



DESAFIOS NO DIMENSIONAMENTO SÍSMICO DE ESTRUTURAS MODULARES EM AÇO

Rita Peres^a, Elisa Cerqueira^a, Cyrus Eshagui^a e José Miguel Castro^a

^a CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo. A construção modular em aço (MSC) tem sido cada vez mais adotada a nível global devido às suas vantagens em termos de rapidez, precisão e sustentabilidade. No entanto, a sua aplicação em zonas sísmicas continua limitada, devido às incertezas associadas ao seu comportamento estrutural face a ações laterais. Este artigo identifica os principais desafios no dimensionamento sísmico da MSC, com especial enfoque nas ligações intermodulares e intramodulares, na continuidade dos diafragmas, nos mecanismos de dissipação de energia e nas técnicas de modelação adoptadas.

1. Introdução

A construção modular tem sido amplamente utilizada em aplicações como apartamentos, escolas, hotéis, hospitais, escritórios e outros edifícios com layouts repetitivos e celulares. Embora não seja um método recente — com larga aplicação em países como os Estados Unidos, Japão, Suécia e Reino Unido — a sua popularidade tem vindo a crescer em regiões como Austrália, Alemanha, Países Baixos, China e Hong Kong, graças à maior precisão construtiva, elevada qualidade, rapidez de montagem e redução do desperdício de materiais. Como referido por Lawson et al. [1], este método contribui significativamente para a sustentabilidade, reduzindo resíduos em aterro, viagens de transporte, ruído e acidentes em obra, em comparação com métodos convencionais.

Os edifícios modulares são constituídos por unidades pré-fabricadas em fábrica, que são transportadas e montadas no local sobre fundações previamente preparadas, originando estruturas permanentes de uso residencial ou comercial. Estas unidades podem ser produzidas em aço, betão pré-fabricado ou madeira. Entre estas, os módulos em aço destacam-se pela sua leveza, maior flexibilidade arquitetónica e capacidade de vencer grandes vãos. Além disso, permitem soluções construtivas mais abertas e complexas, difíceis de atingir com outros materiais, e facilitam a montagem e ligação entre módulos, o que contribui para a redução dos custos e do tempo de execução. Frequentemente, integram-se lajes de betão armado e paredes divisórias, assegurando bom desempenho acústico e térmico, resultando num sistema completo de construção modular em aço (MSC).

Apesar das suas vantagens, a aplicação da MSC em zonas sísmicas continua limitada, devido ao conhecimento ainda reduzido sobre o seu comportamento estrutural face a ações laterais. Este artigo apresenta uma revisão dos principais conceitos da construção modular em aço, com especial enfoque nos seus componentes estruturais, sistemas resistentes a forças laterais (LFRS) e tipos de ligação. São também discutidos os principais desafios associados ao dimensionamento sísmico e à análise estrutural da MSC, atualmente não abrangidos pelas normas de projeto em vigor.

2. Conceitos gerais

2.1 Unidades modulares

A unidade modular estrutural constitui o principal elemento resistente de um edifício modular. Na construção pré-fabricada com aço, os sistemas estruturais podem ser classificados segundo o grau de pré-fabricação em: componentes unidimensionais (1D), painéis bidimensionais (2D) e sistemas volumétricos tridimensionais (3D). Entre estes, o sistema 3D é o mais comum, permitindo que até 95% do edifício seja construído em fábrica antes do transporte e montagem no local.

2.2 Estruturas modulares em aço

Os módulos estruturais podem ser produzidos segundo três tipos de mecanismos de transferência de cargas [2]: (a) módulos apoiados nos cantos (b) módulos com apoio contínuo e (c) módulos não resistentes. Os módulos com apoio contínuo transferem as cargas através das suas paredes laterais, proporcionando um suporte contínuo, mas são geralmente limitados a edifícios até quatro pisos. Em contraste, os módulos apoiados nos cantos possuem um sistema de vigas e pilares, sendo mais adequados para edifícios de média e grande altura, e são os mais utilizados na construção moderna. Os módulos não resistentes não transferem cargas de forma eficaz e dependem de apoio externo ao nível do pavimento.

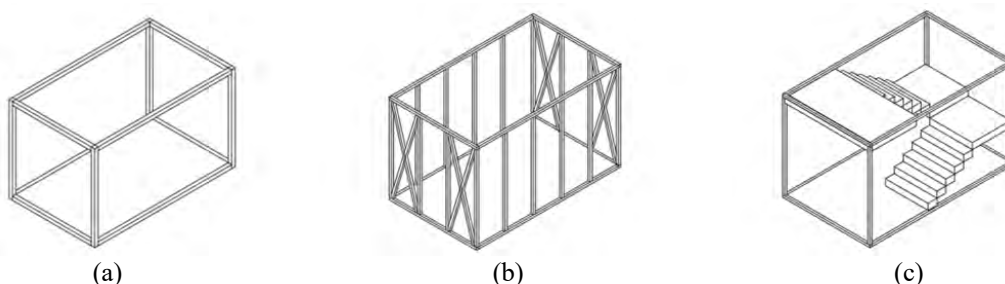


Fig. 1: Tipos de módulos de acordo com o seu mecanismo de transferência de carga: (a) módulos apoiados nos cantos (b) módulos com apoio contínuo e (c) módulos não resistentes.

