



## CONSTRUÇÃO MODULAR EM AÇO: CONCEITOS E SOLUÇÕES DO PROJETO R2U

Ana Francisca Santos<sup>a,\*</sup>, David Andrade<sup>a</sup>, Filip Ljubinković<sup>a</sup>, Jorge Conde<sup>b</sup>, Sree Sabari<sup>a</sup>, Luís Simões da Silva<sup>a</sup>, Tiago Soares<sup>c</sup>, João Gonçalves<sup>c</sup> e Nuno Neves<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *University of Coimbra, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Coimbra, Portugal*

<sup>b</sup> *Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Física y Estructuras de Edificación, Madrid, Spain.*

<sup>c</sup> *DST, Braga*

\* Ana Francisca Santos. Tel.: +351 914 462 650; E-mail: francisca.santos@uc.pt

**Resumo.** A construção modular tem-se afirmado como uma solução inovadora que acelera prazos, aumenta a qualidade e reduz o impacto ambiental face à construção tradicional. Ao produzir componentes em ambiente controlado e posteriormente montá-los em obra, esta abordagem promove a industrialização, a eficiência, a precisão e a redução de desperdícios. O projeto R2U | Modular Systems desenvolve sistemas modulares tridimensionais em aço, visando transformar o setor da construção em Portugal, do modelo convencional para um modelo industrializado, eficiente e sustentável. O projeto foca-se no comportamento global dos edifícios modulares e em ligações intermodulares inovadoras, cruciais para estabilidade, resistência, adaptabilidade e reutilização rápida dos módulos. Este artigo apresenta os conceitos fundamentais do sistema estrutural R2U, destacando o seu potencial para práticas de construção sustentáveis, adaptáveis e reutilizáveis, promovendo a adoção generalizada de soluções modulares.

## 1. Introdução

A construção modular (CM) tem-se afirmado como alternativa competitiva à construção convencional, ao combinar a industrialização de processos com montagem rápida em obra [1]. Baseada sobretudo em unidades volumétricas tridimensionais, permite níveis de pré-fabricação superiores a 90% [2], reduzindo significativamente a mão de obra, o tempo de execução e a ocupação do terreno em até 50–60% [1]. Além disso, a produção em ambiente controlado melhora a qualidade, diminui consumos de energia e recursos e pode reduzir resíduos em até 90% [3], favorecendo a reciclagem e a reutilização ao longo do ciclo de vida [4,5].

Apesar destas vantagens, a quota de mercado da CM permanece reduzida (5–10% em países como Alemanha, EUA e Reino Unido, e <1% em edifícios residenciais de grande escala) [3]. Entre as principais barreiras destacam-se a ausência de normas específicas, a limitada experiência da indústria e a falta de sistemas de ligação intermodular de elevado desempenho [8, 9].

Ainda assim, prevê-se um crescimento acelerado do setor, com um aumento anual médio de 6,2% na Europa [10]. Em Portugal, embora ainda incipiente, a CM deverá crescer 221% até 2025, sobretudo em habitação [11]. Persistem, no entanto, entraves como a reduzida investigação nacional e a inexistência de certificação [11].

Neste contexto, o projeto R2U | Modular Systems surge como uma iniciativa dedicada ao desenvolvimento da CM em aço, com foco no comportamento global dos edifícios e no estudo de ligações intermodulares inovadoras. O objetivo é impulsionar práticas construtivas sustentáveis, adaptáveis e reutilizáveis, promovendo a transformação do setor em Portugal.

Este trabalho apresenta assim os conceitos fundamentais do sistema modular R2U, incluindo o desenvolvimento de duas soluções de ligações intermodulares completamente desmontáveis e reutilizáveis, destacando o seu potencial para promover práticas de construção sustentáveis, adaptáveis e reutilizáveis.

## 2. Projeto Projeto R2U | Modular Systems

O projeto R2U Technologies – Modular Systems, financiado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), reúne instituições académicas e empresas com o objetivo de promover a inovação na construção modular em Portugal [10]. Pretende desenvolver sistemas construtivos modulares em aço, alinhados com as metas nacionais e europeias de industrialização, digitalização e sustentabilidade.

Entre os principais resultados previstos está a criação de protótipos à escala real, nomeadamente o Living Lab (Fig.1), destinado a validar soluções construtivas inovadoras.



