

PAREDES COMPÓSITAS PREFABRICADAS EM UHDC-LCLWAC COM LIGAÇÕES SECAS

Ricardo Martins¹
Ricardo do Carmo^{1,2}
Hugo Costa^{1,2}
Eduardo Júlio¹
André Furtado¹
Romain Sousa^{1,3}

¹ CERIS & Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa, Portugal

² CERIS & ISEC-Instituto Politécnico de Coimbra, Portugal

³ CERIS & Vigobloco Pré-fabricados S.A, Ourém, Portugal

Autor correspondente: ricardo.neves,martins@tecnico.ulisboa.pt

Palavras-chave

Paredes prefabricadas de betão; ligações secas; durabilidade; sustentabilidade; comportamento estrutural.

Resumo

A construção de edifícios recorrendo à prefabricação em betão está a registar um interesse renovado e crescente, nomeadamente soluções modulares e sistemas de paredes estruturais. Considerando as vantagens deste sistema, desenvolveu-se uma parede estrutural compósita, constituída por uma camada exterior, com 50 mm de espessura, de um betão de ultra-elevada durabilidade (UHDC) e por uma camada interior, com 150 mm de espessura, de um betão leve com baixa dosagem de cimento (LCLWAC). Com esta solução consegue-se: (i) reduzir o peso próprio; (ii) aumentar a durabilidade; e (iii) reduzir a dosagem de cimento e, consequentemente, a pegada carbónica do produto.

O sucesso deste sistema está maioritariamente relacionado com o processo de montagem das paredes prefabricadas. As ligações secas apresentam algumas vantagens em relação às ligações húmidas, que implicam a colocação de armaduras e betão no local da obra. As ligações secas ajudam a promover a sustentabilidade do setor, ao viabilizar uma construção mais rápida e oferecendo benefícios no fim de vida da construção, possibilitando a reutilização da estrutura ou facilitando o processo de reciclagem. Neste estudo, foram desenvolvidas três novas ligações aparafusadas para este sistema de parede estrutural. O principal objetivo foi compatibilizar a rigidez e a resistência necessárias ao desempenho estrutural com as tolerâncias exigidas na montagem.

Nesta comunicação é apresentado: (a) o desenvolvimento da parede compósita e dos betões utilizados, incluindo a sua caracterização mecânica e durabilidade; (b) o estudo do comportamento da interface UHDC-LCLWAC; e (c) o desenvolvimento das ligações e estudo experimental, sujeitas a diferentes ações de corte (para fora-do-plano e no plano da parede) e de tração (com cargas monotónicas e cíclicas). As conclusões principais serão apresentadas, assim como recomendações práticas de projeto.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o setor do betão tem enfrentado o desafio de responder simultaneamente a exigências de maior competitividade económica, durabilidade e sustentabilidade. A construção tradicional em obra apresenta limitações significativas, nomeadamente prazos de execução mais longos, menor eficiência global e elevada geração de resíduos [1]. Adicionalmente, fenómenos extremos, como pandemias ou conflitos armados, aliados ao aumento contínuo da procura habitacional, têm reforçado a urgência de desenvolver soluções construtivas que garantam maior rapidez de execução e controlo de custos. Neste contexto, a pré-fabricação, assente na produção de elementos fora do local de implantação, surge como alternativa eficaz à construção convencional, permitindo reduzir de forma significativa os tempos de obra e o consumo

energético total, assegurando simultaneamente maior rigor e fiabilidade nos processos, bem como uma qualidade superior e maior durabilidade dos elementos produzidos [2].

Entre as diversas soluções técnicas disponíveis para construções pré-fabricadas em betão, destaca-se o sistema de parede estrutural pré-fabricada. Esta solução apresenta-se como competitiva, uma vez que possibilita a execução simultânea de elementos estruturais e de compartimentação, eliminando a necessidade de recorrer a componentes adicionais, como pilares, vigas ou paredes não estruturais [3]. Estas paredes distinguem-se pela sua capacidade de resistir a cargas verticais e horizontais, incluindo ações sísmicas e vento, beneficiando da sua elevada rigidez e resistência no plano.

Em resposta a estes desafios, o presente trabalho propõe um sistema inovador de paredes pré-fabricadas compostas, constituído por duas camadas de betão com diferentes características. O principal objetivo consiste em conceber uma solução estrutural eco-eficiente, simultaneamente mais leve e mais durável.

As paredes estruturais pré-fabricadas são ligadas entre si e a outros elementos estruturais através de ligações verticais e horizontais. Essas ligações podem ser: (i) húmidas, com betonagens no local; ou (ii) secas, usando parafusos ou soldaduras. O objetivo das ligações é transferir as cargas entre os elementos e restringir movimentos de modo a proporcionar a estabilidade necessária a toda a estrutura [4]. Esta solução proposta é montada através de novas ligações desmontáveis, desenvolvidas especificamente para esta solução.

A desenvolvimento da solução construtiva foi dividido em quatro fases principais: i) a definição conceptual da solução de parede compósita e a caracterização mecânica e de durabilidade dos betões; ii) o estudo do comportamento da interface entre as duas camadas de betão diferentes; iii) o desenvolvimento e a avaliação experimental de novas ligações secas para a montagem vertical parede-parede; e iv) a otimização da solução final, com foco na melhoria do desempenho das ligações.

2. DEFINIÇÃO DA SOLUÇÃO DE PAREDE COMPÓSITA COM LIGAÇÕES APARAFUSADAS

A Figura 1 mostra a configuração da parede pré-fabricada compósita com as três ligações aparafusadas propostas.