O desempenho sísmico das estruturas modulares em aço depende da tipologia adotada, da capacidade de deformação e dissipação de energia, bem como da eficácia das ligações. De acordo com Deng et al. [3], estas estruturas podem ser agrupadas em três categorias, conforme o seu sistema de resistência a forças laterais (LFRS): (i) estruturas empilhadas (ou totalmente modulares); (ii) estruturas híbridas com pórticos metálicos, e (iii) estruturas híbridas com núcleos em betão, conforme ilustrado na Fig. 2.

As ligações desempenham um papel fundamental em todos os sistemas, assegurando que os módulos atuam de forma integrada sob cargas gravitacionais, sísmicas e de vento. Além do seu

papel estrutural, estas ligações devem também satisfazer requisitos funcionais, como isolamento acústico, térmico e estanquidade. A Fig. 2 representa os principais tipos de ligações: intramodulares, intermodulares, módulo–estrutura e módulo–fundação.

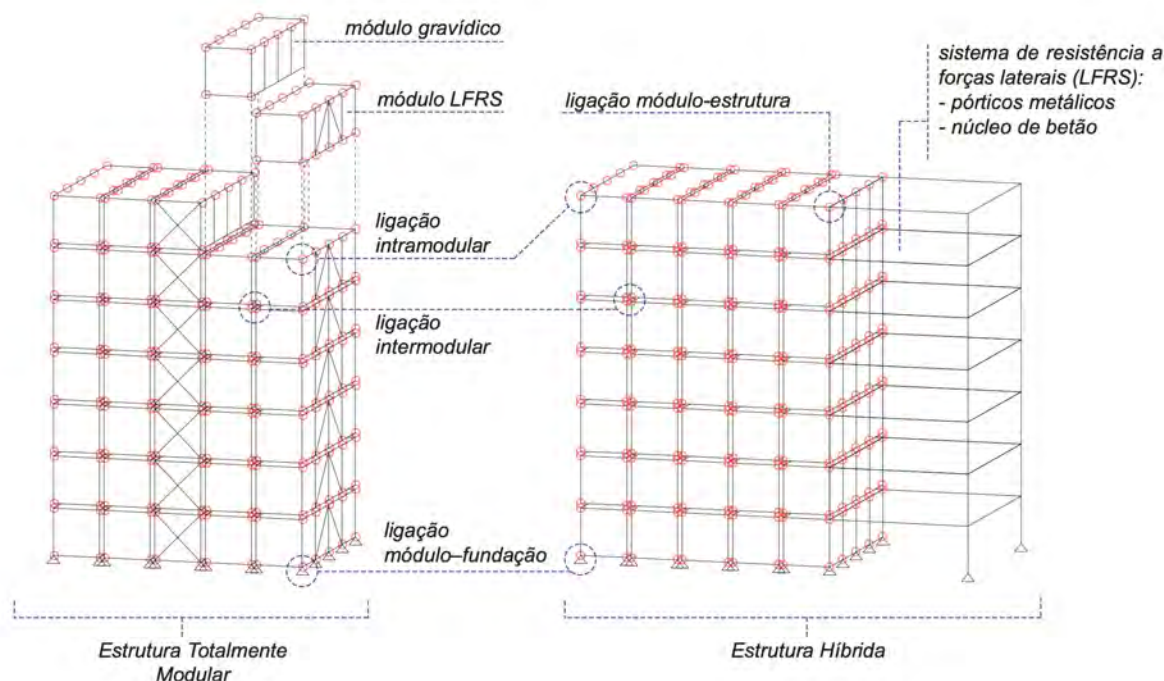


Fig. 2: Tipos de estruturas modulares em aço e suas ligações.

2.2.1 Estruturas empilhadas ou totalmente modulares

O comportamento sísmico das estruturas empilhadas depende exclusivamente do desempenho dos módulos e das suas ligações. Nos módulos com apoio contínuo, as cargas são transferidas pelas paredes laterais; nos módulos com apoio nos cantos, a transferência ocorre através das ligações intermodulares. Sem elementos adicionais de resistência lateral (como contraventamentos ou chapas metálicas), estas estruturas são geralmente limitadas a três pisos e a plantas com geometria regular.

