

Caracterização experimental de ligações indentadas secas em cascas finas de dupla curvatura pré-fabricadas

Experimental characterization of indented dry connections for precast double-curved concrete shells

Douaa Elbashir
Marta Agante
Paulo Fernandes

Resumo

Este artigo apresenta a caracterização experimental ao corte de ligações secas indentadas entre elementos pré-fabricados de uma casca muito fina construídos em betão leve reforçado com microfibras, com vista à sua validação para a produção industrial de cascas ultrafinas pré-fabricadas em betão de ultraelevado desempenho reforçado com fibras metálicas (UHPFRC). A geometria, quantidade e tipo de ligações foram definidas para responder ao desafio de pré-fabricação (segmentação, transporte e montagem) de cascas ultrafinas de dupla curvatura de grande vão em UHPFRC. Foram realizados ensaios de duplo corte, no plano e para fora-do-plano, para diferentes níveis de pré-esforço da ligação. Apresentam-se e discutem-se os resultados e conclui-se que as ligações adotadas exibem uma resistência ao corte elevada compatível com os objetivos de utilização, e que a contribuição do pré-esforço teve um impacto significativo tanto na resistência como na ductilidade das ligações.

Abstract

This paper presents the experimental characterization in shear of indented dry connections within precast thin-shell structures made with light-weight ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC), aiming their validation for the industrial production of long-span prefabricated ultra-thin concrete shells. The geometry, quantity, and type of connections were defined to respond to the challenge of prefabrication (segmentation, transport, and assembly) of ultra-thin double curvature shells of large-span in UHPFRC. Double shear tests, in-plane and out-of-plane, were carried out for different levels of prestress of the connection. The results are presented and discussed. The connections adopted exhibit a performance compatible with the prefabrication needs. It was also observed that the prestress had a significant impact on both the strength and ductility of the connections.

Palavras-chave: Resistência ao corte / Ligações secas indentadas / Estruturas de casca fina de betão / Pré-fabricação / Estruturas modulares

Keywords: Shear strength / Indented dry connections / Thin concrete shells / Prefabrication / Modular structures

Douaa Elbashir

MSc/Bolseira de Investigação
Instituto Politécnico de Leiria
Leiria, Portugal
douaa.elbashir@ipleiria.pt

Marta Agante

PhD/Professora Adjunta
Instituto Politécnico de Leiria, CONSTRUCT
Leiria, Portugal
marta.agante@ipleiria.pt

Paulo Fernandes

PhD/Professor Coordenador
Instituto Politécnico de Leiria, CERIS
Leiria, Portugal
paulo.fernandes@ipleiria.pt

Aviso legal

Os conteúdos incluídos na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The contents included in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

ELBASHIR, D. [et al.] – Caracterização experimental de ligações indentadas secas em cascas finas de dupla curvatura pré-fabricadas. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 23. ISSN 2183-8488. (novembro 2023) 53-62. <https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n23-005>

1 Introdução

A utilização de cascas finas de betão armado como soluções estruturais para cobrir grandes vãos, dada a natureza orgânica das suas formas, encontra-se associada a obras emblemáticas e surpreendentes de engenharia e arquitetura. Apesar disso, a sua utilização foi-se reduzindo significativamente à medida que o peso dos custos de mão-de-obra e a sua morosidade de execução se tornaram desvantagens condicionantes à sua utilização [1].

Como estratégia de recuperar a sua utilização desenvolveu-se um projeto de I&D que, partindo das vantagens da pré-fabricação e do avanço do betão, propõe uma solução que permita voltar a utilizar cascas finas de betão como soluções estruturais para construções emblemáticas sem os inconvenientes acima referidos.

Ora pré-fabricar estas estruturas em ambiente industrial pressupõe a capacidade de as transportar do local de fabrico para os locais de utilização e, dada a dimensão que geralmente apresentam, pressupõe a necessidade de as dividir em elementos de menor dimensão e conseqüentemente de os ligar entre si depois, para que se comportem como a estrutura monolítica que materializam.

Neste contexto, o projeto *Pre-Shell* desenvolveu um conjunto de soluções adequadas à pré-fabricação de uma casca fina em betão com três apoios e a forma de uma superfície com a projeção de um triângulo isósceles no plano horizontal e a forma de um anti-funicular para cargas verticais. Dada a esbelteza e as necessidades de pré-fabricação a escolha do material recaiu sobre um betão de ultraelevado desempenho reforçado com fibras metálicas (UHPFRC), de modo a ser possível dispensar o uso de armaduras ordinárias e a obter peças com o acabamento e durabilidade desejados.

Neste trabalho apresenta-se uma solução de segmentação de uma casca fina em betão de ultraelevado desempenho reforçado com fibras metálicas com três apoios, adequada às necessidades de pré-fabricação, e uma solução de ligações desenvolvida para garantir a integridade da estrutura final após a sua montagem.

A otimização da forma da casca [2], [3], [4] promove os esforços de membrana ao invés dos esforços de flexão pelo que as soluções a adotar, tanto para a segmentação da casca, como para as ligações entre as peças pré-fabricadas devem respeitar essas condicionantes e ao mesmo tempo assegurar-las na peça final.

2 Segmentação da casca

A segmentação da casca foi condicionada pelas necessidades de pré-fabricação [5], [6], incluindo a dimensão máxima dos elementos a fabricar e a transportar, o número de moldes diferentes necessário, e pela distribuição de tensões na casca ao longo das secções de ligação entre peças [7].

Para além destas condicionantes a segmentação da casca não pode colocar em causa a robustez e resiliência exigidas às estruturas [8], aspeto esse que tem condicionado a utilização de estruturas pré-fabricadas em regiões sísmicas.