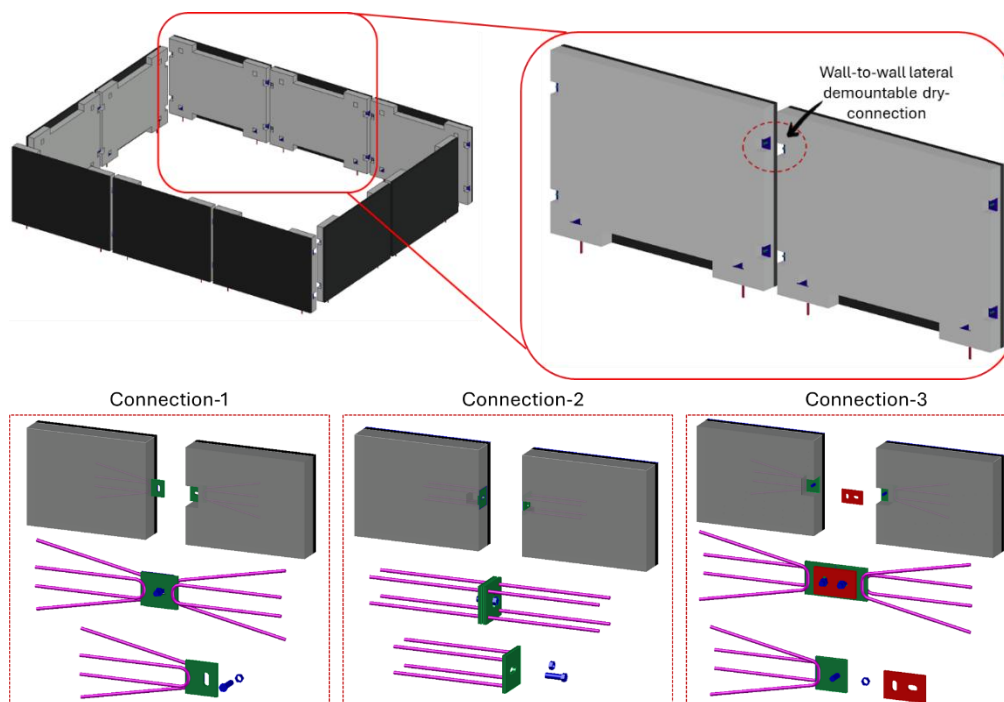


Figura 1. Parede pré-fabricada UHDC-LCLWAC com ligações aparafusadas.

A solução é composta por duas camadas de betão ligadas entre si: (a) uma camada exterior com espessura reduzida, 5cm, com um betão de ultra-elevada durabilidade (UHDC); e (b) uma camada interior constituída por um betão de agregados leves, com baixa dosagem de cimento, com espessura de 15 cm. As duas camadas são reforçadas com uma armadura A500 ER Ø6//0.10 m e ligadas entre si com treliças metálicas. Esta solução, baseada no conceito de “Super-skin”, consiste em utilizar um betão de elevada durabilidade apenas na camada de recobrimento, para proteger a armadura, sendo o núcleo constituído por um betão

com baixa dosagem de cimento [5–7]. Por outro lado, os agregados leves melhoram o comportamento térmico e reduz o peso das paredes, vantajoso para o transporte e manuseamento.

As ligações aparafusadas concebidas para ligar as paredes lateralmente, são compostas por chapas de aço S275, com dimensões 130x130x12 mm², ancoradas ao betão com quatro varões S500 Ø12, com comprimento de 400 mm, de modo a transferir as tensões entre a ligação e o betão. Essas chapas foram dimensionadas com furos ovalizados em diferentes direções para facilitar a montagem. Para o estudo experimental, as chapas foram testadas com diferentes rugosidades, para avaliar o efeito do atrito: (i) superfície lisa, sem tratamento, e (ii) superfície indentada, com ranhuras. As ligações são depois executadas com parafusos de elevada resistência M20, classe 8.8.

A Connection-1, não-simétrica, tem dois lados diferentes: a Connection-1.1, com a chapa dentro da parede, com uma abertura para o aperto do parafuso; e a Connection-1.2, com a chapa fora da parede. A Connection-2, simétrica, com as chapas no plano da seção transversal da parede. E a Connection-3, simétrica, com o parafuso soldado à chapa e a ligação é feita com uma chapa extra com os furos ovalizados. Os varões de ancoragem têm configurações diferentes na Connection-1 e Connection-3, comparando com a Connection-2.

3. DESENVOLVIMENTO E CARATERIZAÇÃO DOS BETÕES UHDC E LCLWAC

Para atingir o desempenho requerido para a solução de parede pré-fabricada, alguns requisitos das características dos betões foram inicialmente definidos. Para a camada exterior, as principais características para além da durabilidade eram: necessidade de fluidez, com uma classe de consistência pelo menos F6, de modo a evitar a vibração durante a produção; e com uma resistência à compressão pelo menos de 75 MPa. Para a camada interna, pretendia-se um betão com agregados leves, e com baixa dosagem de cimento, com substituição por sílica de fumo, de modo a reduzir o impacto negativo do cimento Portland. Este betão também tinha como requisito a boa trabalhabilidade e uma resistência à compressão superior a 40 MPa. Deste modo, os dois betões, UHDC e LCLWAC, foram formulados e caracterizados do ponto de vista mecânico e durabilidade [8].

As principais propriedades mecânicas dos betões foram avaliadas, de acordo com as normas em vigor: resistência média à compressão, $f_{cm,cube}$, resistência média à tração por flexão e por compressão diametral, f_{ctm} , e o módulo de elasticidade, E_{cm} . A Tabela 1 mostra os resultados para os 28 dias.