2.2.2 Estruturas híbrida módulo–pórtico metálico

Este sistema combina módulos empilhados com pórticos metálicos tradicionais para reforçar a resistência lateral. Os módulos podem ser apoiados por: (i) um pórtico metálico contraventado, (ii) um pódio metálico ou em betão, ou (iii) uma estrutura principal (em aço ou betão) dentro da qual os módulos são inseridos. O uso de pódios é comum para albergar funções comerciais ou comuns nos pisos inferiores. Estas configurações estão ilustradas nas Fig. 3(a) a 3(c).

2.2.3 Estrutura híbrida módulo–núcleo em betão

Nesta tipologia, os módulos são organizados em torno de um núcleo estrutural em betão armado, responsável por resistir às ações laterais. É frequentemente utilizada em edifícios de grande altura. Para garantir a eficiência construtiva, o planeamento deve assegurar a construção prévia do núcleo em betão antes da montagem dos módulos. Esta configuração encontra-se representada na Fig. 3(d).

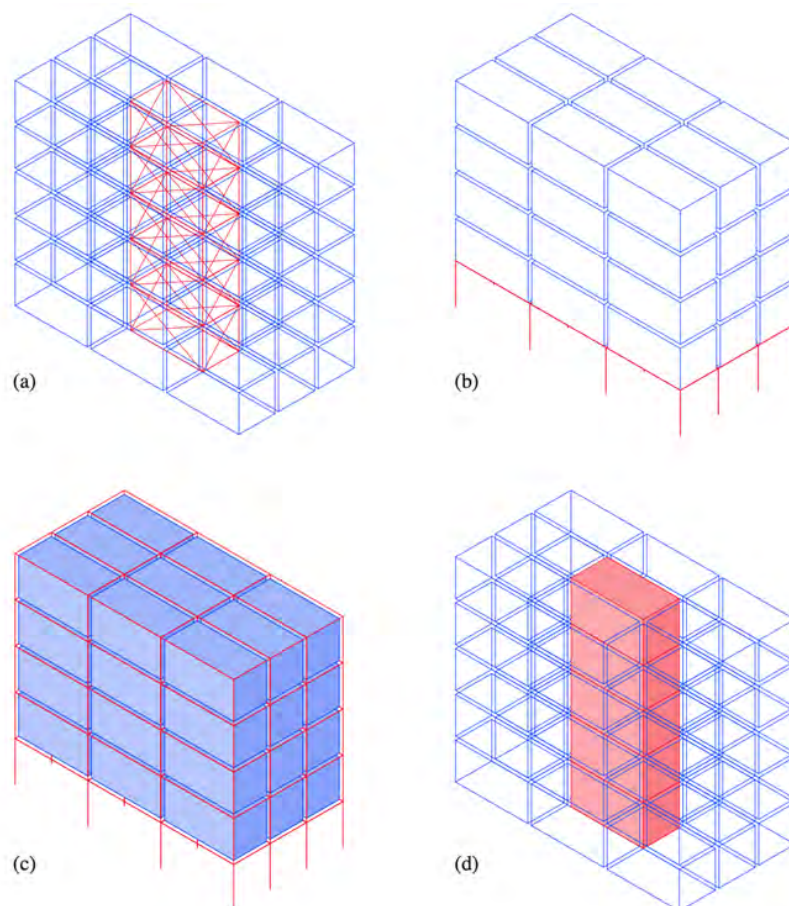


Fig. 3: Tipos de LFRS em estruturas híbridas: (a) pórtico metálico contraventado, (b) pódio metálico ou betão, (c) módulo dentro de uma estrutura principal em aço/betão e (d) núcleo em betão.

3. Principais desafios no dimensionamento sísmico de estruturas modulares em aço

Ao projetar estruturas modulares em aço para ações sísmicas, surgem diversos desafios técnicos, que variam consoante o tipo de sistema estrutural adotado e o nível de sismicidade local. Estruturas empilhadas são geralmente aplicadas em zonas de baixa sismicidade, dado que a sua resposta depende exclusivamente dos módulos e das ligações intermodulares, cujo comportamento sob ação sísmica ainda não é totalmente compreendido. Já as estruturas híbridas, que integram sistemas de resistência a forças laterais (LFRS) tradicionais — como pórticos metálicos ou núcleos em betão — são mais comuns em zonas de média a elevada sismicidade, por cumprirem os requisitos das normas sísmicas atuais.

