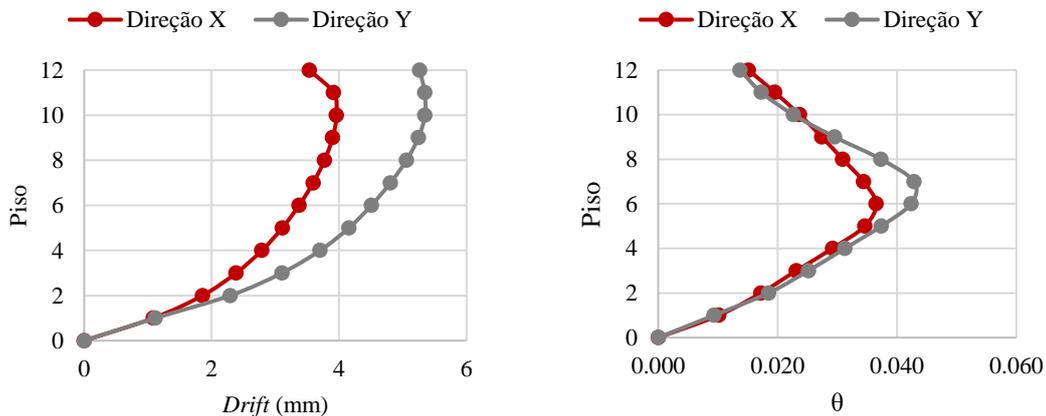


Figura 5. *Drift's* e efeitos de segunda ordem (ação sísmica tipo 2)

3.3 Análise comparativa do edifício com diferente tipologia de ligações e situado numa zona de maior sismicidade

Em situações onde a ação sísmica se mostra condicionante no dimensionamento e resposta da estrutura, a utilização da pré-fabricação demonstra-se a níveis mais baixos comparativamente com as zonas de baixa sismicidade.

Para analisar o efeito das ligações na resposta da estrutura, foram realizados 2 modelos numéricos, um modelo em que são simuladas as ligações viga-pilar como articulações (anteriormente descrito) e outro modelo com ligações semelhantes a monolíticas, doravante nomeado como monolítico. De modo semelhante à ação sísmica de referência, foi também determinada a ação sísmica para a zona de elevada sismicidade a aplicar nas estruturas articuladas e monolíticas, contudo, a determinação da ação de projeto só foi finalizada após a determinação do sistema estrutural visto que o valor do coeficiente de comportamento é afetado pela tipologia do sistema estrutural.

Quadro 3. Designação dos modelos

		Ação sísmica	
		1.6 – 2.5	1.3 – 2.3
Ligações	Articulada	E_Art_Ref	E_Art_AS
	Monolítica	E_Mon_Ref	E_Mon_AS

3.3.1 Análise estrutural e modal

Analisando o modelo com ligações monolíticas, foi constatado que a condição de flexibilidade torsional é cumprida em cerca de 20%, tendo-se verificado em ambas as direções a condição 4.2.3.2 (6) b). Com isso, foi possível afirmar que o sistema estrutural pôde ser considerado como um sistema de paredes, visto que a força de corte das paredes era superior a 90% das forças de corte nos pilares.

A análise modal do modelo constituído por ligações monolíticas foi semelhante à analisada para o modelo com ligações articuladas e os resultados obtidos para este modelo foram bastante diferentes, tendo-se verificado variações significativas no valor do período fundamental da estrutura e nas deformadas dos modos.

Quadro 4. Comparativo das frequências dos modelos E_Art e E_Mon

Modo	$T_{E_Art} [s]$	$T_{E_Mon} [s]$
1	1,61	1,17
2	1,41	1,17
3	0,76	0,68
4	0,37	0,31

A estrutura monolítica apresenta diferenças relevantes no seu comportamento geral comparativamente com a estrutura de referência, tendo sido avaliado novamente o coeficiente de comportamento associado. De acordo com o EC8, visto que o sistema estrutural é classificado como sistema de paredes e as ligações enquadram-se nos três grupos apresentados, o valor máximo do coeficiente é igual a 3,0.

3.3.2 Análise sísmica e esforços de cálculo

De modo análogo ao elaborado para o modelo com ligações articuladas, foram avaliados e comparados os valores dos *drift's* por piso e os coeficientes de sensibilidade ao deslocamento relativo entres pisos para o modelo com ligações monolíticas e, devido ao aumento de rigidez global da estrutura, houve uma diminuição dos deslocamentos por piso e a estrutura mostrou-se mais capaz de redistribuir as forças para os elementos verticais.