Tabela 2 – Principais propriedades mecânicas dos betões aos 28 dias

Propriedades	UHDC	LCLWAC
Resistência à compressão, $f_{cm,cube}$ [MPa]	85.7	46.6
Resistência à tração (compressão diametral), f_{ctm} [MPa]	4.2	2.3
Resistência à tração (flexão), f_{ctm} [MPa]	6.3	4.3
Módulo de elasticidade, E_{cm} [GPa]	49.7	21.6

Em termos de desempenho de durabilidade, diferentes ensaios foram realizados, de acordo com as normas: resistência à carbonatação acelerada; migração de cloretos; resistividade; e absorção de água por capilaridade. Os resultados dos testes de resistência à carbonatação são mostrados na Figura 2. A profundidade de carbonatação aumenta com o tempo de exposição nos dois betões, como esperado, e os resultados mostram a elevada resistência dos betões à carbonatação, nomeadamente o UHDC, com penetração quase nula. Os resultados da difusão de cloretos são apresentados na Figura 3, onde se verifica a boa resistência dos betões, mais uma vez realçando o UHDC, podendo ser classificado como “muito boa resistência” aos cloretos. Relativamente à medição elétrica da resistividade aos cloretos (Figura 4), os resultados mostram a elevada resistência, e consequentemente, elevada durabilidade. Finalmente, a absorção de água por capilaridade, permite corroborar os resultados já apresentados para os betões, demonstrando a elevada durabilidade, cumprindo os requisitos impostos para as paredes (Figura 5).

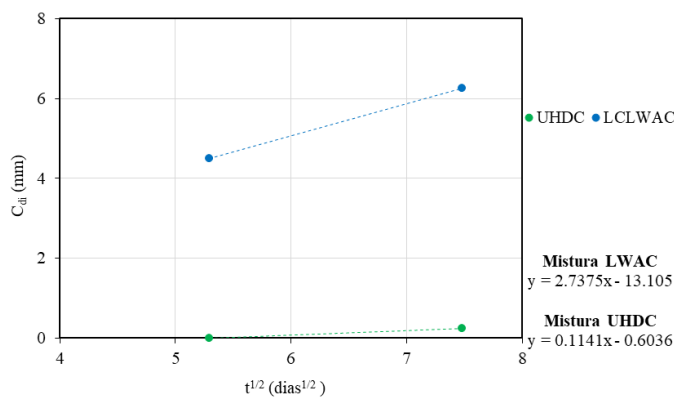


Figura 2. Profundidade de carbonatação

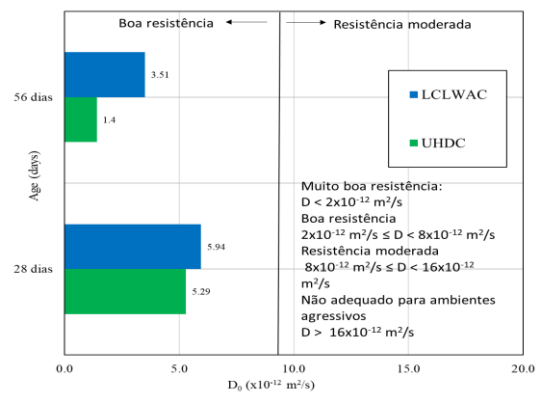


Figura 3. Coeficiente de migração de cloretos

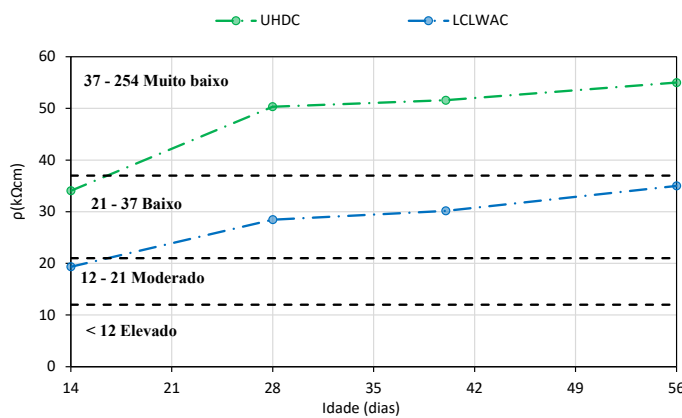


Figura 4. Resistividade elétrica

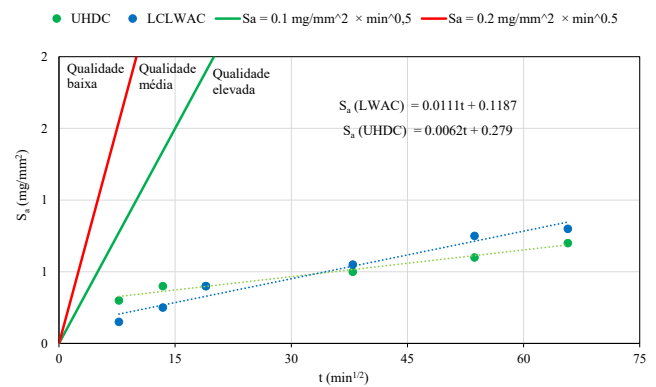


Figura 5. Absorção de água por capilaridade

4. ESTUDO DA RESISTÊNCIA DA INTERFACE UHDC-LCLWAC

Tratando-se de uma solução compósita com diferentes betões, betonados em diferentes idades, considerou-se importante o estudo do comportamento da interface entre os dois betões. O estudo pretendia avaliar a resistência ao corte da ligação UHDC-LCLWAC com diferentes rugosidades e com ou sem armadura de ligação [9]. Os resultados experimentais foram depois comparados com as previsões da resistência ao corte dos principais regulamentos de estruturas de betão, assim como as novas versões do Eurocódigo 2 e do Model Code [10–13]. Foram realizados ensaios de push-off e ensaios de paredes à flexão, de modo a simular o efeito das ações perpendiculares nas paredes, como o vento ou o manuseamento.

Os resultados são apresentados na Figura 6a. Verificou-se um aumento de cerca de 25% quando se utiliza uma rugosidade indentada, comparando com uma interface lisa (sem tratamento). Os ensaios com conectores metálicos (treliças) apresentaram um comportamento mais dúctil, confirmando a importância da armadura de ligação para manter a integridade da parede para cargas excessivas.

