

Aplicações do UHPC nas ligações de tabuleiros de pontes em concreto pré-moldado

MARCOS ANTONIO DO ROSARIO DA SILVA - MESTR. - <https://orcid.org/0000-0002-5626-3876>;
 ALEX M. DANTAS DE SOUSA - PÓS-DOUT. - <https://orcid.org/0000-0003-0424-4080> | EESC | USP
 YGOR MORIEL NEUBERGER - AL. DE DOUT. - <https://orcid.org/0000-0003-4001-7248> | UFSCAR
 RAFAEL ANDRÉS SANABRIA DÍAZ - PÓS-DOUT. - <https://orcid.org/0000-0002-6907-7159> | TECHNISCHE UNIVERSITEIT DELFT
 MOUNIR KHALIL EL DEBS - PROF. - <https://orcid.org/0000-0001-5955-7936> | EESC | USP

RESUMO

A CONSTRUÇÃO DE PONTES COM ELEMENTOS DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO E LIGAÇÕES PREENCHIDAS POR CONCRETO DE ALTÍSSIMO DESEMPENHO (UHPC) TÊM SE TORNADO MAIS FREQUENTES AO REDOR DO MUNDO VISANDO A CONSTRUÇÃO ACELERADA DE PONTES. ENTRETANTO, O NÚMERO DE ESTUDOS NACIONAIS SOBRE O TEMA AINDA É INCIPIENTE E AS NORMAS DE PROJETO NACIONAIS E INTERNACIONAIS NÃO ABORDAM EM DETALHE ESSE TIPO DE SISTEMA E SUAS LIGAÇÕES. ESTE ESTUDO VISA APRESENTAR AS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS LIGAÇÕES COMPOSTAS POR LAJES PRÉ-FABRICADAS E LIGAÇÕES PREENCHIDAS COM UHPC. ALÉM DISSO, O ESTUDO TAMBÉM COMPREENDE A APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS DE ESTUDOS INTERNACIONAIS E NACIONAIS SOBRE O TEMA QUE VISAM SUBSIDIAR O DESENVOLVIMENTO DE RECOMENDAÇÕES DE PROJETO PARA A SUA IMPLEMENTAÇÃO NA PRÁTICA PROFISSIONAL. NO TOCANTE AO MATERIAL DE PREENCHIMENTO DA LIGAÇÃO, TAMBÉM SÃO APONTADAS AS VANTAGENS DO USO DE UHPC EM COMPARAÇÃO COM O USO DE CONCRETOS CONVENCIONAIS OU ARGAMASSAS, COMO, POR EXEMPLO, UM COMPRIMENTO DE EMENDA DAS ARMAÐURAS CONSIDERAVELMENTE MENOR EM VIRTUDE DA MAIOR RESISTÊNCIA AO ARRANCAÐAMENTO DAS MESMAS. ENTRETANTO, OBSERVA-SE QUE A MAIORIA DOS ESTUDOS NUMÉRICOS DESENVOLVIDOS SOBRE O TEMA TEM CONSIDERADO OPÇÕES DE MODELAGEM NUMÉRICA QUE PODEM LIMITAR O DESENVOLVIMENTO DE CONCLUSÕES MAIS ASSERTIVAS SOBRE O COMPRIMENTO MÍNIMO DE EMENDA NECESSÁRIO NESTE TIPO DE LIGAÇÃO. POR ESTA RAZÃO, FORAM APRESENTADAS RECOMENDAÇÕES A SEREM SEGUIDAS EM FUTUROS ESTUDOS NUMÉRICOS SOBRE O TEMA.