No entanto, mesmo nestes sistemas híbridos, os módulos empilhados interagem diretamente com os elementos estruturais principais, influenciando a resposta global da estrutura. Assim, os principais desafios do projeto sísmico mantêm-se, incluindo o dimensionamento adequado das ligações intermodulares, intramodulares, módulo-fundação e módulo-estrutura/núcleo. As descontinuidades nos diafragmas entre módulos podem comprometer a distribuição eficiente das forças laterais, aumentando a flexibilidade estrutural. Além disso, os mecanismos de dissipação de energia, fundamentais para o desempenho sísmico, dependem da capacidade dos LFRS em acomodar deformações plásticas. Por fim, é essencial garantir uma modelação e análise estrutural rigorosa, que permita prever com precisão o comportamento dinâmico do edifício modular.

3.1 Ligações

3.1.1 Ligações intermodulares

As ligações intermodulares (IMCs) são elementos fundamentais no desempenho estrutural dos sistemas de edifícios modulares (MBSs), assegurando a transferência de cargas, a resistência a forças laterais e a integridade global da estrutura sob ações como sismos ou vento. Existe consenso na comunidade científica de que estas ligações são determinantes no comportamento de MBSs em aço sujeitos a carregamentos laterais.

Annan et al. [4] compararam o comportamento de uma estrutura contraventada convencional com uma modular, sob cargas cíclicas reversas, concluindo que a presença de ligações verticais entre vigas de piso e de teto influenciou significativamente o desempenho da estrutura modular. De forma semelhante, Fathieh et al. [5], através de análises não lineares pushover e dinâmicas incrementais (IDA) num modelo de 4 pisos no OpenSees, verificaram que as IMCs condicionam a formação de rótulas plásticas e a distribuição da inelasticidade entre pilares superiores e inferiores durante sismos.

Além de garantir a transferência de cargas gravitacionais e laterais, as IMCs podem contribuir para o sistema de resistência lateral (LFRS), como demonstrado por Gunawardena et al. [6]. Lacey et al. [7] mostraram, num estudo com SAP2000 sobre um edifício modular em aço de 6 pisos, que variações na rigidez das IMCs têm impacto direto na capacidade da estrutura resistir a cargas laterais. Em sistemas puramente modulares, sem LFRS adicionais, a estabilidade sísmica depende de ligações suficientemente robustas.

Devido à sua importância, o estudo do comportamento sísmico das IMCs tem ganho destaque, com investigações experimentais que avaliam modos de rotura, resistência, rigidez, capacidade de deformação e dissipação de energia, bem como propriedades mecânicas não lineares. Entre os contributos relevantes destacam-se Chen et al. [8,9], Lee et al. [10], Deng et al. [11], Sanches et al. [12], Dai et al. [13], Wang et al. [14], Yang et al. [15,16], Zhai et al. [17] e Zhang et al. [18].

3.1.2 Ligações intramodulares

As ligações intramodulares unem os elementos estruturais dentro de cada módulo e, na prática, recorrem frequentemente a soluções soldadas ou aparafusadas, embora a investigação sobre o seu desempenho ainda seja limitada. Annan et al. [19,20] analisaram sistemas de pavimento em edifícios modulares em aço, destacando o comportamento semi-rígido das ligações soldadas entre vigas secundárias (*stringers*) e vigas principais, que originam momentos negativos significativos nas extremidades das vigas secundárias e forças de tração axiais. Os autores propuseram uma metodologia de dimensionamento passo a passo para estes elementos e ligações.

Zhang et al. [21] estudaram, através de ensaios cíclicos e análise numérica, as ligações entre pilares e acessórios de canto em casas modulares leves do tipo ATLS, contribuindo para: (i) compreender melhor este tipo de ligação, distinto das soluções convencionais; (ii) apoiar o seu dimensionamento, considerando cargas axiais e pormenorização de parafusos e placas de extremidade; e (iii) validar a sua eficácia sísmica.

Srisangeerthan et al. [22] defendem o uso de ligações simples nas conexões intramodulares, aproveitando as condições controladas de fabrico. Já Luo et al. [23] testaram três tipos de ligações viga-pilar, concluindo que a ligação com placa de extremidade e enrijecedor apresenta melhor desempenho para unir vigas RHS a pilares SHS, superando as ligações soldadas e as placas de extremidade simples em termos de resistência e rigidez.

As ligações intramodulares são determinantes para a rigidez do módulo e para o comportamento global da estrutura, sobretudo sob ações laterais como vento e sismos. É, por isso, necessária investigação adicional para compreender e otimizar o seu desempenho sísmico.

3.1.3 Ligações módulo - fundações

Os módulos devem ser ancorados de forma eficaz à fundação para evitar o derrubamento e deslizamento. As estruturas modulares em aço podem assentar sobre fundações convencionais *in situ* ou pré-fabricadas em betão. Park et al. [24] propuseram e testaram uma ligação embebida entre módulo e fundação, concebida para acelerar a construção e reduzir custos, especialmente em edifícios de média altura.