A Figura 6b apresenta a comparação da resistência média ao corte na interface obtida nos ensaios experimentais, τ_{\max} , e os valores teóricos correspondentes, τ_{rd} , previstos nos regulamentos. Para os valores teóricos foram considerados os coeficientes de coesão e atrito dos regulamentares e a resistência média do LCLWAC e do aço. O rácio τ_{\max}/τ_{rd} é cerca de 4.0 para a interface lisa, mostrando que a previsão para o coeficiente de coesão está subestimando para a combinação UHDC-LCLWAC. A razão diminui com a interface rugosa e com os conectores metálicos, mas ainda assim com valores de rácio elevados.

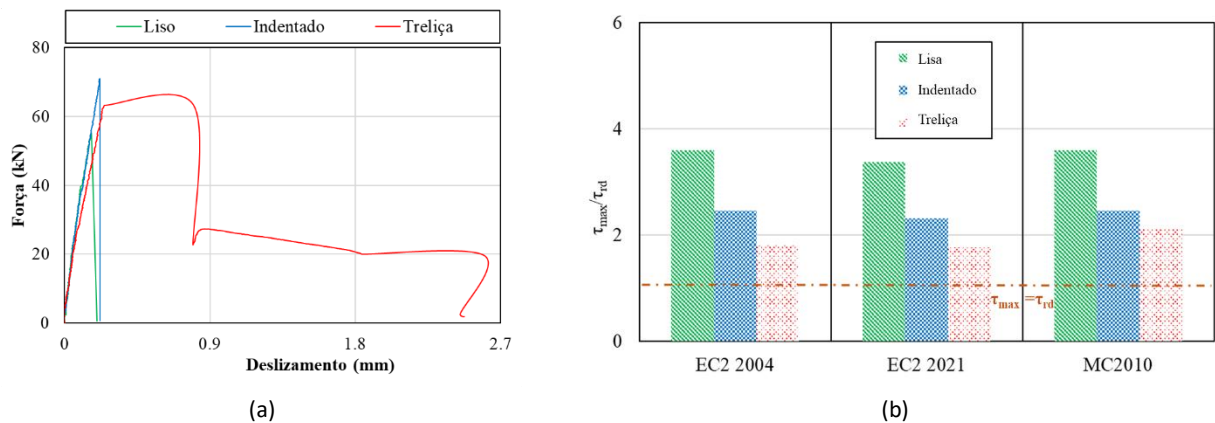


Figura 6. Resultados dos push-off: (a) Força-deslizamento da interface; (b) comparação entre as tensões de corte experimentais e as previsões dos códigos.

Para validar os resultados dos ensaios anteriores e a solução compósita de parede, foram ainda ensaiadas paredes UHDC-LCLWAC à flexão, com dimensões: 1500 mm de altura e 500 mm de largura, ensaiadas com uma força aplicada perpendicularmente ao plano da parede. As paredes foram ensaiadas com as mesmas interfaces descritas anteriormente. Os resultados demonstraram a rotura dúctil por flexão das paredes, sem deslizamento na interface betão-betão. A parede com conectores metálicos apresentou maior capacidade de carga, 50% superior (Figura 7).

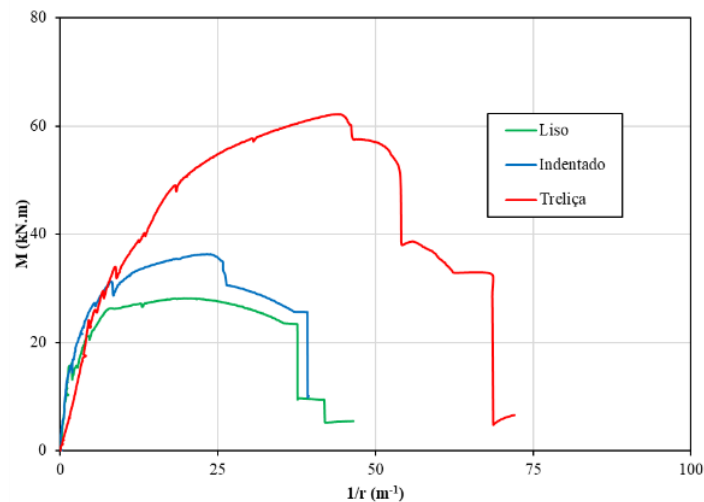


Figura 7. Relação momento-curvatura

5. DESENVOLVIMENTO DE LIGAÇÕES SECAS APARAFUSADAS

A principal etapa deste estudo centrou-se no desenvolvimento de novas ligações aparafusadas, apresentadas anteriormente, concebidas para permitir a rapidez e facilidade de montagem e possibilitar a desmontagem no final do ciclo de vida. As três ligações propostas foram posteriormente sujeitas a uma campanha experimental com diferentes ensaios, sob carregamentos monotónicos e cíclicos, com ensaios de corte (no plano e para fora-do-plano) e de tração. O principal objetivo é assegurar a transferência adequada de esforços entre a ligação e o betão, assim como prevenir a abertura excessiva de fendas, nomeadamente em condições de serviço. Para os ensaios de tração (monotónicos e cíclicos), foram utilizados provetes com as seguintes dimensões: 900 mm de comprimento, 500 mm de largura e 200 mm de espessura. Para os ensaios de corte, duas paredes foram ligadas com as três ligações propostas. As dimensões totais de cada provete de ensaio foram: 1400 mm de comprimento, 500 mm de largura e 200 mm de espessura. A designação dos provetes foi definida seguindo os critérios: tipo de

carregamento (tração Monotónico, TM, tração cíclico, TC ou corte, S); o tipo de ligação (1.1, 1.2, 2 ou 3); a rugosidade das chapas (lisa, S, ou indentada, I) e a aplicação da carga de corte (no plano, Plane, ou para fora-do-plano, OPlane). A Figura 8 apresenta os ensaios de corte e a Figura 9 apresenta o ensaio de tração e o protocolo de carregamento cíclico.