Esta tarefa do projeto foi objeto de programa específico que se apresenta noutro trabalho nesta publicação pelo que aqui apenas se apresentará o seu resultado final.

A segmentação proposta dividiu a casca em três partes, tipo “asa delta”, como se ilustra na Figura 1. Como as dimensões da peça resultante continuavam a não ser compatíveis com as necessidades de pré-fabricação e transporte subdividiu-se cada um desses elementos em 4 partes, assegurando que as secções de corte eram obtidas pela interceção de planos perpendiculares à superfície média da casca. Esta segmentação coincide com a que resulta da interceção de três planos verticais com a casca na bissetriz de cada ângulo interno da sua projeção horizontal, correspondendo a planos de simetria da casca. Como consequência desta divisão foi possível assegurar a fabricação industrial de todas as peças da casca (Figura 1b) apenas a partir de 4 moldes distintos, isto para cascas até cerca de 25 metros entre apoios.

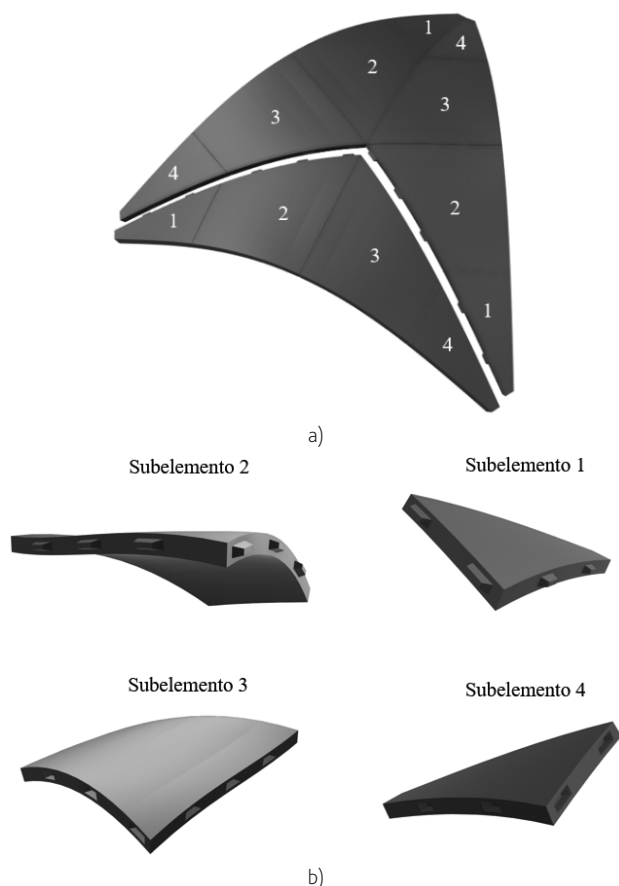


Figura 1 Divisão da estrutura da casca de dupla-curvatura: a) em 3 partes tipo “asa delta”; b) em 4 subelementos que compõem cada parte principal

3 Ligações entre peças pré-fabricadas

3.1 Enquadramento do problema

As ligações têm um papel determinante na integridade de uma estrutura composta por vários elementos estruturais. Este facto é ainda mais importante na construção pré-fabricada, atribuindo-se a ligações inadequadas as principais causas de danos generalizados

e falhas catastróficas deste tipo de construções. A utilização de construções pré-fabricadas em regiões de elevada vulnerabilidade sísmica acrescenta uma especificação adicional ao problema do desempenho das ligações como seja a sua ductilidade, assegurando que estas têm capacidade de acomodar as solicitações e deslocamentos a que estão expostas num evento sísmico. Este problema amplifica-se no caso de estruturas de casca fina, onde a preservação da forma está diretamente relacionada com a sua estabilidade quando sujeita a ações sísmicas e do vento [9],[10].

Na pré-fabricação em betão as ligações entre elementos estruturais são escolhidas com base num conjunto de princípios que têm em conta os esforços dominantes na região a ligar e a resposta que a ligação deve assegurar, sendo comuns os sistemas emulativos, os dissipativos e as ligações sobredimensionadas. Estes sistemas conduzem a soluções que vão desde ligações simples secas, a ligações mecânicas com estruturas auxiliares e a ligações húmidas com reconstrução estrutural betonada *in situ*. As ligações secas, amplamente utilizadas pela sua montagem rápida e fácil no local, são mais frequentemente utilizadas para transmitir forças de compressão e corte simples, seja através de apoios diretos (por compressão), seja com recurso a ferrolhos e/ou ligações indentadas (esforços de compressão e corte), são também as mais sensíveis à resposta da estrutura a ações horizontais [10], [11]. Por essa razão têm sido objeto de estudos destinados a avaliar diferentes ligações secas indentadas para construção modular, pontes e outras estruturas pré-fabricadas, com recurso a materiais avançados como UHPC ou UHPFRC [11],[12],[13],[14],[15]. De entre estes destaca-se um estudo que se debruçou sobre o papel das fibras na resposta de uma ligação seca indentada ao corte em elementos fabricados com UHPFRC [16].

Para além destes, há um conjunto alargado de estudos que caracteriza a influência de outros parâmetros na resistência ao corte de ligações betão-betão como seja o atrito, o número de indentações mobilizadas ou o estado de compressão perpendicular à ligação [14], [15], [17].

3.2 Solução proposta

Neste projeto a segmentação adotada para a casca condicionou os esforços a ser transmitidos ao longo das ligações entre elementos pré-fabricados, que ficaram predominantemente sujeitas a forças de compressão, entre os subelementos 1, 2, 3 e 4 que, quando sujeitos a solicitações verticais apenas têm esforços de compressão, ou a esforços de corte, na ligação de cada conjunto principal com os restantes.