A solução consiste em quatro pilares em aço soldados a uma placa de extremidade circular ou losangular, embebida na fundação em betão. Ensaios experimentais avaliaram o efeito da profundidade de embebedimento, da geometria da placa e da presença de conectores de corte, analisando resistência, ductilidade e modos de rotura.

Os resultados mostraram que: (i) maior profundidade de embebedimento aumenta resistência e ductilidade, enquanto embebedimento reduzido pode levar à rotura por arranque; (ii) a forma da placa tem impacto pouco significativo; (iii) conectores de corte, apesar de limitarem a separação na interface, podem induzir rotura mais frágil.

A ligação proposta apresenta potencial para oferecer elevada resistência e ductilidade na transferência de cargas, mas requer investigação adicional para validar o dimensionamento e otimizar o seu desempenho.

3.1.4 Ligações módulo - pórtico/núcleo em betão

No sistema estrutural híbrido, o pórtico resistente ou o núcleo em betão desempenha a função principal de resistir a forças laterais, como o vento e os sismos. A ligação entre o módulo e o pórtico/núcleo em betão é crucial para a transferência das cargas laterais dos módulos empilhados para o pórtico ou para o núcleo em betão. Na prática, são geralmente utilizadas ancoragens metálicas embebidas e soldaduras tradicionais para realizar essa ligação. Exemplos incluem a ligação aparafusada entre o módulo e o núcleo em betão, com parafusos de ancoragem e chapa de reforço, proposta por Lee et al. [10], e a secção em ângulo soldada tanto à viga de teto como à chapa de aço embebida na parede do núcleo em betão, sugerida por Chua et al. [25].

Contudo, é necessária uma investigação sistemática para esclarecer o mecanismo de transferência de cargas entre os módulos empilhados e o pórtico ou núcleo estrutural principal sob ação sísmica, bem como para propor um modelo de análise simplificado e adequado para estas ligações. Além disso, é fundamental definir o desempenho sísmico e as considerações de dimensionamento específicas para a ligação módulo–estrutura/núcleo em betão.

3.2 Descontinuidades dos diafragmas

Os diafragmas são elementos estruturais que transferem as cargas laterais para o sistema resistente às forças laterais (LFRS) e integram todos os elementos verticais da estrutura. Em edifícios convencionais — com lajes de betão moldadas *in situ* ou placas metálicas colaborantes preenchidas com betão — são frequentemente idealizados como sistemas rígidos e contínuos. Esta idealização aplica-se quando não existem irregularidades horizontais e a relação vão-altura é ≤ 3 para dimensionamento sísmico e ≤ 2 para vento [26,27]. Nessas condições, assume-se que as deformações no plano do diafragma são desprezáveis e que a distribuição das cargas laterais é proporcional à rigidez dos elementos resistentes.

De acordo com as prescrições atuais [28,29], a classificação da rigidez do diafragma baseia-se na razão entre o deslocamento máximo relativo ao LFRS (Δ_{dia}) e o *inter-storey drift* médio do LFRS (Δ_{LFRS}): valores $< 0,5$ indicam diafragma rígido, $> 2,0$ diafragma flexível, e valores intermédios caracterizam diafragmas deformáveis.

Nos edifícios modulares, a presença de descontinuidades devido à modularização aumenta a probabilidade de diafragmas flexíveis, agravada em edifícios de vários andares quando a rigidez das ligações e das unidades de pavimento/teto é insuficiente. Essa flexibilidade pode

comprometer a estabilidade estrutural durante a ocorrência de eventos sísmicos, potenciando efeitos de segunda ordem. Assim, é essencial avaliar a influência da rigidez do diafragma na resposta sísmica e adotar soluções que assegurem diafragmas adequadamente rígidos ou estratégias para mitigar os efeitos da flexibilidade.

Srisangeerthan et al. [30] propuseram um método numérico para calibrar a rigidez de diafragmas em edifícios modulares de vários andares, considerando as deformações por corte nos módulos e por corte e axial nas ligações. Ajustando a rigidez das ligações e das unidades modulares, é possível controlar a deformação global do diafragma para atingir classificações de comportamento rígido, deformável ou flexível.

3.3 Mecanismos de dissipação de energia

Os mecanismos de dissipação de energia dependem diretamente do sistema de resistência lateral (LFRS) adotado. Contudo, a escassez de estudos experimentais, especialmente em sistemas totalmente modulares, constitui uma lacuna significativa no conhecimento do seu comportamento sísmico e levanta dúvidas sobre a aplicação eficaz dos critérios de *capacity design* para assegurar uma hierarquia adequada de resistências, tanto ao nível dos módulos individuais como da estrutura global.