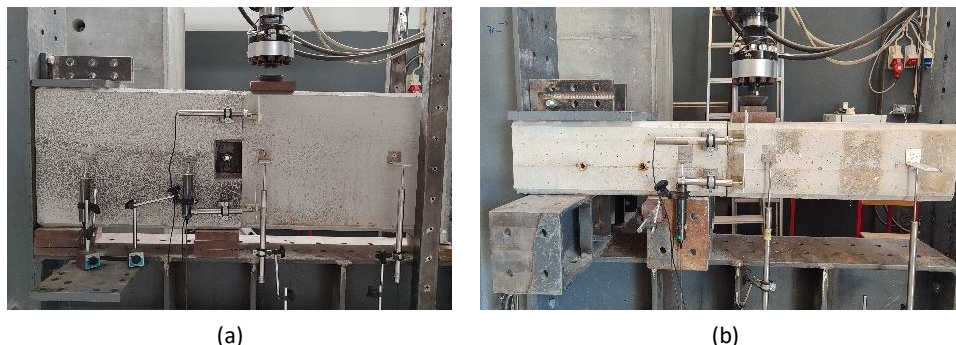


Figura 8. Ensaio de corte (a) no plano; (b) para fora-do-plano.

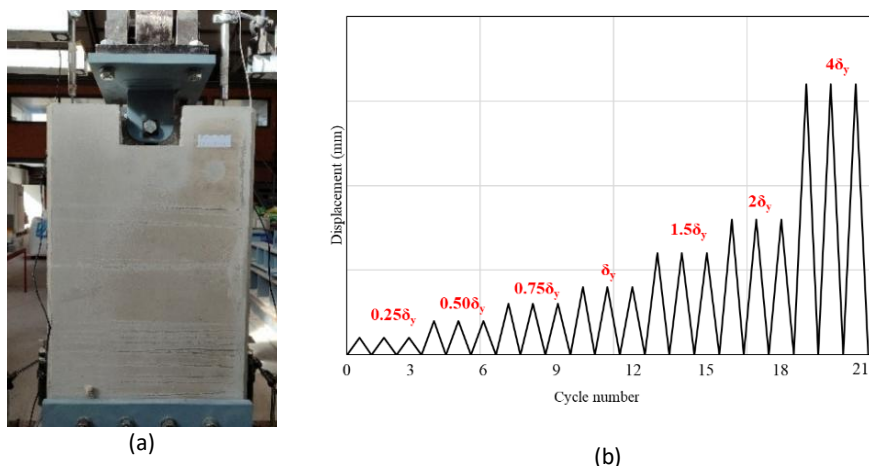


Figura 9. Ensaio de tração: (a) set-up; (b) carregamento cíclico.

O carregamento foi aplicado na vertical através de um atuador hidráulico, até à rotura do elemento, com controlo por deslocamentos. Foram utilizados LVDTs para a medição dos deslocamentos em diferentes zonas. Os provetes foram colocados no pórtico de reação e, no caso dos ensaios de tração, foram fixados à estrutura com quatro varões. Os ensaios cíclicos foram definidos com base nos resultados monotónicos. Foram aplicados três ciclos para cada força axial: $0.25\delta_y$; $0.50\delta_y$; $0.75\delta_y$; δ_y ; $1.5\delta_y$; $2\delta_y$ and $4\delta_y$. Os resultados dos ensaios são descritos de seguida.

5.1. ENSAIOS MONOTÓNICOS AO CORTE

A Figura 10 mostra as curvas força-deslocamento e o modo de rotura dos ensaios de corte no plano. A Connection-1.1 com as chapas indentadas apresentou uma rigidez inicial superior comparativamente com as chapas lisas, provando a vantagem do atrito entre as chapas. No entanto o mesmo não se verificou para a Connection-2, mostrando cerca de 40% mais deformação na ligação com chapas indentadas. A Connection-3 mostrou maior deformação que as restantes, cerca de 2.3 vezes superior e também menor rigidez. este facto deve-se à rotação da chapa livre que liga os dois lados da ligação.

Na Connection-1 e Connection-3, a largura das fendas é inferior a 0.4 mm, para valores de carga de cerca de 60% da força máxima. No caso da Connection-2, devido à sua configuração, não foram observadas fendas para estes níveis de carga. A rotura da Connection-1 ocorreu por deslizamento dos varões de ancoragem e destacamento do betão LCLWAC. Na Connection-2 ocorreu por corte do parafuso, sem fendas significantes. No caso da Connection-3, apresentou o maior dano das três, com evidente destacamento do betão. No entanto, a rotura ocorreu por corte dos parafusos.

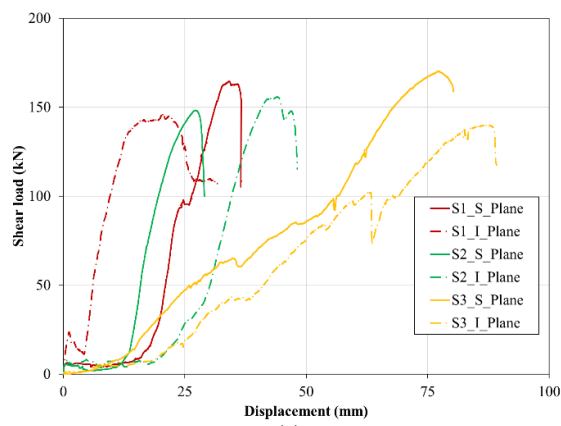


Figura 10. Resultados ao corte no plano; (a) Força-deslocamento; and e modo de rotura: (b) Connection-1; (c) Connection-2; (d) Connection-3

O comportamento estrutura sob carregamento de corte para fora-do-plano da parede é apresentando na Figura 11.