Cada conjunto principal apenas poderá ter descompressão nas ligações entre as peças 1, 2, 3 e 4 se e quando sujeite a solicitações horizontais, pelo que a solução a adotar deve mitigar esse efeito ou mesmo anulá-lo. Por outro lado, a casca de dupla curvatura e muito esbelta será produzida sem qualquer armadura ordinária e com recurso a um betão UHPFRC, pelo que a adoção de qualquer solução de ligação mecânica se mostra desadequada.

Uma solução de ligação indentada seca, capaz de transmitir as forças de corte nas interfaces entre peças afigura-se como uma solução adequada às necessidades de montagem e de integridade estrutural, desde que seja possível assegurar que as ligações entre

os elementos 1, 2, 3 e 4 não sofrem descompressão. Para assegurar este efeito optou-se pela colocação de pré-esforço não aderente, entre os elementos 1 a 4, centrados na superfície média da casca, destinados a prevenir a descompressão em cada ligação entre peças, mesmo para solicitações horizontais.

A introdução do pré-esforço nas ligações entre elementos pré-fabricados melhora a transferência das forças de corte pelo potencial efeito de ferrolho dos varões ou cordões, aumenta o atrito na interface betão-betão e previne a separação entre as peças [18]. Por outro lado, o pré-esforço revela-se importante na estabilidade destas estruturas finas quando sujeitas a ações horizontais, como o vento ou ações sísmicas [19], [20], pré-induzindo tensões de compressão em áreas que possam vir a estar sujeitas a tensões de tração.

No contexto acima exposto adotou-se uma ligação indentada seca, de forma tronco-piramidal, do tipo macho/fêmea, capaz não só de transmitir os esforços de corte necessários como também ser facilitadora da montagem da casca e posicionamento relativo das peças entre si.

Na Figura 2a pode-se ver uma representação tridimensional da ligação integrada nos elementos da casca e na Figura 2b o posicionamento e o número de ligações entre as peças que compõem a casca.

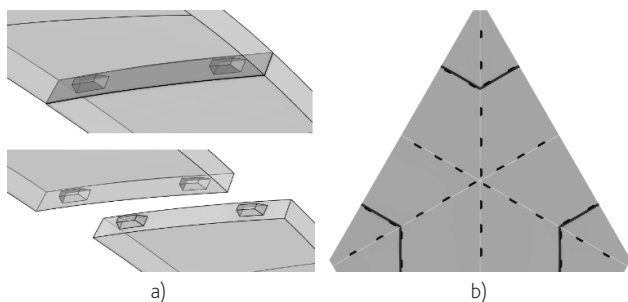


Figura 2 Ilustração 3D: a) ligação indentada dos subelementos; b) posição e número das ligações

O número de ligações e a sua localização foram cuidadosamente estudados para assegurar a transmissão dos esforços e permitirem o posicionamento desejado de dois cordões de pré-esforço em cada uma das 3 peças que materializam a casca (Figura 1a). Esta abordagem permitiu assegurar a compatibilidade com o projeto estrutural e a integridade estrutural da construção pré-fabricada após montagem.

Havendo a necessidade de construir um modelo à escala reduzida (1:3) para ensaiar a casca na mesa sísmica do LNEC, decidiu-se validar a solução de ligação também neste contexto por se tratar da situação mais desfavorável.

Neste modelo fixou-se a espessura da casca em 7 cm, tendo-se dimensionado cada uma das ligações indentadas com as dimensões que se apresentam na Figura 3. Cada dente da ligação macho tem uma dimensão que varia desde 135,25 mm até aos 100 mm de largura com 30 mm de profundidade e uma espessura que varia desde os 35 mm até aos 19 mm. Tratando-se de peças muito esbeltas procurou-se equilibrar as espessuras do dente (macho) e do encaixe (fêmea) para ter áreas de corte semelhantes.

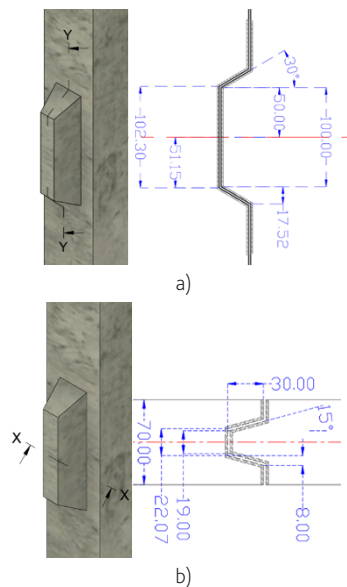


Figura 3 Detalhe da ligação no modelo à escala reduzida: a) seção longitudinal Y, b) seção transversal X

4 Ensaios de caracterização experimental das ligações ao corte

4.1 Programa experimental

Para a caracterização experimental das ligações ao corte concebeu-se um estudo paramétrico compreendendo a sua avaliação em ensaios de corte no plano (IP) e para fora-do-plano da casca (OOP) com diferentes níveis de pré-esforço perpendicular ao plano da ligação.