Ensaio realizados por Anna et al. [4] mostraram que, face a cargas cíclicas, uma estrutura modular contraventada apresentou deformações por flexão no segmento de pilar entre as vigas de teto e pavimento, enquanto a estrutura convencional revelou encurvadura fora do plano do contraventamento. De forma semelhante, Gunawardena et al. [6], em análises dinâmicas não lineares de um edifício de dez andares, observaram a formação inicial de rótulas plásticas nos pilares de suporte abaixo das vigas de pavimento. Sanches et al. [31] verificaram que, em edifícios modulares de baixa altura, as rótulas plásticas surgem primeiro nos contraventamentos, enquanto em edifícios altos ocorre um mecanismo misto, com rótulas plásticas em contraventamentos, vigas pilares, sobretudo sob sismos severos.

A montagem modular origina zonas de ligação onde convergem grupos de pelo menos duas vigas e dois ou quatro pilares. É necessária investigação para compreender o seu comportamento conjunto e a influência na distribuição da plasticidade. Xu et al. [32] demonstraram que a ligação eficaz entre vigas de pavimento e teto, através de vigas laminadas com canais duplos, aumenta a integridade estrutural, a capacidade resistente e a rigidez. Esta ação composta promove uma transferência de cargas mais eficiente e uniforme, embora o deslizamento na interface deva ser considerado no dimensionamento, pois pode reduzir essa eficiência.

3.4 Modelação e análise estrutural

A modelação da flexibilidade das ligações intermodulares e da descontinuidade das lajes de pavimento nos módulos é crucial para a análise estrutural, pois estes elementos influenciam significativamente a rigidez global e a resposta a cargas laterais. As ligações intermodulares dividem-se em dois tipos: viga–viga, que unem as vigas de pavimento dos módulos superiores às vigas de teto dos inferiores (Lee et al. [10]; Chen et al.[8,9]; Zhai et al. [17]), e coluna–coluna, que ligam os pilares dos módulos superiores e inferiores (Chen et al.[33]; Sendanayake et al.[34]; Yang et al. [15,16]).

O dimensionamento destas ligações deve considerar conectividade horizontal e vertical. A primeira é frequentemente modelada ligando elementos barra entre pilares adjacentes, podendo incluir elementos de mola para representar a rigidez (Chua et al. [25]). A conectividade vertical pode ser modelada prolongando os eixos centrais dos pilares e ligando-os aos pilares inferiores [35].

Alguns estudos simplificam a ligação vertical com restrições articuladas (*pin-ended*), solução comum em modelação de pórticos [5],[6] mas que pode não reproduzir fielmente o comportamento real das ligações intermodulares. Como demonstrado por Chua et al. [25], o uso de modelos simplificados pode falhar na previsão da resposta de edifícios puramente modulares, especialmente quando os pilares estão sujeitos a tração devido à resistência a cargas laterais.

Para ultrapassar estas limitações, os autores propõem um modelo de molas para todas as ligações intermodulares, composto por elementos lineares e multilineares, compatível com software comercial. Contudo, antes da sua aplicação, é fundamental avaliar as propriedades de rigidez de cada componente estrutural da ligação.

4. Conclusões

A construção modular em aço apresenta-se como uma solução promissora, destacando-se pela rapidez de execução, controlo de qualidade e sustentabilidade. Contudo, a sua aplicação em zonas de elevada sismicidade coloca desafios significativos de projeto e análise estrutural.

O desempenho sísmico destes edifícios é condicionado por fatores como as ligações intermodulares e intramodulares, a ligação dos módulos a pórticos metálicos ou núcleos de betão armado, a rigidez dos diafragmas e os mecanismos de dissipação de energia. As ligações intermodulares são determinantes para a transferência de cargas e a integridade global da estrutura, sendo que variações na sua rigidez podem influenciar a formação de rótulas plásticas e a resposta estrutural. Já as ligações intramodulares afetam a rigidez e a estabilidade local, exigindo investigação adicional.

As ligações módulo–estrutura principal, como núcleos ou pórticos, são muitas vezes modeladas de forma simplificada, o que pode não representar fielmente o seu comportamento sísmico, justificando o desenvolvimento de modelos mais realistas.

A rigidez dos diafragmas é outro aspeto crítico, frequentemente afetada pelas descontinuidades entre módulos, comprometendo a distribuição das forças laterais e a estabilidade. Métodos numéricos recentes para calibrar a rigidez dos diafragmas surgem como solução promissora.

Por fim, os mecanismos de dissipação de energia variam conforme a altura e configuração estrutural, tornando essencial adotar um dimensionamento baseado na hierarquia de resistências e na interação entre vigas, pilares e contraventamentos. O aprofundamento do conhecimento nestas áreas será decisivo para assegurar a segurança e a eficiência sísmica das estruturas modulares em aço.