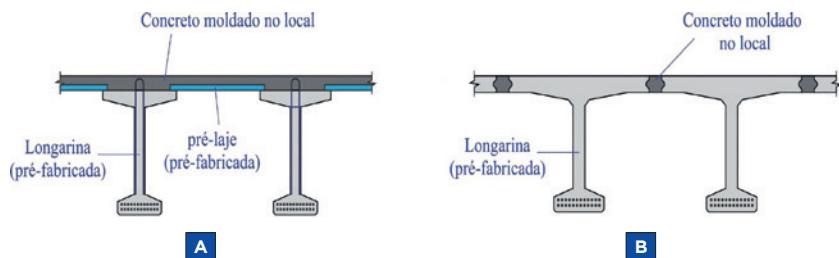


FIGURA 1

A) TABULEIRO DE PONTE COMPOSTO POR VIGA E PRÉ-LAJE PRÉ-FABRICADAS E CAPA DE CONCRETO MOLDADA NO LOCAL; B) SISTEMA COMPOSTO POR VIGAS PRÉ-FABRICADAS COM TABULEIRO INTEGRADO E LIGAÇÃO DE CONCRETO MOLDADO NO LOCAL COM EMENDA DE ARMADURAS

PALAVRAS-CHAVE: LAJES DE CONCRETO, PRÉ-MOLDADO, LIGAÇÕES, CONCRETO DE ALTÍSSIMO DESEMPENHO, UHPC, INTERFACE.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de elementos de concreto pré-moldado (CPM) em estruturas de pontes tem crescido nas últimas décadas em virtude de suas vantagens em relação às estruturas de concreto moldadas no local (CML), tais como: (i) maior velocidade de execução, (ii) maior controle de qualidade dos elementos estruturais, (iii) redução do impacto no trânsito, (iv) uso mais racional de recursos naturais (sustentabilidade) e (v) minimização das perturbações ao meio ambiente. No caso de lajes compostas por vigas pré-fabricadas e pré-laje (Figura 1a), sistema bastante utilizado no Brasil, o volume de CML ainda é relativamente elevado. Visando reduzir o consumo

do CML, outros sistemas têm crescido ao redor do mundo baseados na combinação de elementos pré-fabricados, como vigas com laje integrada (*bulb tee girders*, de uso comum nos EUA e na China — Figura 1b) ou lajes justapostas, ligadas entre si com emenda das armaduras e concreto moldado no local. Entretanto, o desempenho desse tipo de sistema depende sobretudo do projeto e detalhamento da região de ligação entre esses elementos.

Essas ligações têm como objetivo tentar reproduzir o comportamento das estruturas de concreto monolíticas através da transmissão adequada de momentos fletores e demais esforços internos entre os elementos. Conforme Wang *et al.* [1], a capacidade resistente dessas ligações é influenciada por variáveis de projeto como dimensões mínimas da ligação, do tipo de interface na ligação entre o