Os níveis de pré-esforço foram definidos de acordo com as condições de solicitação das ligações no que se refere ao nível de pré-esforço a que estão sujeitas na estrutura pré-fabricada. No protótipo à escala reduzida as ligações entre as peças 1 e 2 (e 3 e 4) (Figura 1) estão sujeitas a um estado de compressão de 2 MPa, enquanto a ligação entre as peças 2 e 3 (Figura 1) está sujeita a um estado de compressão de 1 MPa. As ligações ao longo das linhas que ligam os conjuntos de peças ilustradas na Figura 1 a) com as restantes iguais a si não estão sujeitas a qualquer nível de pré-esforço. Assim as séries em função do nível de pré-esforço foram designadas respetivamente de P2, P1 e P0, consoante o nível de pré-esforço.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Betão Armado (LEBA), do Departamento de Engenharia Civil do Politécnico de Leiria com o mesmo equipamento e instrumentação. A carga de ensaio foi aplicada através de um atuador hidráulico Servocis de 1000 kN e 300 mm de curso, controlado através de um sistema que permite a aplicação da carga em controlo de deslocamento. Todos os ensaios foram instrumentados com LVDTs, modelos CDP-50, CDP-100 e SDP-300 para controlar os deslocamentos entre peças, com células de carga CLC-50KNA e CLC-100KNA para controlar o nível de pré-esforço nas ligações, todos ligados a um sistema de aquisição automático TDS-303, todos da marca TML (Tokyo

Measuring Instruments Lab.). Os ensaios foram ainda registados em vídeo e fotografia para diferentes níveis de carregamento e fases do ensaio.

4.2 Provetes

Os provetes para os ensaios das ligações foram fabricados com o mesmo material e nas mesmas condições industriais do protótipo à escala reduzida. As necessidades de satisfazer determinadas condições relacionadas com a semelhança entre o protótipo à escala real e o protótipo à escala reduzida obrigaram à adoção de um betão leve auto-compactável reforçado com microfibras metálicas (1,5% em volume), com uma resistência à compressão de 50 MPa e um módulo de elasticidade de 22 GPa. A definição e caracterização deste betão foi objeto de programa específico que se apresenta noutra publicação nesta publicação.

De forma a assegurar condições de simetria nos ensaios, idealizou-se um ensaio de corte duplo com 3 provetes (Figura 4), solicitando o provete central que se encontrava ligado a dois provetes laterais através de ligações indentadas com as dimensões ilustradas na Figura 3.

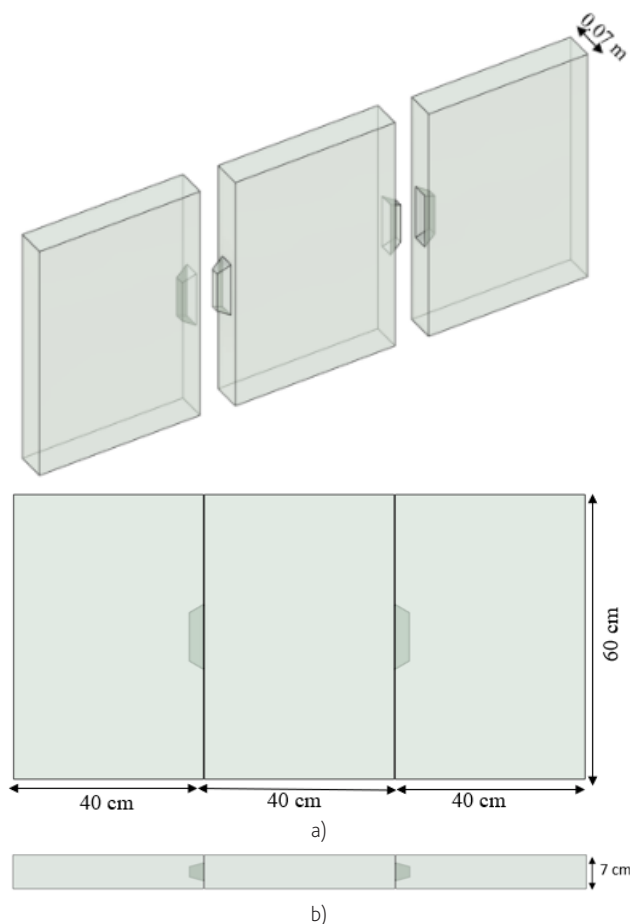


Figura 4 Dimensões dos provetes de ensaio: a) vista superior, b) vista frontal

O provete central possui uma ligação do tipo macho de cada lado, enquanto os provetes laterais têm uma ligação do tipo fêmea cada um. Cada provete tem as dimensões de 60 cm x 40 cm e possui 7 cm de espessura. As dimensões dos provetes foram condicionadas pelo padrão de rotura e pelo campo de tensões esperados e a espessura foi definida pela espessura do modelo reduzido da casca. A mesma geometria foi usada tanto para os ensaios no plano como para fora-do-plano.

4.3 Caracterização do comportamento da ligação no plano da casca

4.3.1 Esquema de ensaio

A caracterização do comportamento das ligações no plano da casca foi feita através do esquema de ensaio ilustrado na Figura 5. Os provetes de ensaio foram posicionados verticalmente, sendo as peças laterais apoiadas em chapas de aço e a peça central suportada pelas ligações indentadas de cada um dos lados. O esquema de ensaio permite aplicar e controlar um estado de compressão perpendicular à ligação, através de duas chapas em U e 4 varões roscados e porcas, replicando o feito do pré-esforço da casca nas suas ligações. O sistema dispõe de barras laterais destinadas a assegurar a verticalidade dos provetes e o seu alinhamento com a direção do carregamento.