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.

Referências

1. Lawson R. M. Ogden R. G., P.R. ,Grubb P.J., P.O.S.O. Developments in Pre-Fabricated Systems in light Steel and Modular Construction. The Structural Engineer 2005, 83, 28–35.
2. Lawson, M.; Ogden, R. “Hybrid” Light Steel Panel and Modular Systems. Thin-Walled Structures 2008, 46, 720–730, doi:10.1016/j.tws.2008.01.042.

3. Deng, E.F.; Zong, L.; Ding, Y.; Zhang, Z.; Zhang, J.F.; Shi, F.W.; Cai, L.M.; Gao, S.C. Seismic Performance of Mid-to-High Rise Modular Steel Construction - A Critical Review. *Thin-Walled Structures* 2020, 155.
4. Annan, C.D.; Youssef, M.A.; El Naggar, M.H. Experimental Evaluation of the Seismic Performance of Modular Steel-Braced Frames. *Eng Struct* 2009, 31, 1435–1446, doi:10.1016/j.engstruct.2009.02.024.
5. Fathieh, A.; Mercan, O. Seismic Evaluation of Modular Steel Buildings. *Eng Struct* 2016, 122, 83–92, doi:10.1016/j.engstruct.2016.04.054.
6. Gunawardena, T.; Ngo, T.; Mendis, P. Behaviour of Multi-Storey Prefabricated Modular Buildings under Seismic Loads. *Earthquake and Structures* 2016, 11, 1061–1076, doi:10.12989/eas.2016.11.6.1061.
7. Lacey, A.W.; Chen, W.; Hao, H.; Bi, K. Structural Response of Modular Buildings – An Overview. *Journal of Building Engineering* 2018, 16, 45–56.
8. Chen, Z.; Liu, J.; Yu, Y.; Zhou, C.; Yan, R. Experimental Study of an Innovative Modular Steel Building Connection. *J Constr Steel Res* 2017, 139, 69–82, doi:10.1016/j.jcsr.2017.09.008.
9. Chen, Z.; Liu, J.; Yu, Y. Experimental Study on Interior Connections in Modular Steel Buildings. *Eng Struct* 2017, 147, 625–638, doi:10.1016/j.engstruct.2017.06.002.
10. Lee, S.; Park, J.; Kwak, E.; Shon, S.; Kang, C.; Choi, H. Verification of the Seismic Performance of a Rigidly Connected Modular System Depending on the Shape and Size of the Ceiling Bracket. *Materials* 2017, 10, doi:10.3390/ma10030263.
11. Deng, E.F.; Zong, L.; Ding, Y.; Dai, X.M.; Lou, N.; Chen, Y. Monotonic and Cyclic Response of Bolted Connections with Welded Cover Plate for Modular Steel Construction. *Eng Struct* 2018, 167, 407–419, doi:10.1016/j.engstruct.2018.04.028.
12. Sanches, R.; Mercan, O.; Roberts, B. Experimental Investigations of Vertical Post-Tensioned Connection for Modular Steel Structures. *Eng Struct* 2018, 175, 776–789, doi:10.1016/j.engstruct.2018.08.049.
13. Dai, X.M.; Zong, L.; Ding, Y.; Li, Z.X. Experimental Study on Seismic Behavior of a Novel Plug-in Self-Lock Joint for Modular Steel Construction. *Eng Struct* 2019, 181, 143–164, doi:10.1016/j.engstruct.2018.11.075.
14. Wang, Y.; Xia, J.; Ma, R.; Xu, B.; Wang, T. Experimental Study on the Flexural Behavior of an Innovative Modular Steel Building Connection with Installed Bolts in the Columns. *Applied Sciences (Switzerland)* 2019, 9, doi:10.3390/app9173468.
15. Yang, C.; Chen, H.; Wang, X.; Wang, Q.; Zhang, Z.; Ou, J. Seismic Behavior of Novel Modular Structural Joint with Grouted Channel Connection. *J Constr Steel Res* 2023, 205, doi:10.1016/j.jcsr.2023.107891.
16. Yang, C.; Wang, X.; Wang, Q.; Ou, J. Seismic Performance of Cruciform Bolted Joints with Various Reinforcing Details in Modular Steel Construction. *Eng Struct* 2023, 285, doi:10.1016/j.engstruct.2023.116069.
17. Zhai, S.Y.; Lyu, Y.F.; Cao, K.; Li, G.Q.; Wang, W.Y.; Chen, C. Experimental-Numerical Investigation and Design of Bolted-Cover Plate Connections under Bending for Modular Steel Buildings. *Journal of Building Engineering* 2023, 75, doi:10.1016/j.jobbe.2023.107057.
18. Zhang, G.; Xu, L.; Li, Z. Development and Experimental Verification of Self-Centering Haunched Plug-In Modular Connections. *Journal of Structural Engineering* 2023, 149, doi:10.1061/jsendh.steng-12029.
19. Annan C.D., Y.M.A. and E.-N.M.H. Effect of Directly Welded Stringer-to-Beam on the Analysis and Design of Modular Building Floors. *Advances in Structural Engineering* 2009, 12, No.3, 373–383.