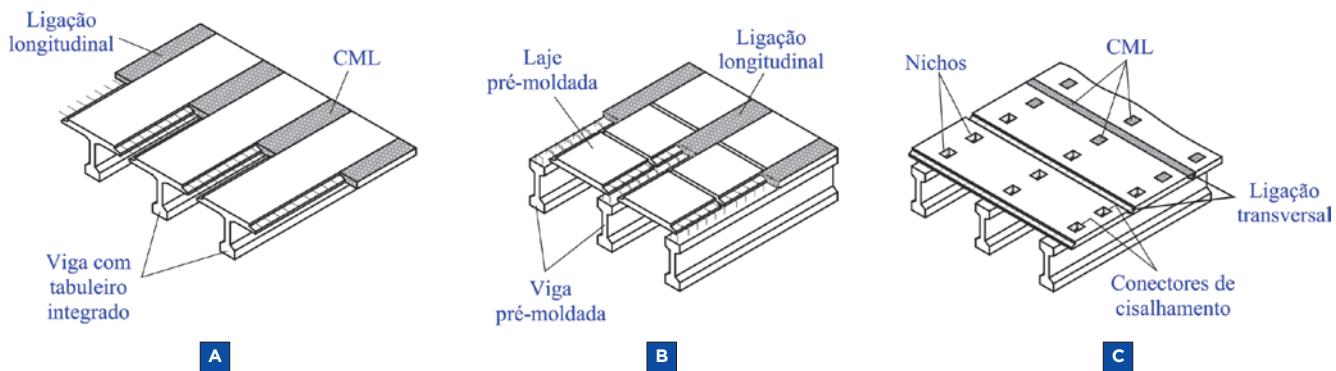


FIGURA 2

SISTEMAS DE PAINÉIS DE SEÇÃO COMPLETA. A) VIGAS COM TABULEIRO INTEGRADO (DECK BULB TEE GIRDERS - DBT). B) LAJES COM LIGAÇÃO PRINCIPAL NA DIREÇÃO DO EIXO LONGITUDINAL C) LAJES COM LIGAÇÃO PRINCIPAL NA DIREÇÃO DO EIXO TRANSVERSAL DA PONTE E NICHOS

FONTE: ADAPTADO DE EL DEBS [2]

concreto pré-moldado e o concreto molhado no local, a configuração de emenda/ancoragem das armaduras (tipo de emenda, quantidade de barras transversais e comprimento de emenda) e as propriedades do concreto usado na ligação.

Na prática, o concreto de altíssimo desempenho (*Ultra-High Performance Concrete – UHPC*) tem surgido como uma opção interessante ao preenchimento dessas ligações, uma vez que apresenta características como maior resistência à tração/fissuração, melhor aderência ao concreto pré-moldado e uma menor porosidade (o que melhora a durabilidade e vida útil da ligação). Entretanto, o número de estudos nacionais sobre a aplicação do UHPC em ligações deste tipo ainda é limitado.

Por esta razão, este estudo visa (i) apresentar uma revisão breve dos principais estudos e aplicações do UHPC nas ligações de lajes pré-moldadas de pontes e (ii) descrever um dos estudos na-

cionais que têm sido desenvolvidos sobre o tema na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP). Com isto, pretende-se estimular a discussão e o desenvolvimento de recomendações normativas para este tipo de aplicação nas pontes nacionais.

2. PROJETOS DE LIGAÇÕES ENTRE TABULEIROS PRÉ-MOLDADOS

De acordo com El Debs [2], a associação de elementos pré-moldados com concreto moldado no local é uma das aplicações mais comuns da pré-fabricação, sendo bastante utilizados na construção de pontes. O sistema de tabuleiro de ponte sem capa de concreto moldada no local é denominado de painéis de seção completa, ou pelo termo em inglês *full depth panels* (Figura 1b).

Na Figura 2, são apresentados os principais tipos de painéis de seção completa. O primeiro deles é o sistema de vigas de concreto com tabuleiro integrado,

geralmente em forma de T (Figura 2a – menos usual no Brasil) e ligação longitudinal no eixo da ponte. O segundo tipo corresponde ao sistema de lajes apoias entre longarinas conectadas por ligações longitudinais (Figura 2b – já empregado em alguns casos no Brasil). Por fim, temos o terceiro tipo, representado pelo sistema de lajes conectadas por ligações transversais, normalmente adotando nichos com concreto moldado no local (Figura 2c).

Quando o tabuleiro não é integrado à viga, são utilizados conectores de cisalhamento na região da interface entre as vigas e as lajes pré-moldadas. Esses conectores têm como finalidade garantir a transferência adequada das tensões de cisalhamento entre a viga e a laje.

Quando a solicitação principal transferida entre as lajes é o momento fletor, três mecanismos de ruptura podem ocorrer neste tipo de ligação (Figura 3): (i) escoamento excessivo da armadura longitudinal na região de interface; (ii)