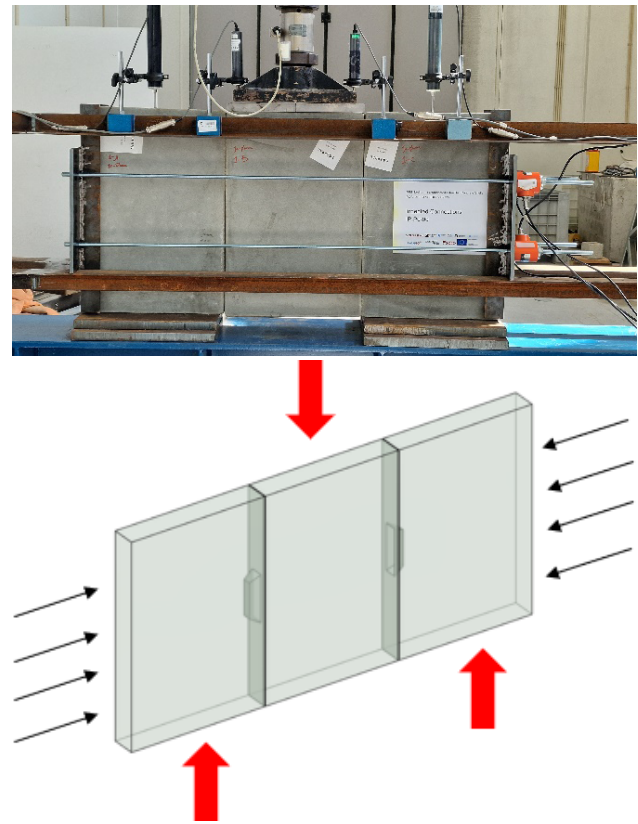


Figura 5 Esquema do ensaio de caracterização do comportamento das ligações no plano da casca

4.3.2 Apresentação dos resultados

4.3.2.1 Capacidade resistente

Foram ensaiados dois conjuntos de provetes na série IP-P0, onde as ligações foram testadas sem qualquer tipo de pré-esforço. Apesar disso os varões destinados a controlar o nível de pré-esforço encontravam-se instrumentados com células de carga de modo a registar a variação do estado de tensão durante a deformação da ligação indentada. A carga máxima de corte atingida antes da rotura foi de 113,56 kN, com um coeficiente de variação (CoV) de 0,21%, para um deslocamento relativo de aproximadamente 13 mm. Na Figura 6a ilustra-se o diagrama força de corte – deslocamento relativo da ligação na série IP-P0, destacando-se dos resultados observados a elevada ductilidade do comportamento da ligação, mantendo níveis elevados de resistência (65% da capacidade máxima) para níveis de deformação ao corte muito elevados (35 mm).

Como referido anteriormente, a série IP-P1 foi realizada com um nível de pré-esforço na ligação de 1 MPa. A resistência máxima ao corte alcançada foi de 143,14 kN com um CoV de 0,12%, o que representa um aumento de cerca de 21% relativamente ao teste anterior. Como era expectável, observou-se um aumento significativo da ductilidade com o pré-esforço (Figura 6b).

A série IP-P2 realizou-se com um nível de pré-esforço na ligação igual a 2 MPa. A resistência máxima atingida ao corte (Figura 6c) pela ligação antes da rotura foi de 190,18 kN com CoV de 0,14%. O aumento do nível de força de pré-esforço resultou num aumento de 25% na resistência ao corte em comparação com a série IP-P1 e de 40% em comparação com a série IP-P0, assim como da sua ductilidade.

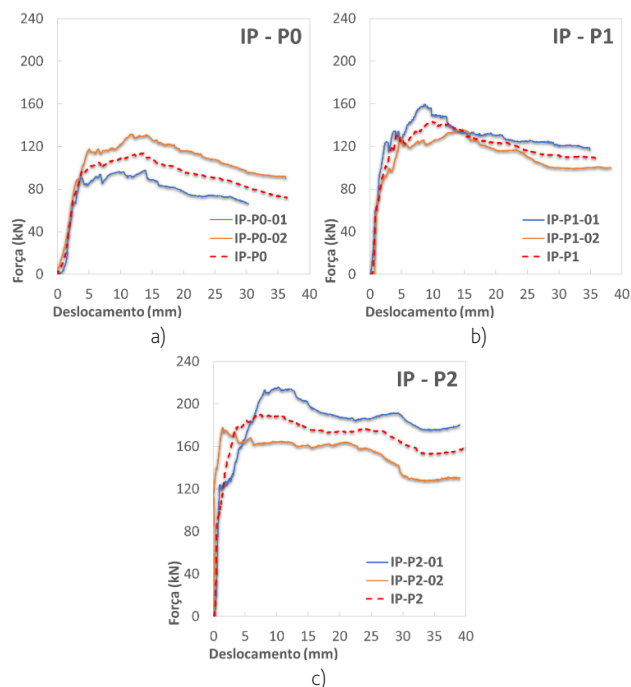


Figura 6 Diagrama força de corte-deslocamento das ligações: a) série IP-P0; b) série IP-P1; c) série IP-P2

4.3.2.2 Padrões de dano

O padrão de rotura (Figura 7) foi semelhante em todos os ensaios da série IP, com todas as ligações a falharem por corte no dente (macho) ao longo do plano da ligação seguido de esmagamento dentro do encaixe (fêmea), redistribuindo o dano entre o dente e o encaixe, o que prova o equilíbrio no dimensionamento da ligação.

O padrão de rotura das séries IP-P1 e IP-P2 foi semelhante à série sem pré-esforço, apesar de se observar a influência de atrito nas faces da ligação. Verificou-se que à medida que aumenta o pré-esforço na ligação, maior é a mobilização do atrito, fazendo com que o comportamento da ligação se aproxime de quase monolítico, materializado na formação de um modelo de escoras e tirantes como mecanismo de resistência ao corte (Figura 7c).