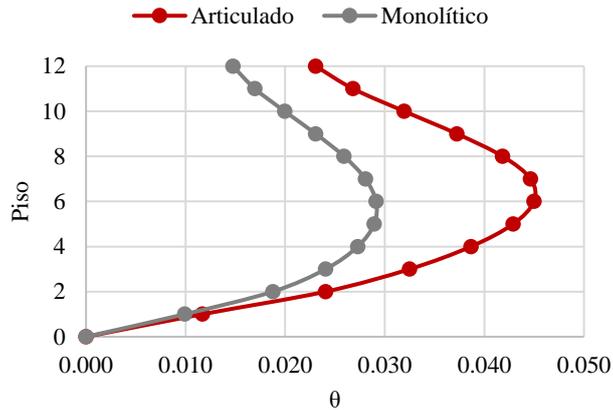


Figura 6. Comparativo dos efeitos de segunda ordem dos modelos Articulado e Monolítico (ação sísmica tipo 2)

Foram calculados e analisados os esforços atuantes nos dois modelos estruturais, articulado e monolítico, para comparar a distribuição das forças de corte e momentos. No presente caso de estudo, quando analisados os modelos do edifício colocado numa zona de sismicidade mais elevada, as majorações dos esforços de corte, Eq. (2), podem ser praticamente contrariadas através da continuidade das ligações viga-pilar, isto é, os valores do esforço transversal de dimensionamento, V_{Ed} , do modelo monolítico aproximam-se bastante dos valores do esforço transversal atuante, V_{Ed} , no modelo articulado.

$$V_{Ed} = 1.5 V_{Ed}' \quad (2)$$

A capacidade de transmitir momentos entre as vigas e os pilares com ligações semelhantes a monolíticas reduziu significativamente os momentos flectores de dimensionamento, especialmente na zona crítica da parede onde se formará a rótula plástica, resultando numa economia de aço para as armaduras longitudinais.

3.4 Medição dinâmica da estrutura

O auxílio dos modelos numéricos realizados em *softwares* de cálculo é, atualmente, imprescindível quando se realizam estruturas complexas e se estudam fenómenos como a resposta modal de um edifício, contudo, uma análise experimental *in situ* permite-nos validar a análise efetuada através dos modelos numéricos.

Para estudar a resposta dinâmica do edifício, foram realizadas medições *in situ* com os instrumentos necessários, como 12 medidores de aceleração, um dispositivo de aquisição e um computador, onde se obtiveram as frequências de vibração associadas aos três primeiros modos de vibração e as deformadas associadas. As medições foram conduzidas em duas fases distintas, variando a localização dos acelerômetros. Na primeira fase, os dispositivos foram posicionados nos pisos 0, 2 e 3 e na segunda fase, foram instalados nos pisos 1, 2 e 3.

Após as medições foi desenvolvido um modelo de cálculo que reflete a estrutura do edifício no momento das medições. Este modelo inclui as seguintes características:

- Rótulas nas ligações viga-pilar, simulando as condições de conexão reais;
- Encastramento na base do edifício, representando a fundação fixa;
- Atribuição de uma rigidez de 75% aos elementos não fissurados, considerando a idade prematura do betão.

O modelo de cálculo criado procura replicar as condições presentes durante a realização das medições, permitindo uma análise mais precisa e comparações mais fidedignas entre os dados obtidos no modelo e os resultados obtidos em campo. Para a análise dos dados recolhidos, foi utilizado o *software* ARTeMIS Extractor. Esta ferramenta permitiu extrair as componentes espectrais do sinal e decompor o

sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência. O processo de análise utilizou a seleção de picos (*Peak Picking*) e a decomposição no domínio da frequência (FDD).

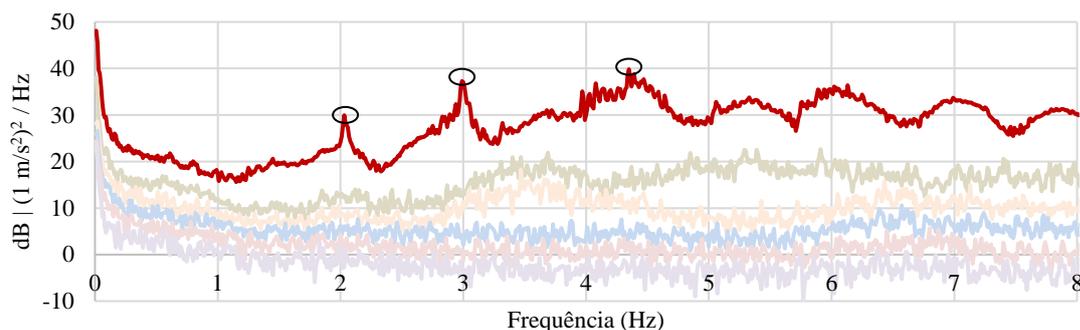


Figura 7. Identificação das frequências naturais da estrutura

As frequências obtidas pelo modelo de cálculo e as frequências extraídas das medições realizadas encontram-se no Quadro 5, onde é perceptível que as frequências do primeiro modo apresentam uma variação relativamente baixa.