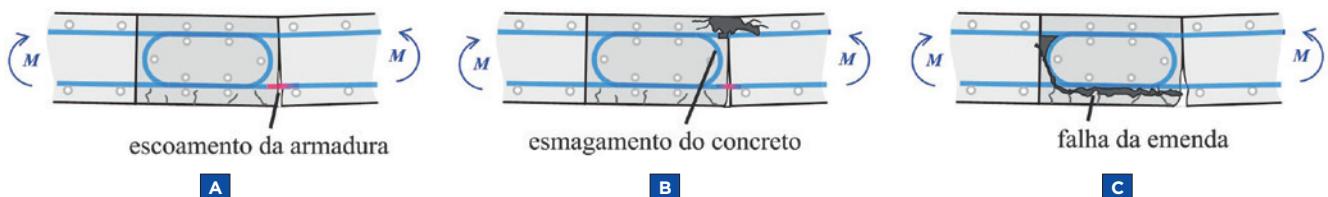


FIGURA 3

TIPOS DE RUPTURA POSSÍVEIS PARA A LIGAÇÃO: A) ESCOAMENTO EXCESSIVO DA ARMADURA; B) ESMAGAMENTO DO CONCRETO; C) FALHA DA EMENDA

FONTE: ADAPTADO DE WANG et al. [1]

esmagamento do concreto por compressão na região de interface; e (iii) falha da emenda das armaduras (aqui sendo representada a emenda por laço, mas existem também as emendas por traspasso de barras retas e ancoragem mecânica). Na prática, estes mecanismos de ruptura guiaram o desenvolvimento de modelos de cálculo para verificação da resistência neste tipo de ligação, que serão discutidos nas próximas seções. Embora a ruptura por esmagamento do concreto seja a mais crítica por sua característica frágil, a mesma geralmente é evitada com facilidade com base no dimensionamento à flexão tradicional. Por esta razão, o aspecto que requer maior atenção neste tipo de ligação é garantir a adequada resistência de emenda das armaduras.

Nas próximas seções serão apresentados detalhes de projeto para ligações entre lajes pré-moldadas. Alguns desses aspectos são: (i) tipos de ligações entre os elementos pré-moldados, (ii) forma da ligação; (iii) tipo de armadura na ligação e (iv) material de preenchimento utilizado na ligação.

2.1 Tipos de ligações

Garber e Shahrohinab [3] descrevem duas situações de ligações de *full depth panels*. Na ligação longitudinal, a conexão entre as lajes pré-moldadas ocorre sobre a viga (Figura 2b), sendo geralmente aplicadas para pontes com tabuleiros de largura maior que 15 m.

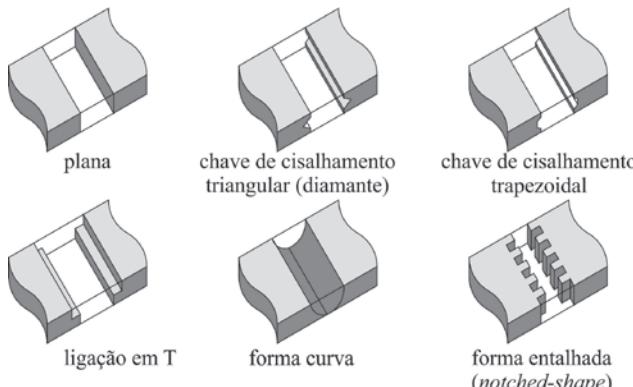


FIGURA 4
TIPOS DE FORMA DA LIGAÇÃO
FONTE: ADAPTADO DE WANG *et al.* [1]

Quando a largura do tabuleiro da ponte é inferior à 15 m, utiliza-se apenas a ligação transversal entre os painéis de lajes pré-moldado (Figura 2c). Neste caso, o comprimento do painel medido na direção do tráfego deve variar entre 2,5 m a 3,7 m. Essas dimensões devem ser determinadas levando em consideração as etapas de transporte e içamento.

2.2 Forma da ligação ou geometria da ligação

Sobre os tipos de forma utilizados nas ligações entre elementos de concreto pré-moldado, estes devem ser projetados de modo a facilitar a colocação do material de preenchimento da ligação. Exemplos de forma da ligação são apresentados na Figura 4. Nesse sentido, a forma mais utilizada para a ligação é a plana. No entanto, esta forma produz uma área de contato menor entre o concreto pré-moldado e o CML, o que pode resultar em um desempenho prejudicado, caso a superfície do concreto pré-moldado não seja devidamente preparada para receber o CML. Diante disso, outras formas para a região de ligação têm sido estudadas, como chaves de cisalhamento triangular, chave de cisalhamento trapezoidal, forma de curva, em forma de T e chave de cisalhamento no plano da laje.