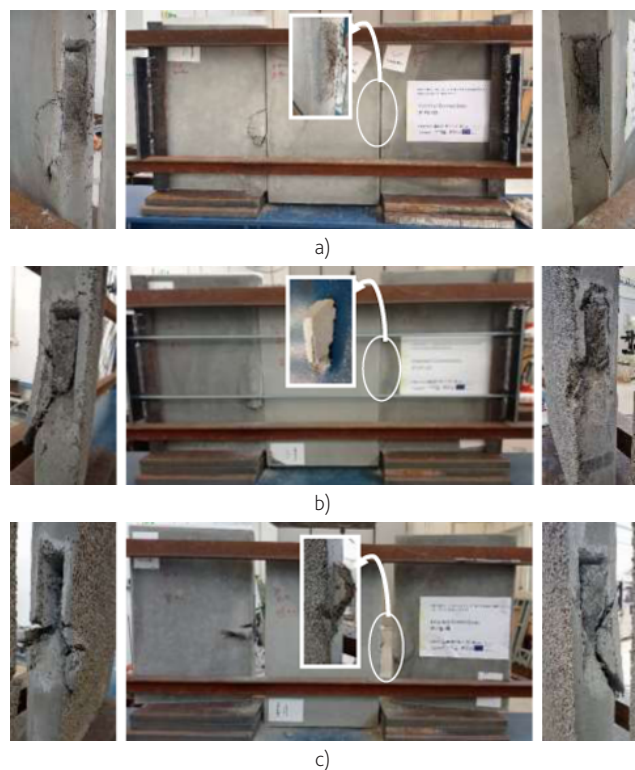


Figura 7 Padrão de rotura da ligação: a) série IP-P0; b) série IP-P1 e c) série IP-P2

4.4 Caracterização do comportamento da ligação para fora do plano da casca

4.4.1 Esquema de ensaio

A caracterização do comportamento das ligações para fora do plano da casca foi feita através do esquema de ensaio ilustrado na Figura 8. Os provetes de ensaio foram posicionados horizontalmente, sendo as peças laterais apoiadas em chapas de aço e a peça central suportada pelas ligações indentadas de cada um dos lados. O esquema de ensaio permite aplicar e controlar um estado de

compressão perpendicular à ligação, através de duas chapas em U e 4 varões roscados e porcas, replicando o efeito do pré-esforço da casca nas suas ligações. O sistema compreende uns prumos verticais destinadas a assegurar que as peças laterais não rodam durante o ensaio.

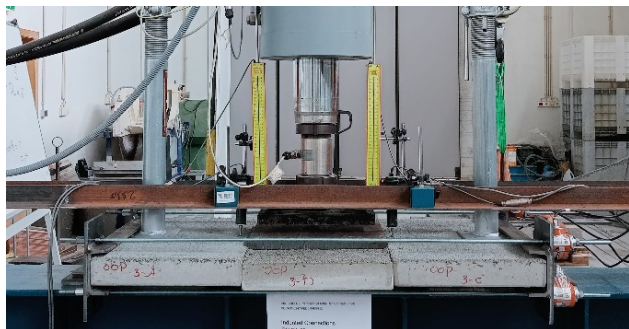


Figura 8 Esquema do ensaio de caracterização do comportamento das ligações para fora do plano da casca

4.4.2 Apresentação dos resultados

4.4.2.1 Capacidade resistente

Foram ensaiados dois conjuntos de provetes na série OOP-P0, onde as ligações foram testadas para fora do plano sem qualquer tipo de pré-esforço. A resistência máxima atingida ao corte antes da rotura foi de 32,29 kN, com um coeficiente de variação (CoV) de 0,14%, para um deslocamento relativo da ordem dos 5 mm. Na Figura 9a ilustra-se o diagrama força de corte – deslocamento relativo da ligação na série OOP-P0, destacando-se dos resultados observados a perda mais acentuada de rigidez da ligação quando solicitada nesta direção relativamente aquela exibida nos ensaios no plano.

A série OOP-P1 foi realizada com o mesmo esquema de ensaio da série OOP-P0 mas agora com um nível de pré-esforço da ligação de 1 MPa. A força máxima de corte alcançada foi de 84 kN (CoV de 0,15%), o que representa um aumento de cerca de 62% em comparação com o teste anterior. Observou-se um aumento significativo da capacidade com o pré-esforço, como era espectável (Figura 9b).

Os ensaios da série OOP-P2 foram realizados com um nível de pré-esforço na ligação de 2 MPa. A resistência máxima atingida ao corte (Figura 9c) pela ligação antes da rotura foi de 125,74 kN com CoV de 0,04%. O aumento do nível de pré-esforço resultou num aumento de 33% na resistência ao corte em comparação com a série OOP-P1 e de 77% em comparação com a série OOP-P0.

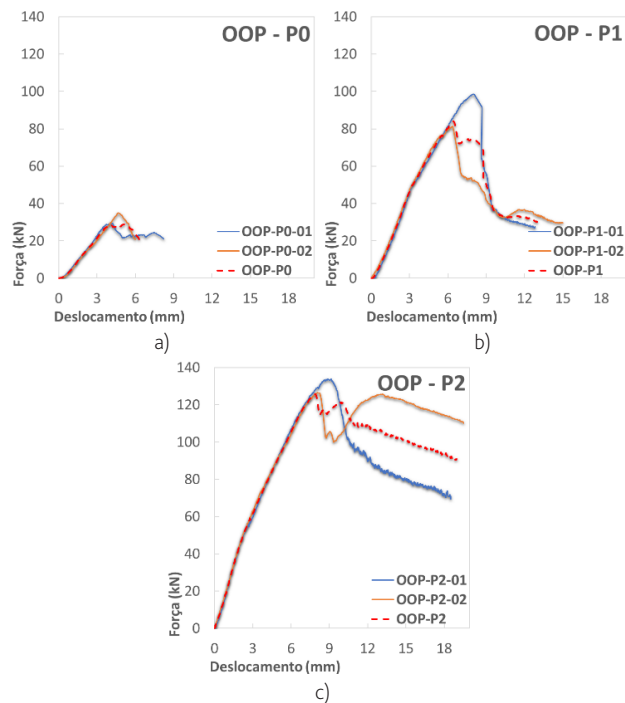


Figura 9 Diagramas força de corte - deslocamento das ligações: a) série OOP-P0; b) série OOP-P1; c) série OOP-P2