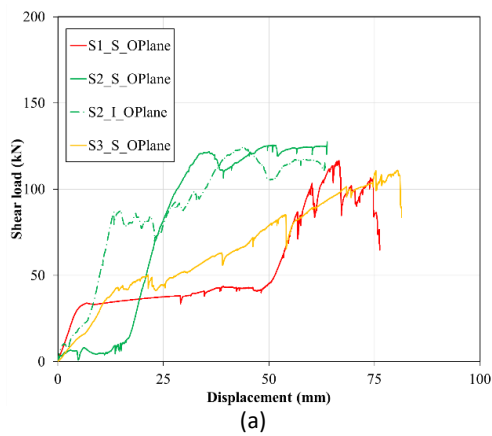


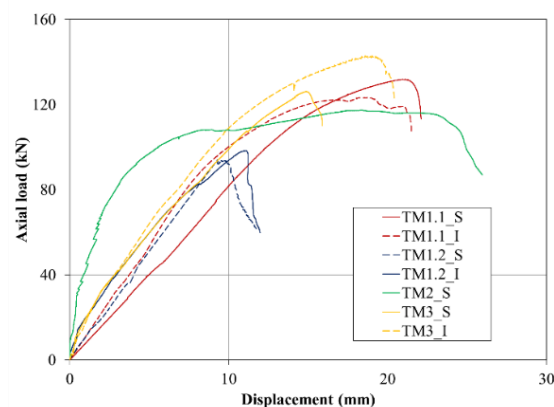
Figura 11 Resultados ao corte para fora-do-plano: (a)força-deslocamento; e modo de rotura: (b) Connection-1; (c) Connection-2; (d) Connection-3

Como esperado, a capacidade de carga é inferior, comparando com os resultados no plano, cerca de 25%. A Connection-1 apresentou um significativo deslocamento, devido à excessiva flexão das chapas, o que causou esmagamento do betão. Na Connection-2, apesar da força aplicada ser suportada pelo parafuso ao corte, essa força é parcialmente transferida para as chapas e para os varões, o que causa elevada tensão na ligação e consequentemente no betão. Na Connection-3, o comportamento é semelhante aos ensaios no plano. Esta ligação apresentou a menor capacidade resistente comparando com as outras duas. O modo de rotura ocorreu por flexão das chapas, e posterior esmagamento do betão.

5.2. ENSAIOS MONOTÓNICOS À TRAÇÃO

Na Figura 12 é apresentado a relação força axial-deslocamento e os modos de rotura dos ensaios de tração monotónicos. Devido à configuração da Connection-1 e Connection-3, os parafusos estão sujeitos ao corte, enquanto na Connection-2, o parafuso está sujeito à tração. Devido à configuração não simétrica da Connection-1, a Connection-1.1 apresentou maior capacidade resistente comparada com a Connection-1.2, cerca de 33%, mas com rigidez similar. A Connection-2, apresentou um comportamento mais dúctil, com um coeficiente de ductilidade cerca de 2.5 vezes superior. Em resumo, a Connection-2 e Connection-3, apresentaram maior capacidade de tração que a Connection-1, que é condicionada pelo seu lado mais fraco, a Connection-1.2.

Analisando o dano, a rotura da Connection-1.1 ocorreu por corte do parafuso, sem evidencia de dano/fendilhação no betão, enquanto a Connection-1.2 apresentou uma rotura por separação dos betões UHDC-LCLWAC e deslizamento dos varões de ancoragem. Na Connection-2, as fendas apareceram junto à abertura, com destacamento do betão. Finalmente, a rotura da Connection-3 ocorreu por corte do parafuso, com propagação das fendas das chapas para a interface betão-betão. No entanto, sob condições de serviço (considerando as forças entre 50% e 75% da força máxima aplicada) não se observou fendas significativas.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 12 Resultados à tração monotónicos: (a) força-deslocamento; e modo de rotura: (b) Connection-1.1; (c) Connection-1.2; (d) Connection-2 e (e) Connection-3

5.3. ENSAIOS CICLICOS À TRAÇÃO

A Figura 13a mostra a relação força axial-deslocamento dos ciclos carga-descarga de um dos provetes ensaiados, como exemplo e a Figura 13b mostra as curvas da envolvente, que corresponde aos pontos de pico do primeiro ciclo de cada amplitude de deslocamento.

Assim como os ensaios monotônicos, a Connection-1.1 alcançou um valor de pico superior à Connection-1.2. As três ligações mostraram um valor máximo semelhante, cerca de 135 kN. A Connection-2 apresentou um deslocamento residual inferior (correspondente ao deslocamento relativo após a descarga), cerca de 2 vezes menor. A energia de dissipação aumentou com o aumento dos ciclos, o que era expectável. A Connection-1.1 apresentou um valor de dissipação de energia superior que a Connection-1.2. Em geral, as ligações mostraram uma capacidade de dissipação de energia estável. O modo de rotura das ligações foi semelhante ao obtido nos ensaios monotônicos.

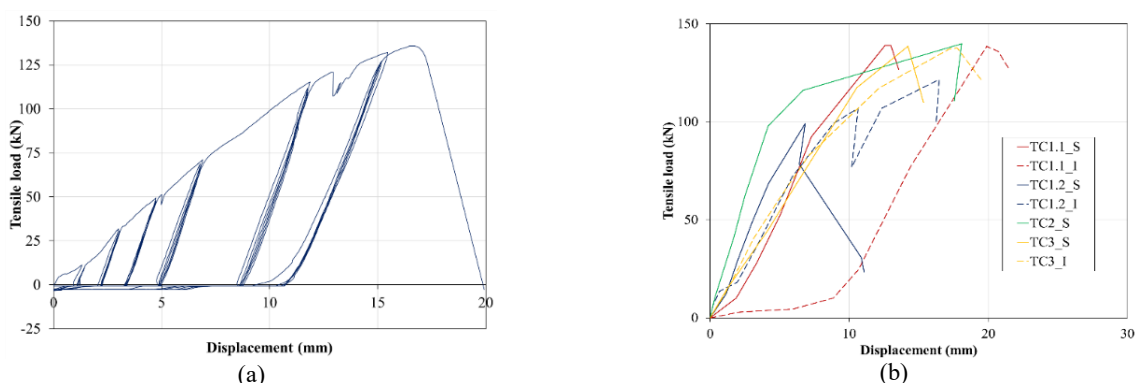


Figura 13 Resultados dos ensaios de tração cíclicos: (a) curva força-deslocamento (TC3_S); (b) curva envolvente