2.3 Arranjos de emenda das armaduras

Além da geometria da ligação, outro fator importante que afeta a capacidade

resistente das ligações é o detalhamento da emenda das armaduras. O arranjo da armadura ideal deve ser de simples fabricação, fácil montagem na obra e garantir durabilidade e resistência da ligação. Normalmente, são utilizadas barras de armadura sem contato emendadas por sobreposição com diferentes detalhes (Figura 5): a) barras retas; b) barras com “cabeça” (ancoragem mecânica) e c) barras em laço.

Entre os tipos de arranjo, o mais usado é com barras retas, que resulta em emenda das armaduras por traspasso. Nessa situação, a emenda das armaduras é produzida pela aderência das barras com o concreto da ligação. Haber e Graybeal [4,5] recomendam que as dimensões das emendas das barras retas de aço sejam no mínimo $8d_b$ (considerando um cobrimento das armaduras de $3 d_b$), onde d_b é o diâmetro da barra de aço. Entretanto, esta dimensão pode variar em função das propriedades do UHPC e do cobrimento das armaduras.

Nesse sentido, outros pesquisadores realizaram estudos com diferentes detalhes de armadura de modo a tentar reduzir o comprimento de emenda de traspasso e consequentemente reduzir a largura da ligação [6,7]. Uma alternativa às barras retas nas ligações é a utilização de barras com “cabeça” (que corresponde a uma ancoragem mecânica) ou barras dobradas em formato de U (laço) [8]. No caso de barras em laço, para garantir o raio mínimo de dobra exigido nas normas, a espessura mínima das lajes deve ser de 180 mm [9].

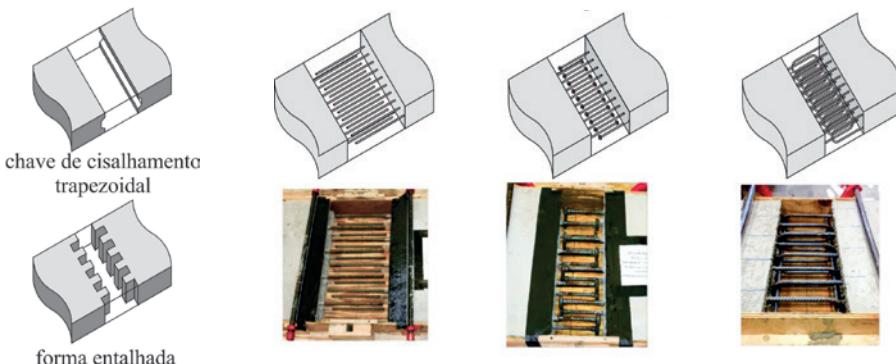


FIGURA 5
TIPOS DE EMENDA DAS ARMADURAS NA LIGAÇÃO: A) BARRAS RETAS; B) BARRAS COM “CABEÇA”; C) BARRAS EM LAÇO
FONTE: ADAPTADO DE WANG *et al.* [1] E HABER E GRAYBEAL [4]