4.4.2.2 Padrões de dano

O padrão de rotura foi semelhante em todos os ensaios da série OOP, com o dano distribuído entre o corte do dente (macho) e o destacamento do encaixe (fêmea) no lado oposto à solicitação (Figura 10). Não se observou em nenhum dos ensaios a falha da ligação apenas pela cedência de uma das partes da ligação (dente ou encaixe) pelo que também nesta direção se pode considerar que a ligação se encontra corretamente proporcionada.

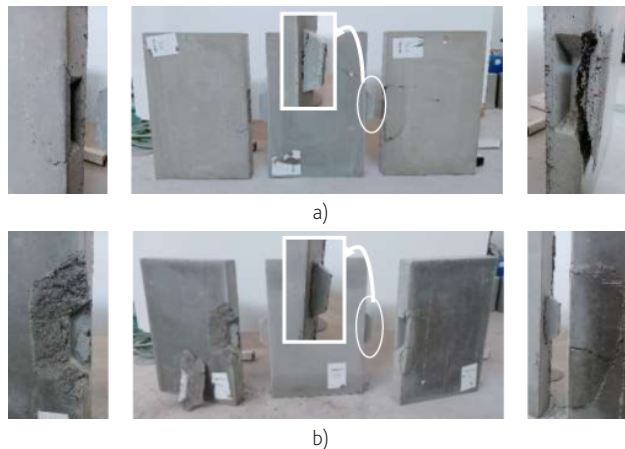


Figura 10 Padrão de rotura das ligações: a) série OOP-P0 e b) série OOP-P1

À medida que foram aumentando os níveis de pré-esforço, observou-se um contributo acentuado do atrito nas faces da ligação, alargando a área das peças envolvida na resposta da ligação. Para o maior nível de compressão na interface (P2) a mobilização do atrito resultou num comportamento quase monolítico da ligação, originando mesmo a rotura por flexão das peças laterais da ligação (Figura 11).



Figura 11 Rotura por flexão num dos provetes da série OOP-P2

5 Resultados e comentários finais

Na Figura 12a apresentam-se, para a série de ensaios no plano, os diagramas força de corte-deslocamento das ligações para os diferentes níveis de pré-esforço. Destaca-se dos resultados obtidos o comportamento equilibrado da ligação, com corte do dente e esmagamento do encaixe em simultâneo, sendo visível através do padrão de dano o papel das fibras metálicas na ductilidade exibida (Figura 7). Ainda quanto à ductilidade observa-se que o aumento do nível de pré-esforço contribui para o aumento da ductilidade e da elevada capacidade residual da ligação mesmo após atingir a resistência máxima. Quanto à resistência ao corte observa-se uma capacidade muito elevada da ligação indentada, mais relevante ainda porquanto os elementos são muito esbeltos e não dispõem de qualquer armadura ordinária. Mais uma vez observa-se um contributo significativo do pré-esforço na resistência ao corte.

Na Figura 12b apresentam-se os resultados da resistência ao corte da ligação para diferentes níveis de pré-esforço, quando solicitada na direção perpendicular ao seu plano. Destacam-se dos resultados obtidos o comportamento equilibrado da ligação, com corte do dente e destacamento do encaixe em simultâneo, sendo visível através dos padrões de dano o papel das fibras metálicas nos comportamentos exibidos (Figura 10). Observa-se que o aumento do nível de pré-esforço contribui para o aumento da capacidade e da rigidez da ligação. Quanto à resistência ao corte observa-se uma capacidade elevada da ligação indentada, principalmente nas ligações com maiores níveis de pré-esforço. Em contraste com os ensaios no plano a ligação quando solicitada para fora-do-plano deixa de exibir a mesma ductilidade, devendo este aspeto ser devidamente ponderado quando for condicionante do comportamento da estrutura. Destaca-se ainda a reduzida variabilidade dos resultados, que se explica pelo efeito que as fibras metálicas têm no comportamento ao corte deste betão.

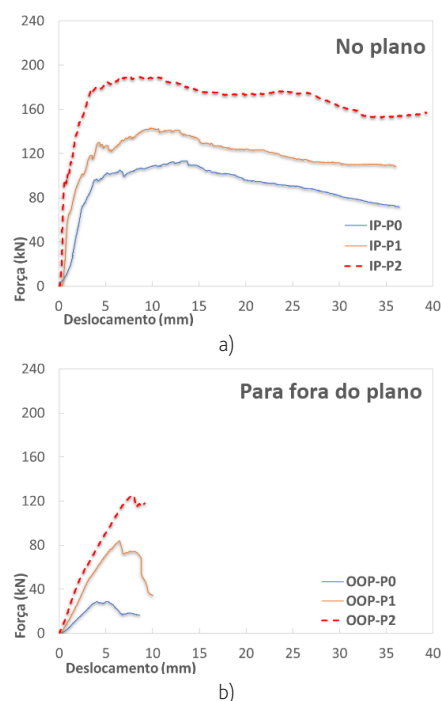


Figura 12 Diagrama força de corte-deslocamento das ligações: a) séries IP; b) séries OOP

Agradecimentos

O trabalho apresentado neste artigo é parte do projeto de I&D *Pre-Shell* (POCI-01-247-FEDER-039735) financiado pelo Portugal 2020 através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização e do Programa Operacional Regional de Lisboa (PORA2020), visando o desenvolvimento de uma solução estrutural otimizada dos pontos de vista geométrico e material, produzida com recurso à pré-fabricação, que garanta a competitividade tecnológica, científica e económica das coberturas compostas por cascas finas de betão de ultraelevado desempenho.