Fig. 1: R2U Living Lab [10]

O projeto está estruturado em vários Work Packages (WP). Este artigo centra-se no trabalho desenvolvido pela Universidade de Coimbra no âmbito do WP2 – Materiais, dedicado ao estudo e desenvolvimento de sistemas estruturais pré-fabricados de alto desempenho para construção modular, incluindo a análise do comportamento estrutural de módulos e o desenvolvimento de protótipos à escala real (Fig. 2).

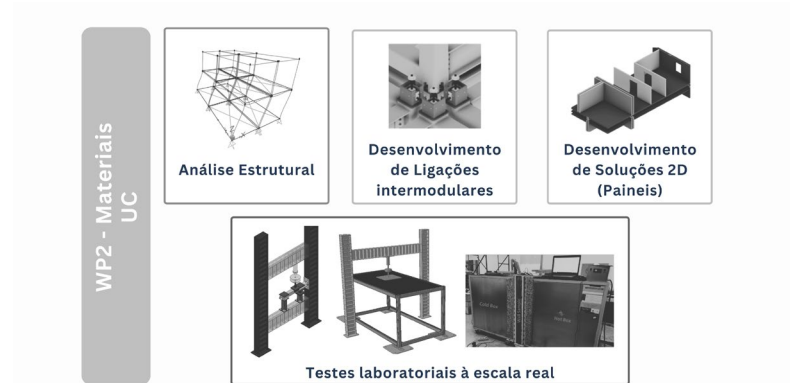


Fig. 2: WP2 – Materiais: UC

### 3. Sistema Modular R2U

O Sistema modular R2U é composto por módulos tridimensionais em aço, com dimensões de 3,3 m x 6,6 m x 3,3 m ou 3,3 m x 6,6 m x 3,3 m. O chassi dos módulos é composto por colunas e vigas com secção tubular quadrada SHS (Fig. 3a). Entre módulos, existe uma abertura tanto na vertical como na horizontal (Fig. 3b). Este espaço é utilizado para a passagem de instalações técnicas e é onde se acomodam as ligações intermodulares.

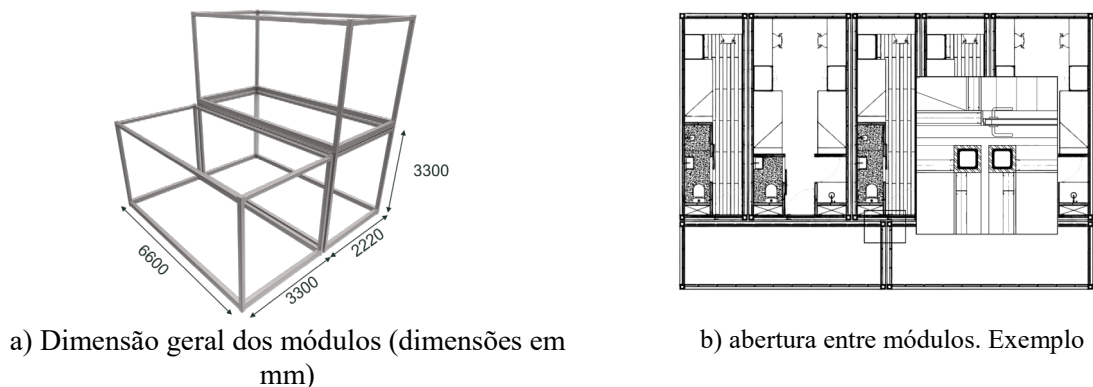


Fig. 3: Geometria dos módulos R2U

Os trabalhos em desenvolvimento relativos ao sistema modular passaram por uma análise preliminar do desempenho estrutural dos módulos, considerando o dimensionamento aos estados Limites Últimos, de Serviço e vibrações de acordo com as normas europeias em vigor [14].

Adicionalmente, as soluções de parede e lajes dos módulos foram e estão a ser alvo de estudos no que diz respeito ao seu desempenho funcional (térmica, acústica, impacto...) [15].

Posteriormente, prevêem-se testes em módulos empilhados à escala real para avaliar a rigidez lateral do sistema, questões funcionais (térmica, acústica...) e a resistência ao fogo. Este último tópico é bastante relevante, pois as aberturas entre módulos oferecem múltiplas vias de propagação de incêndio que não existem na construção convencional [16] (Fig. 4c).