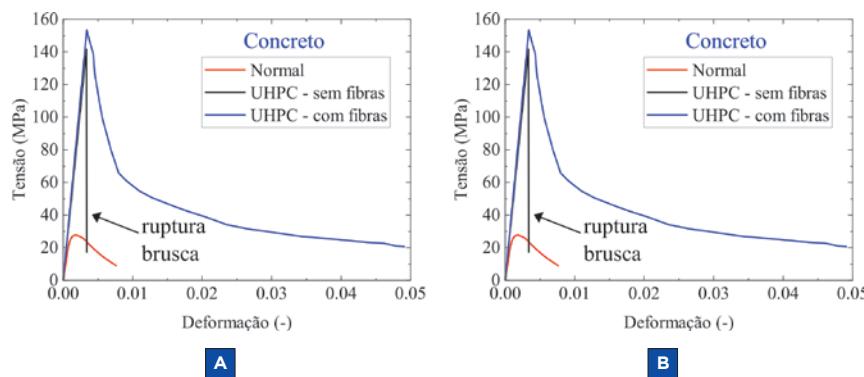


FIGURA 6

EXEMPLO DE COMPORTAMENTO TENSÃO X DEFORMAÇÃO PARA OS CONCRETOS CONVENCIONAIS (NORMAL), CONCRETO DE ALTÍSSIMO DESEMPENHO SEM FIBRAS (UHPC - SEM FIBRAS) E CONCRETO DE ALTÍSSIMO DESEMPENHO COM FIBRAS (UHPC - COM FIBRAS): A) À COMPRESSÃO; B) TRAÇÃO

2.4 Material de preenchimento utilizado nas ligações

O concreto moldado no local utilizado no preenchimento das ligações deve possuir algumas propriedades, tais como: boa aderência com o concreto pré-moldado, alta resistência nas idades iniciais, fluidez adequada para preencher a ligação, baixa retração e durabilidade às intempéries. Neste sentido, o emprego de materiais de alto desempenho (UHPC) tem grande potencial devido às suas melhores propriedades mecânicas em relação ao concreto convencional ou normal (sem fibras). Por exemplo, o UHPC oferece maior resistência à tração, maior resistência residual pós-fissuração (com fibras) e melhores propriedades de aderência entre concretos com diferentes idades.

3. MODELOS DE ANÁLISE

Diversos estudos voltados para a análise deste tipo de ligação têm sido realizados por diversos pesquisadores nos últimos anos [6-8,10]. O principal método empregado para avaliar a capacidade resistente das ligações é o ensaio experimental em laboratório, no qual diferentes configurações de projeto são testadas e investigadas. A Figura 7 mostra um exemplo de ensaio experimental realizado por Haber e Graybeal [7].

Em um destes estudos, Yuan e Graybeal [11] indicam que o comprimento de $8 d_b$ para barras com diâmetro de 12.5 mm seria suficiente para garantir a

ancoragem das armaduras, considerando um cobrimento maior que $3 d_b$. Neste exemplo, foi utilizado UHPC com volume de fibras de 2%, e a resistência à tração mínima foi 5,5 MPa. Entretanto, recomendações para outras bitolas de armadura e outras propriedades do UHPC geralmente são escassas, em virtude do número ainda limitado de estudos experimentais sobre o tema.

Além disso, a grande maioria dos estudos experimentais sobre este tema tem simulado apenas o caso da flexão pura (sem influência da força cortante), o que não representa as condições reais de uso. Nesta vertente, são necessários maiores estudos experimentais sob condições de contorno mais representativas de suas aplicações (combinando a flexão com a força cortante).

Por esta razão, tem havido um crescimento na quantidade de estudos numéricos dedicados a esse tema [12-15]. Neste tipo de análise, os modelos numéricos são geralmente calibrados com base em resultados experimentais da literatura e, posteriormente, modificados para avaliar a influência de outros parâmetros de projeto no comportamento da ligação, como a forma da ligação, detalhamento da armadura ou condições de contorno/carregamento. Um destes estudos tem sido desenvolvido na EESC/USP, ainda em estágio preliminar [12]. Um dos ensaios escolhidos para modelagem foi o de Deng *et al.* [6] (Figura 8). Na comparação entre resultados experimentais e numéricos, observou-se uma boa concordância entre em termos do padrão de fissuração (Figura 9a) e da resistência prevista (Figura 9b, com mais detalhes sobre a modelagem podendo ser consultados em [12]).

Entretanto, um dos principais desafios deste tipo de modelagem é a adequada representação das propriedades da interface entre os concretos de diferentes idades, bem com as propriedades de deslizamento entre o UHPC e as armaduras (*bond-slip*). A grande maioria dos estudos numéricos disponíveis na literatura consideram aderência perfeita entre as armaduras e o UHPC [12-15], o que pode resultar em conclusões errôneas nas análises, uma vez que essas opções de modelagem não permitem representar possíveis rupturas da ancoragem por comprimento insuficiente do traspasse.