Os autores agradecem ainda à SPRAL – Sociedade de Pré-Esforçados de Aveiro, Lda e à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Politécnico de Leiria que tornaram possível este trabalho.

Referências

- [1] Tang, G. – "An Overview of Historical and Contemporary Concrete Shells, Their Construction and Factors in Their General Disappearance", *International Journal of Space Structures*, 2015;30(1):1-12. doi:10.1260/0266-3511.30.1.1
- [2] Maurin, B.; Motro, R. – "Concrete shells form-finding with surface stress density method", *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(6), 961-968.

- [3] Firl, M.; Bletzinger, K.U. – "Shape optimization of thin-walled structures governed by geometrically nonlinear mechanics", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2012, 237, 107-117.
- [4] Altenbach, H.; Zhilin, P. A. – "The theory of simple elastic shells". In *Theories of Plates and Shells. Critical Review and New Applications, Euromech Colloquium*, 2004, Vol. 444, pp. 1-12. Heidelberg: Springer. doi: 10.1007/978-3-540-39905-6_1
- [5] Schipper, H.R.; Janssen, B. – "Curving concrete—a method for manufacturing double curved precast concrete panels using a flexible mould". In *Design and construction. IABSE-IASS 2011: Proceedings of the Joint Symposium of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) and the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*, September 2011, pp. 20-23. Hemming Group Ltd London, UK. London.
- [6] Peters, S.; Trummer, A.; Amtsberg, F.; Parmann, G. – "Precast concrete shells: a structural challenge". In *Fabricate 2017: Rethinking Design and Construction*, 2017, pp. 250-258. UCL PRESS
- [7] Eisenbach, P.; Grohmann, M.; Rumpf, M.; Hauser, S. – "Seamless rigid connections of thin concrete shells—a novel stop-end construction technique for prefab elements". In *Proceedings of IASS Annual Symposia*, August 2015, Vol. No. 28, pp. 1-12. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).
- [8] Michiels, T.; Garlock, M.; Adriaenssens, S. – "Seismic assessment of Félix Candela's concrete shells and their behavior during the 1985 Mexico City earthquake. A case study on the church of our lady of the miraculous medal". In *Structural Analysis of Historical Constructions: Anamnesis, diagnosis, therapy, controls-Proceedings of the 10th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC*, November 2016, pp. 1544-1550.
- [9] Wang, C.L.; Liu, Y.; Zheng, X.; Wu, J. – "Experimental investigation of a precast concrete connection with all-steel bamboo-shaped energy dissipaters". In *Engineering Structures*, 2019, 178, 298-308. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.046>
- [10] Sørensen, J.H.; Hoang, L.C.; Olesen, J.F.; Fischer, G. – "Test and analysis of a new ductile shear connection design for RC shear walls". *Structural Concrete*, 2017, 18(1), 189-204. doi:10.1002/suco.201600056
- [11] Oettel, V.; Joachim, L.; Schmidt, B. – "Calculation approach of multi-keyed dry joints for sustainable modular precast element constructions made of UHPFRC". In *Construction and Building Materials*, 2023, 370, 130687. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130687>
- [12] Voo, Y.L. – "Shear strength of steel fiber reinforced ultra-high performance ductile concrete dry joint for segmental girder". *Technical Report No. TR-0006*, Dura Technology Sdn Bhd, Malaysia, 2010.
- [13] Liu, T.; Wang, Z.; Guo, J.; Wang, J. – "Shear strength of dry joints in precast UHPC segmental bridges: Experimental and theoretical research". *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(1), 04018100. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001323](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001323).
- [14] Kim, Y.J.; Chin, W.J.; Jeon, S.J. – "Interface shear strength at joints of ultra-high performance concrete structures". *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2018, 12(59), 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0298-8>.
- [15] Gopal, B.A.; Hejazi, F.; Hafezoghlorani, M.; Voo, Y.L. – "Shear Strength of Dry and Epoxy Joints for Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete". *ACI Structural Journal*, 2020, 117, 279-288. <https://doi.org/10.14359/51718078>.
- [16] Hu, Y.; Qiu, J.; Li, Z.; Yao, Y.; Liu, J.; Wang, J. – "Shear strength prediction method of the UHPC keyed dry joint considering the bridging effect of steel fibers". *Engineering Structures*, 2022, 255, 113937. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113937>.
- [17] Kang, J.Y.; Park, J.S.; Jung, W.T.; Keum, M.S. – "Connection between concrete layers with different strengths". *Engineering*, 2015, 7(07), 365-372.
- [18] Chen, K.; Song, J.Y.; Zhang, S. – "Simulation and analysis for externally prestressed concrete bridge based on ANSYS". *Advanced Materials Research*, 2011, 243-249, 1737-1742.
- [19] Eisenbach, P. – "Processing of Slender Concrete Shells-Fabrication and Installation". *kassel university press GmbH*, 2017. doi: <http://dx.medra.org/10.19211/KUP9783737602594>
- [20] Dallinger, S.; Kollegger, J. – "Thin post-tensioned concrete shell structures". In *Tailor Made Concrete Structures*, 2008, 703-706.