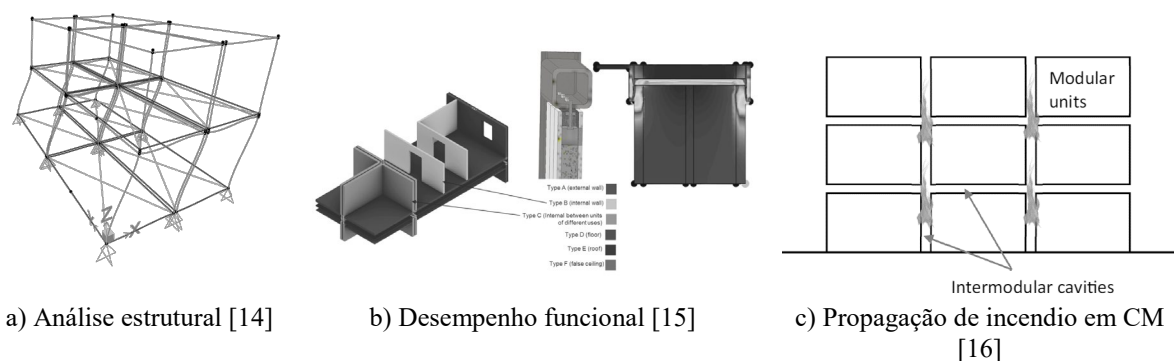


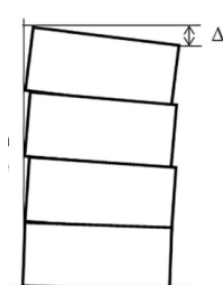
Fig. 4: Análise do desempenho dos módulos

## 4. Ligações intermodulares

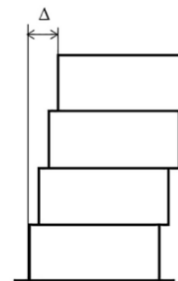
### 4.1. Introdução

O desempenho estrutural dos edifícios modulares depende em grande medida das ligações intermodulares (IMCs) [11]. Ao contrário da construção convencional, em que as ligações integram uma estrutura contínua com função essencialmente estrutural, na construção modular as IMCs desempenham também um papel funcional relevante. Como a construção modular é composta por elementos independentes (módulos), é nas ligações que se garante a continuidade estrutural.

Além disso, devido a imperfeições no fabrico dos módulos, desalinhamentos tanto na altura como na posição horizontal durante o empilhamento são inevitáveis (Fig. 5). Por isso, as ligações intermodulares devem ser projetadas para prever e corrigir estes desalinhamentos.



a) Tolerâncias verticais



a) Tolerâncias horizontais

Fig. 5: Desalinhamento horizontal e vertical devido às tolerâncias [1]

Neste sentido, o detalhe construtivo destes elementos é de elevada importância, pois influencia diretamente a rigidez global, a transferência de esforços e a estabilidade [12]. Nos últimos anos, tem-se verificado um crescimento significativo no número de artigos publicados sobre soluções para ligações intermodulares. Em [11], os autores apresentam quadros de classificação que agrupam as IMCs com base na sua geometria, no mecanismo de distribuição de esforços e no método de montagem/desmontagem, destacando problemas persistentes como a limitada ductilidade, as dificuldades associadas às tolerâncias de fabrico, bem como a reduzida capacidade de reparação e reutilização.

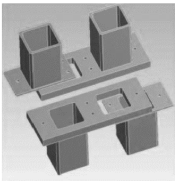
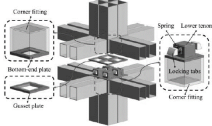
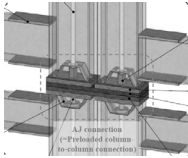
Das diferentes soluções apresentadas, em termos de mecanismo, as ligações intermodulares podem agrupar-se em: ligações aparafusadas, ligações mecânicas e ligações pré-esforçadas. Na Tabela 1 apresentam-se algumas soluções com descrição sumária, vantagens e desvantagens.

Observa-se que o uso de varões ou parafusos é uma solução recorrente para garantir a resistência a esforços axiais de tração. No entanto, a falta de acesso aos módulos fechados conduz à utilização de varões longos (com a altura total dos módulos) [13] ou ao aperto em zonas exteriores às colunas, ocupando espaço [17].