5.4. ESTUDO NÚMÉRICO DAS LIGAÇÕES

Para validar os resultados experimentais, compreender melhor a resposta estrutural das ligações e explorar possíveis melhorias, foram ainda desenvolvidos modelos numéricos, com base nos resultados experimentais à tração monotônicos. Foi usado o software IDEA StatiCa, para modelar as paredes pré-fabricadas e as três ligações. Devido a algumas limitações, foi considerado apenas o betão com menor resistência, LCLWAC (classe C40/50, resistência à tração 4.3 MPa e módulo de elasticidade 21600 MPa. Para o aço, considerou-se: A500 ER para as armaduras e treliças de ligação, e S275 para as ligações. Os modelos são mostrados na Figura 14.

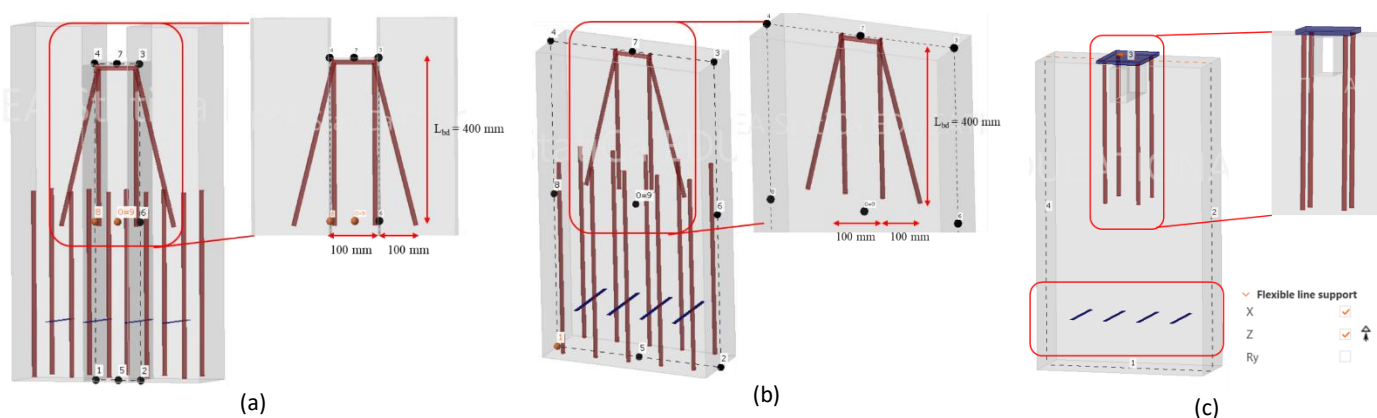


Figura 14 Modelos numéricos das ligações: (a) Connection-1.2 e Connection-3 (b) Connection-1.1 e (c) Connection-2

Os modelos foram calibrados com os resultados experimentais, verificando-se uma boa correlação. Deste modo, os modelos permitiram realizar um estudo paramétrico de modo a otimizar as ligações. No estudo foram consideradas as variáveis: (i) a distância entre os varões de ancoragem e a abertura do parafuso (Connection-2); e (ii) a inclinação dos varões (Connection-1 e Connection-3).

No caso da Connection-2, as proximidades dos varões à abertura causam significativo destacamento do betão nessa região. A Figura 15a mostra a abertura das fendas para três espaçamentos diferentes. O estudo permitiu concluir que aumentando o afastamento é possível reduzir as fendas, abaixo do limite imposto pelos regulamentos para condições de serviço.

Relativamente à inclinação dos varões nas Connection-1 e Connection-3, diferentes configurações foram consideradas. Apesar de pouco evidente, a largura de fendas diminui com o aumento do ângulo de inclinação (Figura 15b). Para o valor máximo de inclinação, a abertura de fendas diminuiu cerca de 45% comparando com o valor de referência (experimental).

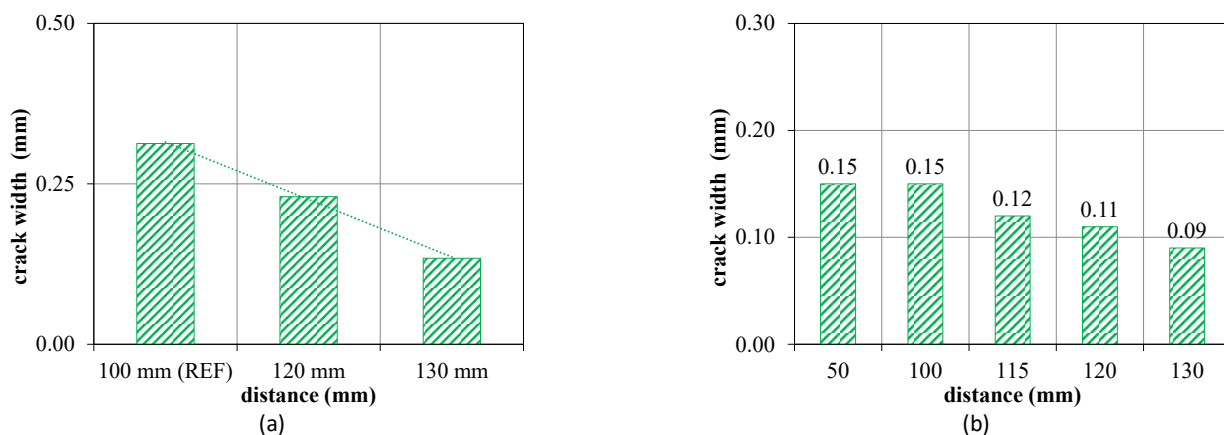


Figura 14 Largura de fendas: (a) em função da distância dos varões à abertura do parafuso (Connection-1) e (b) em função da inclinação dos varões (Connection-1 e Connection-2)