Quadro 5. Variação da frequência entre o modelo e a medição *in situ*

Modo	$f_{\text{modelo}} [Hz]$	$f_{\text{medição}} [Hz]$	Variação [%]
1	2,12	2,02	-4,72
2	2,56	2,98	16,41
3	4,54	4,34	-4,41

O primeiro modo de vibração identificado corresponde aproximadamente à torção característica do modo fundamental previsto pelo modelo de cálculo, no entanto, os modos de vibração seguintes apresentam diferenças significativas nas deformadas quando comparadas ao modelo teórico. Estas disparidades podem ser atribuídas a vários fatores, tais como:

- a) Simplificações adotadas na modelagem dos pisos enterrados;
- b) Representação das ligações das fundações;
- c) Influência dos edifícios adjacentes.

4. CONCLUSÕES

O estudo da resposta sísmica de um edifício constituído por elementos pré-fabricados permitiu comprovar a importância das ligações na resposta dinâmica da estrutura, ao nível de deslocamentos, efeitos de segunda ordem e esforços.

Através das análises numéricas realizadas foi possível verificar que a tipologia das ligações pode ser responsável pelo comportamento geral do edifício, devendo ser considerada tanto em função da sismicidade da região onde o edifício se encontrará quanto à disposição dos elementos estruturais em planta.

A realização de medições *in situ* permite validar e compreender melhor o comportamento da estrutura e por isso, através destas medições, foi possível validar aproximadamente as frequências obtidas pela medição e pelo modelo de cálculo, apesar de serem visíveis discrepâncias nos modos de vibração relacionados com fatores externos e de simplificações adotadas no modelo de cálculo.

A relevância do tema da pré-fabricação em zonas de elevada sismicidade permite selecionar tópicos a desenvolver em continuidade com o estudo apresentado, entre os quais:

- Estudar a influência face às ações sísmicas das irregularidades nas estruturas pré-fabricadas;
- Realização do dimensionamento global do edifício em estudo para as situações apresentadas (E_Art_Ref, E_Mon_Ref, E_Art_AS e E_Mon_AS) para realização de uma comparação económica das diferentes soluções;
- Continuação da medição dos parâmetros dinâmicos do edifício em estudo ao longo da sua construção com o objetivo de perceber a influência da construção em altura na variação da frequência da estrutura e também para compreender o comportamento das paredes de enchimento na resposta global da estrutura.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 DOI 10.54499/UIDB/04708/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/04708/2020>) e Financiamento programático - UIDP/04708/2020 DOI 10.54499/UIDP/04708/2020 (<https://doi.org/10.54499/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). Este trabalho foi também financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC), no âmbito do projeto 2022.05721.PTDC.



6. REFERÊNCIAS

- [1] P. Ferreira, «Análise sísmica de um edifício constituído por elementos pré-fabricados de betão», Universidade do Porto, 2023.
- [2] J. Proença, «Comportamento sísmico de estruturas pré-fabricadas», Universidade Técnica de Lisboa, 1996.
- [3] Encontro Nacional Betão Estrutural e J. A. Figueiras, Actas do Congresso - Pré-fabricação em Betão. Porto: FEUP Edições, 2004.
- [4] Instituto Nacional de Estatística, «Índice de custos de construção de habitação nova». 8 de fevereiro de 2023. Disponível em: https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_destaques&DESTAQUESdest_boui=581112338&DESTAQUESmodo=2&xlang=pt
- [5] F. Torgal e S. Jalali, A sustentabilidade dos materiais de construção. TecMinho.
- [6] International Federation for Structural Concrete, Ed., Structural connections for precast concrete buildings. em Bulletin / International Federation for Structural Concrete Guide to good practice, no. 43. Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), 2008.
- [7] Norma Europeia EN 1998-1:2010: Eurocódigo 8 - Projeto de estruturas para resistência aos sismos, Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios, 2013.
- [8] A. Furtado et al., Seismic Performance Assessment of Existing Precast Industrial Buildings. Politécnico de Leiria.
- [9] L. Liberatore, L. Sorrentino, D. Liberatore, e L. D. Decanini, «Failure of industrial structures induced by the Emilia (Italy) 2012 earthquakes», Engineering Failure Analysis, vol. 34, pp. 629–647, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.02.009>.