Para mobilizar os esforços horizontais, é comum a todas as soluções a utilização de uma chapa intermédia que conecta os módulos adjacentes. A introdução de pré-esforço nestas ligações permite aumentar a rigidez lateral do edifício [13] e evitar fenómenos de arranque (uplift) induzidos por ações horizontais. Mais recentemente, alguns autores apresentaram conceitos híbridos, como parafusos em ligas com memória de forma (SMA) ou a incorporação de borrachas de alto amortecimento, com o objetivo de melhorar a ductilidade, a dissipação de energia e o controlo de deslocamentos sob ações sísmicas [18].

As ligações de tipo mecânico [19], como a ilustrada na Tabela 1, apresentam a vantagem de serem geralmente fáceis de montar (sistemas automáticos de encaixe) e de transportar, dado que são normalmente compostas por peças de pequenas dimensões.

No entanto, em todas as soluções destaca-se a ausência de mecanismos eficazes para corrigir desalinhamentos verticais e horizontais decorrentes das tolerâncias de fabrico, conforme já referido (Fig. 5).

Tipo	Ref.	Descrição	Pros	Cons	Fig.
Aparafusada	[17]	Chapa de extremidade aparafusada. Transferência de esforços verticais: parafusos. Transferência de esforços horizontais: chapa intermédia comum aos módulos adjacentes.	Fácil dimensionamento; Inspeção; Bom desempenho na distribuição de esforços .	Não corrige tolerâncias significativas; Lig. exterior às colunas ; Deformação das chapas ,	
Mecânica	[19]	Mecanismo de encaixe automático	Montagem fácil; bom desempenho sísmico; mecanismo de autobloqueio.	Sensível a tolerâncias; requer fabrico preciso para evitar folgas.	
Pré-esforçada	[13]	Varões roscados com acopladores	Fornecer rigidez comparável lateral; montagem rápida e desmontável; evita múltiplos parafusos.	Perda de pré-esforço a longo prazo; Sensível a tolerâncias;	

#### 4.2. Ligações R2U – Desafios e idealização

Como referido na secção anterior, o detalhe construtivo das ligações intermodulares influencia de forma decisiva a rigidez global, a estabilidade e a transferência de esforços nos edifícios modulares. Apesar do interesse crescente da comunidade científica, continuam a verificar-se limitações importantes que condicionam a sua aplicação prática.

O desenvolvimento de soluções de ligação no projeto R2U | Modular Systems focou-se na superação de diversos desafios, incluindo: i) a falta de acesso aos módulos, ii) a gestão das tolerâncias de fabrico, iii) a possibilidade de montagem e desmontagem rápida (soluções sem soldaduras), iv) a transferência eficiente de esforços verticais e horizontais, e v) a capacidade de conectar qualquer número de módulos (Fig. 6), assegurando flexibilidade, robustez e desempenho estrutural consistente.

Para responder a estes desafios, foram desenvolvidas duas soluções inovadoras, já patenteadas, às quais se deu o nome de Long Bolt [20] e Spider [21], concebidas para assegurar tanto a

eficiência estrutural como a funcionalidade dos módulos, em linha com os desafios identificados.