CONCLUSÕES E OTIMIZAÇÃO DA SOLUÇÃO

Este trabalho contribuiu para o desenvolvimento de uma solução pré-fabricada eco-eficiente, de elevada durabilidade e com peso reduzido, com foco na rapidez de montagem e possibilidade de desmontagem. Para a constituição das paredes compósitas foram desenvolvidos dois betões diferentes: um betão de ultra-elevada durabilidade e um betão com agregados leves e baixa dosagem de cimento. Baseado na caracterização dos betões, foi possível cumprir os requisitos definidos para a solução. O UHDC apresentou bastante fluidez para evitar vibração e com 86 MPa de resistência à compressão. Para o LCLWAC, foi possível reduzir o peso em cerca de 20% comparativamente a uma solução com agregados normais com as mesmas características mecânicas; e com baixa dosagem de cimento, permitindo reduzir cerca de 25% a quantidade de cimento. Em termos de durabilidade os dois betões apresentam excelente resistência à carbonatação e cloretos.

Relativamente ao estudo da interface UHDC-LCLWAC, é importante o uso das treliças para manter a integridade das paredes após a rotura. A combinação do betão permitiu concluir que as previsões dos regulamentos são conservadoras.

Para a ligação das paredes foram desenvolvidas três ligações secas aparafusadas diferentes. As ligações foram sujeitas a uma campanha experimental, com diferentes ensaios: (a) tração monotónico e cíclico; e (b) corte monotónico no plano e para fora-do-plano da parede. Os resultados permitiram concluir que as três ligações mostraram bom comportamento estrutural para as condições de serviço, sem fendas significativas. A resistência à tração da Connection-1 é condicionada pelo lado mais desfavorável (com a chapa fora da parede). A rugosidade entre as duas camadas de betão deve ser otimizada. A Connection-2 apresentou dano significativo à tração, devido à sua configuração. Sugere-se o aumento da espessura e das dimensões da chapa, assim como o afastamento dos varões à abertura de aperto do parafuso. Nos ensaios cíclicos à tração, as ligações mostraram baixa ductilidade, mas com uma capacidade de dissipação de energia estável. Os furos ovalizados, utilizados para facilitar a montagem e desmontagem reduzem a rigidez das ligações. Uma otimização passa pela selagem do furo após a montagem, de modo a reduzir a rigidez. Ao contrário dos ensaios de tração, a Connection-2 mostrou menor dano e capacidade resistente superior que as restantes ligações. Comparando com os resultados no plano, as ligações apresentaram capacidade resistente inferior para fora-do-plano, cerca de 25%.

Em suma, a solução constitui uma alternativa estrutural competitiva, combinando vantagens mecânicas e ambientais, relevando potencial para aplicação no setor da construção modular pré-fabricada.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FCT através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/05254/2020, concedida ao primeiro autor e do projeto UIB/6438/2025, que financia o centro de investigação dos autores, CERIS. Este artigo é resultado do Pacto de Inovação "R2UTechnologies| sistemas modulares" (C644876810-00000019) do Consórcio "R2UTechnologies", cofinanciado pelo NextGeneration EU, através do Sistema de Incentivos "Agendas para a Inovação Empresarial", no âmbito do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR). Os autores agradecem ainda à Vigobloco - Pré-fabricados, S.A., pelo apoio deste estudo de investigação, em conjunto com o CERIS.

Referências

- [1] Z. Li, G.Q. Shen, X. Xue, Critical review of the research on the management of prefabricated construction, *Habitat Int* 43 (2014) 240–249. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.04.001>.
- [2] P. Gallo, R. Romano, E. Belardi, Smart green prefabrication: Sustainability performances of industrialized building technologies, *Sustainability* 13 (2021). <https://doi.org/10.3390/su13094701>.
- [3] S. Chen, M. Poongodi, An exhaustive research and analysis on seismic performance of prefabricated concrete shear wall structure, *Journal of Vibroengineering* 22 (2020) 1871–1883. <https://doi.org/10.21595/jve.2020.21628>.
- [4] S. Singhal, A. Chourasia, S. Chellappa, J. Parashar, Precast reinforced concrete shear walls: State of the art review, *Structural Concrete* 20 (2019) 886–898. <https://doi.org/10.1002/suco.201800129>.
- [5] R. Martins, R.N.F. Carmo, H. Costa, E. Júlio, Flexural behavior of eco-efficient and ultra-high durability concrete beams, *Constr Build Mater* 236 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117546>.
- [6] R. Martins, R. Carmo, H. Costa, E. Júlio, Load bearing capacity of connections between innovative pre-walls designed to have high durability and eco-efficiency, *Journal of Building Engineering* 44 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103356>.
- [7] K. Robalo, R. do Carmo, H. Costa, E. Júlio, Experimental study on the interface between low cement recycled aggregates concrete and ultra-high durability concrete, *Constr Build Mater* 304 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124603>.
- [8] R. Martins, R. Carmo, H. Costa, E. Júlio, Low cement concretes with ultra-high durability for innovative composite lightweight precast walls, *Journal of Building Engineering* 86 (2024). <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108922>.
- [9] Martins R., Carmo R., Costa H., Júlio E., Shear study on the interface between ultra-high durability concrete and low-cement-lightweight concrete for precast composite walls, *Constr Build Mater* 438 (2024).
- [10] Eurocode 2 (2nd generation), EN 1992-1-1 (version 2021): Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures, Brussels, Belgium, 2021.
- [11] fib, Model Code for concrete structures 2010, Ernst & Sohn, Lausanne, Switzerland, 2010.
- [12] fib, Model Code for Concrete Structures 2020 (draft), Lausanne, Switzerland, 2024.
- [13] Eurocode 2, EN 1992-1-1: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels, Belgium, 2004.