20. Annan, C.D.; Youssef, M.A.; El-Naggar, M.H. Analytical Investigation of Semi-Rigid Floor Beams Connection in Modular Steel Structures.; 33 rd Annual General Conference of the Canadian Society for Civil Engineering: Toronto, Canada, May 2005.
21. Zhang, J.F.; Tian, G.F.; Zhao, J.J.; Deng, E.F.; Wen, M.G.; Ye, L.; Guo, X.S.; Zhou, J.J.; Wang, S.Q.; Xing, X.Y. Experimental Study on Seismic Performance of the Connection for ATLS Modular House. *J Constr Steel Res* 2020, 170, doi:10.1016/j.jcsr.2020.106118.
22. Srisangeerthan, S.; Hashemi, M.J.; Rajeev, P.; Gad, E.; Fernando, S. Review of Performance Requirements for Inter-Module Connections in Multi-Story Modular Buildings. *Journal of Building Engineering* 2020, 28.
23. Luo, F.J.; Ding, C.; Styles, A.; Bai, Y. End Plate–Stiffener Connection for SHS Column and RHS Beam in Steel-Framed Building Modules. *International Journal of Steel Structures* 2019, 19, 1353–1365, doi:10.1007/s13296-019-00214-6.
24. Park, K.S.; Moon, J.; Lee, S.S.; Bae, K.W.; Roeder, C.W. Embedded Steel Column-to-Foundation Connection for a Modular Structural System. *Eng Struct* 2016, 110, 244–257, doi:10.1016/j.engstruct.2015.11.034.
25. Chua, Y.S.; Liew, J.Y.R.; Pang, S.D. Modelling of Connections and Lateral Behavior of High-Rise Modular Steel Buildings. *J Constr Steel Res* 2020, 166, doi:10.1016/j.jcsr.2019.105901.
26. Moehle, J.P.; Hooper, J.D.; Meyer, T.R. Seismic Design of Cast-in-Place Concrete Diaphragms, Chords, and Collectors: A Guide for Practicing Engineers Second Edition; Gaithersburg, MD, 2016;
27. Sabelli, R.; Sabol, T.A.; Easterling, W.S. Seismic Design of Composite Steel Deck and Concrete-Filled Diaphragms A Guide for Practicing Engineers; 2011;
28. Federal Emergency Management Agency (FEMA) FEMA 356: Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings.; Washington, D.C., United States, 2000;
29. American Society of Civil Engineers and Structural Engineering Institute ASCE/SEI-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures; American Society of Civil Engineers, Structural Engineering Institute: Reston, Virginia, US, 2013; p. 593;.
30. Srisangeerthan, S.; Hashemi, M.J.; Rajeev, P.; Gad, E.; Fernando, S. Numerical Study on the Effects of Diaphragm Stiffness and Strength on the Seismic Response of Multi-Story Modular Buildings. *Eng Struct* 2018, 163, 25–37, doi:10.1016/j.engstruct.2018.02.048.
31. Sanches, R.; Tao, J.; Fathieh, A.; Mercan, O. Investigation of the Seismic Performance of Braced Low-, Mid- and High-Rise Modular Steel Building Prototypes. *Eng Struct* 2021, 234, doi:10.1016/j.engstruct.2021.111986.
32. Xu, B.; Xia, J.; Chang, H.; Ma, R.; Zhang, L. A Comprehensive Experimental-Numerical Investigation on the Bending Response of Laminated Double Channel Beams in Modular Buildings. *Eng Struct* 2019, 200, doi:10.1016/j.engstruct.2019.109737.
33. Chen Y., H.C. and P.J. Stability Study on Tenon-Connected SHS and CFST Columns in Modular Construction. *Steel and Composite Structures* 2019, 30.
34. Sendanayake, S. V.; Thambiratnam, D.P.; Perera, N.J.; Chan, T.H.T.; Aghdamy, S. Enhancing the Lateral Performance of Modular Buildings through Innovative Inter-Module Connections. *Structures* 2021, 29, 167–184, doi:10.1016/j.istruc.2020.10.047.
35. Lacey, A.W.; Chen, W.; Hao, H.; Bi, K. Review of Bolted Inter-Module Connections in Modular Steel Buildings. *Journal of Building Engineering* 2019, 23, 207–219.