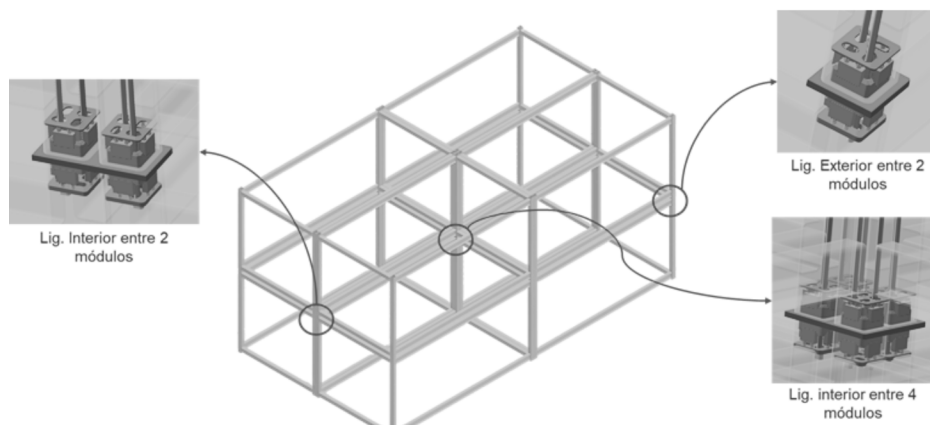


Fig. 6: Posições das ligações intermodulares num edifício modular

#### 4.2.1. Solução Long Bolt

A solução Long Bolt é uma ligação pré-esforçada (Fig. 7a). O sistema é composto por dois varões longos, placas de bloqueio superior e inferior com furos alongados, uma placa guia para auxiliar a inserção dos varões e um bloco central sólido que conecta os módulos adjacentes. A ligação foi concebida para ultrapassar a falta de acesso aos módulos inferiores, assegurando o aperto apenas a partir do módulo superior. Para garantir a correção de desalinhamentos, o sistema inclui cunhas e um bloco central ajustável que compensa tolerâncias horizontais (Fig. 7b).

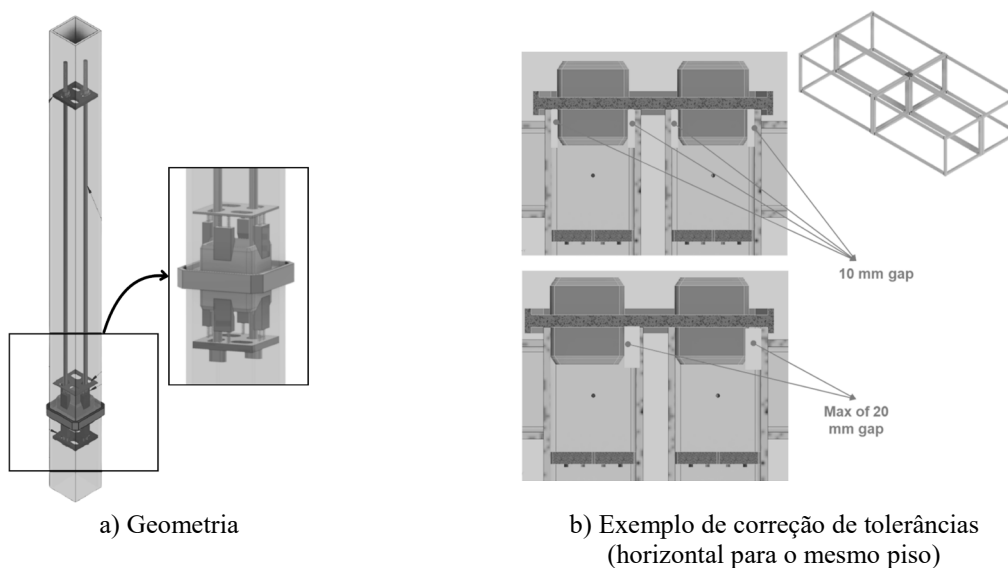


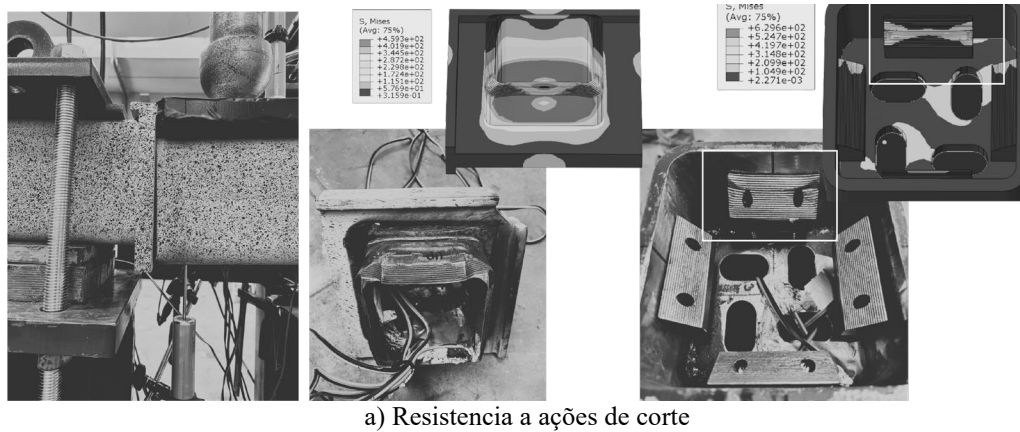
Fig. 7: Solução Long Bolt

A transferência de esforços segue percursos distintos:

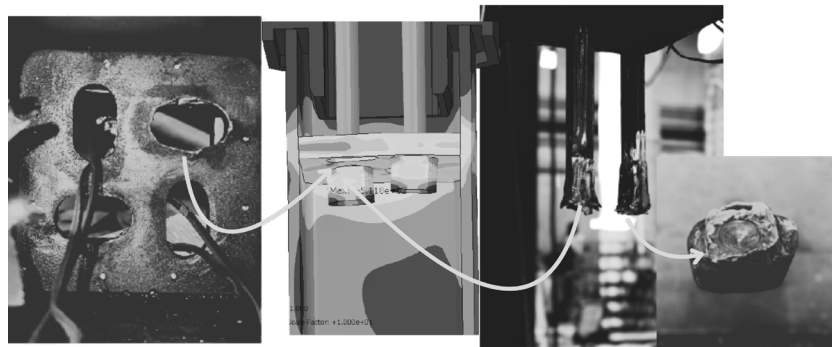
- Compressão: transmitida pelas paredes das colunas ao bloco central, distribuindo-se pelo contacto direto e pelo conjunto bloco-cunhas-placa de bloqueio inferior.
- Tração: mobilizada pela placa de bloqueio superior, passando pelos varões até à placa inferior, e daí para a coluna do módulo inferior.

- Corte: garantido pelo contacto direto entre colunas, cunhas e bloco central, assegurando rigidez lateral e resistência a uplift.

Ensaio experimentais e simulações numéricas confirmaram a eficácia da solução, reproduzindo resistências e modos de rotura consistentes com os pressupostos de dimensionamento (Fig. 8).



a) Resistência a ações de corte



a) Resistência à tração

Fig. 8: Solução Long Bolt – Testes/ FEM para validação do conceito (Imagens FEM [22])

#### 4.2.2. Solução Spider

A solução Spider é uma ligação pré-esforçada composta por um núcleo central rígido do qual partem varões horizontais e verticais (Fig. 9a). Os varões horizontais prolongam-se até ao bloco central dos módulos adjacentes e são pré-esforçados por porca e anilha, criando um mecanismo de expansão que comprime as superfícies internas do bloco e do núcleo. Na direção vertical, a continuidade é assegurada por um varão longo e por uma chapa de bloqueio, em tudo semelhante à solução Long Bolt. Tal como nesta, são utilizadas cunhas para minimizar excentricidades e facilitar a montagem.

A principal inovação da solução Spider reside nos varões horizontais que se estendem entre módulos vizinhos, assegurando a união transversal e permitindo simultaneamente a compensação de tolerâncias horizontais (Fig. 9b).

Apesar do maior número de componentes, a solução Spider apresenta a vantagem de ser mais leve do que a Long Bolt, o que facilita o transporte e a montagem em obra.

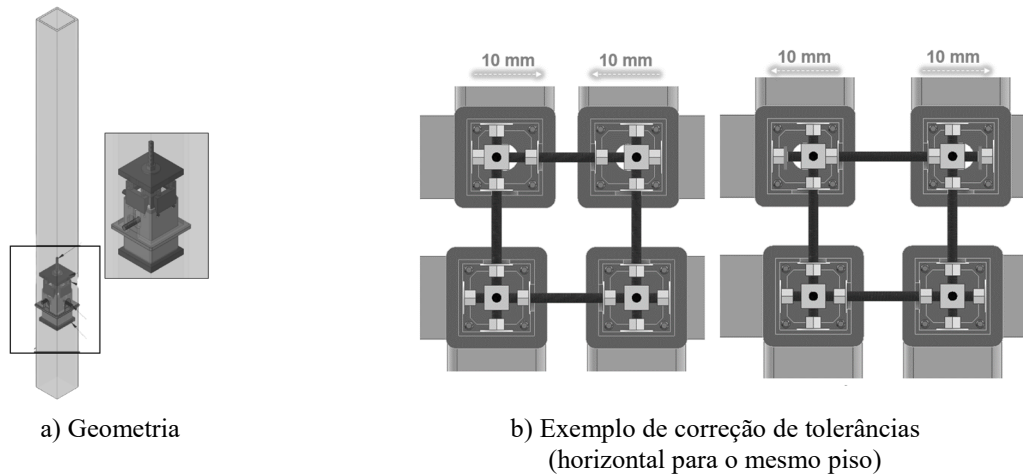


Fig. 9: Solução Spider

A transmissão de esforços processa-se da seguinte forma:

- Compressão e corte: semelhantes ao Long Bolt, assegurados pelo contacto direto entre colunas, bloco central e núcleo rígido.
- Tração: inicialmente mobilizada como uma ligação pré-esforçada, com resistência ao escorregamento dos varões horizontais no núcleo central; uma vez vencido este limite, o mecanismo atua como ligação por esmagamento, assegurando continuidade estrutural mesmo após perda parcial de pré-esforço.

Ensaaios experimentais e análises numéricas comprovaram a eficácia da ligação, confirmando a transmissão de cargas entre módulos e validando os pressupostos de dimensionamento (Fig. 10).

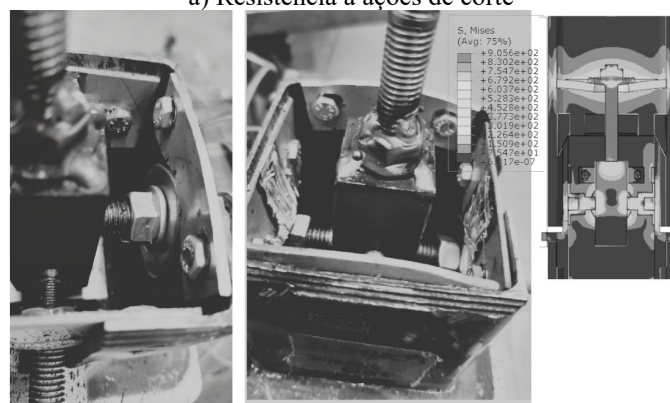


Fig. 10: Solução Spider - Testes de FEM para validação do conceito

## **5. Conclusões e trabalhos futuros**

Este artigo apresentou os conceitos fundamentais do sistema estrutural R2U | Modular Systems, com destaque para o desenvolvimento de duas soluções de ligações intermodulares totalmente desmontáveis e reutilizáveis: Long Bolt e Spider, já objeto de patente [20,21]. Estas soluções foram concebidas para ultrapassar limitações comuns da construção modular, como a gestão de tolerâncias, a transmissão eficiente de esforços e a rapidez de montagem, tendo sido validadas por ensaios experimentais e análises numéricas.

Os resultados demonstram que asseguram continuidade estrutural e funcionalidade, respondendo às principais barreiras técnicas que têm limitado a adoção da construção modular em aço.

O trabalho desenvolvido no âmbito do WP2 do projeto R2U tem sido apoiado por diversas dissertações de mestrado e doutoramento, contribuindo para a validação e aperfeiçoamento das soluções.

Como perspetivas futuras, prevê-se a realização de ensaios em módulos à escala real, incluindo o estudo de desempenho em incêndio e sob ações sísmicas. Estas investigações irão consolidar as bases técnicas necessárias para apoiar a normalização e a difusão de sistemas modulares em aço.

Em síntese, as soluções propostas representam um passo concreto para a adoção prática da construção modular em Portugal e na Europa, promovendo sustentabilidade, adaptabilidade e reutilização no setor da construção.

## **Agradecimentos**

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PID-DAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia (ISISE), com a referência UID/04029/Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia (ISISE), e no âmbito do Laboratório Associado Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE com a referência LA/P/0112/2020.

Este artigo foi desenvolvido no âmbito do Pacto de Inovação “R2UTechnologies | 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] M. Lawson, R. Ogden, and C. I. Goodier, Design in modular construction, 1 ed. CRC Press Boca Raton, FL, p. 280, 2014
- [2] H.-T. Thai, T. Ngo, and B. Uy, "A review on modular construction for high-rise buildings," Structures, vol. 28, pp. 1265-1290, 2020.
- [3] P. Gatheeshgar, K. Poologanathan, S. Gunalan, K. D. Tsavdaridis, B. Nagaratnam, and E. Iacovidou, "Optimised cold-formed steel beams in modular building applications," Journal of Building Engineering, vol. 32, p. 101607, 2020.
- [4] F. E. Boafó, J.-H. Kim, and J.-T. Kim, "Performance of modular prefabricated architecture: case study-based review and future pathways," Sustainability, vol. 8, no. 6, p. 558, 2016

- [5] I. J. Ramaji and A. M. Memari, "Identification of structural issues in design and construction of multi-story modular buildings," in Proceedings of the 1st residential building design and construction conference, pp. 294-303, 2013
- [6] S. Srisangeerthan, M. J. Hashemi, P. Rajeev, E. Gad, and S. Fernando, "Review of performance requirements for inter-module connections in multi-story modular buildings," *Journal of Building Engineering*, vol. 28, p. 101087, 2020.
- [7] D.-A. Corfar and K. D. Tsavdaridis, "A comprehensive review and classification of inter-module connections
- [8] Europe Modular Construction Market, By Country, Competition, Forecast and Opportunities, 2020-2030F Available online: <https://www.researchandmarkets.com/report/europe-modular-building-market?srsltid=AfmBOoq60xVKm4HY-GaRv0AnAJk2mdrr0mgcyfayELPRL2peZ3bXozCJO> (accessed on 11 August 2025).
- [9] Energia, E. Construção Modular Vai Crescer 221% Em Portugal Available online: <https://jornaleconomico.sapo.pt/noticias/construcao-modular-vai-aumentar-221-em-portugal-este-ano/>
- [10] R2U – Modular Systems. (2023). <https://r2utechnologies.pt/>
- [11] X. Liu, C. Hou, J. Peng, Y. Wang, and K. J. R. Rasmussen, "Recent advancements of inter-module connections for modular buildings: An overview and multi-dimensional assessment," *Engineering Structures*, vol. 335, p. 120378, 2025.
- [12] H. Rajanayagam, P. Keerthan, P. Gatheeshgar, G. Varelis, P. Sherlock, B. Nagarathnam, and P. Hackney, "A state-of-the-art review on modular building connections," *Structures*, vol. 34, pp. 4379–4396, 2021.
- [13] K. W. Lee, K. J. R. Rasmussen, and B.-H. Cho, "Bolt-free preloaded (AJ) inter-module connection: Experimental and numerical investigations," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 213, p. 107788, 2024.
- [14] Ricardo Aguayo, Ana Francisca Santos, Jorge Conde, David Andrade, Luís Alberto Proença Simões da Silva, Deliverable D2 – R2U, Structural Design of Single Module, 2024
- [15] Pedram Ayyobi, David Andrade, Luis Godinho, Luis Simões da Silva, Deliverable – 2D PANELS Functional Performance
- [16] Godakandage, Rajeendra & Nguyen, K. & Weerasinghe, Pasindu & Gamage, Kumari. (2024). Hidden Dangers of Fire Safety in Modular Constructions. 10.1007/978-981-97-3737-6\_38.
- [17] Heshachanaa Rajanayagam, Tharaka Gunawardena, Priyan Mendis, Keerthan Poologanathan, Perampalam Gatheeshgar, Madhushan Dissanayake, Marco Corradi, Evaluation of inter-modular connection behaviour under lateral loads: An experimental and numerical study, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 194, 2022,107335,
- [18] Dan-Adrian Corfar, Konstantinos Daniel Tsavdaridis, A hybrid inter-module connection for steel modular building systems with SMA and high-damping rubber components, *Engineering Structures*, Volume 289, 2023.
- [19] Zhihua Chen, Jian Wang, Jiadi Liu, Kashan Khan, Seismic behavior and moment transfer capacity of an innovative self-locking inter-module connection for modular steel building, *Engineering Structures*, Volume 245, 112978, 2021
- [20] Luís Simões da Silva, David Andrade, Sree Sabari, Jorge Conde Conde, Filip Ljubinković, Ana Francisca Parente dos Santos, 2023, Connection system for modular construction of multi-storey buildings, World Intellectual Property Organization, WO2024224161A1
- [21] Luís Simões da Silva, David Andrade, Sree Sabari, Jorge Conde Conde, Filip Ljubinković, Ana Francisca Parente dos Santos, 2023, 3d connector for modular construction of multi-story buildings, World Intellectual Property Organization, WO2024224160A1

- [22] Maria Clara Tomicioli, Structural behaviour of Demountable connections for 3d modular construction, Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, 2025