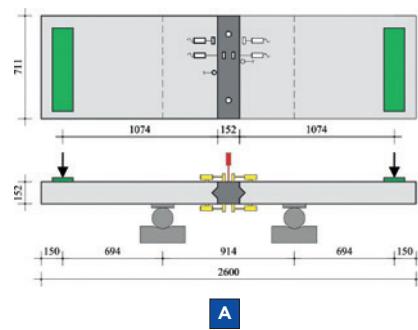


FIGURA 7

EXEMPLO DE ENSAIO EXPERIMENTAL DE LIGAÇÃO ENTRE LAJES PRÉ-MOLDADAS:
A) ESQUEMA DO ENSAIO. B) FOTO DO MODELO

FONTE: ADAPTADO DE HABER E GRAYBEAL [7] (DIMENSÕES EM MM)



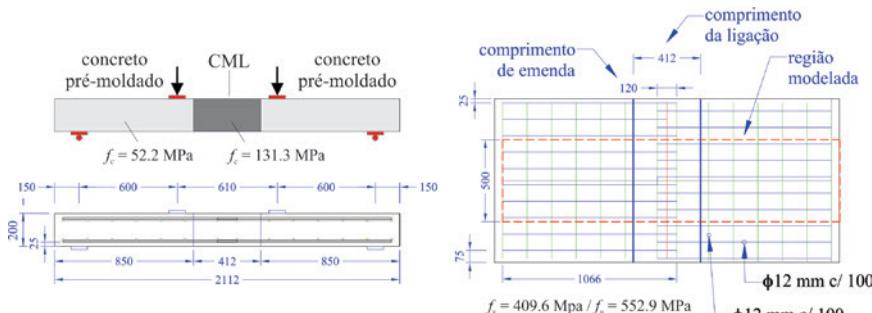


FIGURA 8

ESQUEMA DE ENSAIO, GEOMETRIA E DETALHAMENTO DAS ARMADURAS DO ENSAIO MODELADO

FONTE: ADAPTADO DE DENG *et al.* [6] (DIMENSÕES EM MM)

Ainda não existem normas técnicas nacionais e internacionais que abordem especificamente este tipo de ligação. Por esse motivo, são adotadas especificações de trabalhos experimentais e de publicações técnicas que considerem as principais variáveis do problema [4,7]. Entretanto, a fim de promover uma maior difusão do uso dessas ligações na prática profissional, é necessário que sejam desenvolvidos modelos analíticos capazes de estimar o comportamento e a resistência das ligações por meio de cálculos simplificados. Neste sentido, merece destacar o modelo de bielas e tirantes na (Figura 10), apropriado para as emendas de barras com “cabeça” e com laços.

4. RECOMENDAÇÕES PARA MODELAGEM NUMÉRICA COM LIGAÇÕES DE UHPC

Nos estudos apresentados na literatura, observou-se que todos eles consideravam a armadura perfeitamente adherida ao UHPC ou concretos normais [12-15]. Na prática, esta escolha de modelagem evita a representação ou captura de possíveis rupturas da emenda na medida em que o comprimento de traspasse é reduzido para valores muito pequenos (da ordem de $2.5d_b$, por exemplo), o que não parece consistente, conforme identificado por Silva *et al.* [12]. Por esta razão, novos estudos sobre o tema são recomendados considerando-se as seguintes recomendações:

- ▶ Considerar o comportamento de deslizamento relativo entre as armaduras e o concreto (*bond-slip*) em estudos numéricos, de forma a per-

mitir representar possíveis rupturas da emenda por falta de ancoragem das barras;

- ▶ Desenvolver estudos experimentais com ênfase no deslizamento relativo entre as armaduras e o UHPC, de modo a estimar melhor os parâmetros que caracterizam a curva de *bond-slip* necessárias em modelos numéricos;
- ▶ Desenvolver ou identificar opções de modelagem para o comportamento não-linear à tração (em termos de tensão-abertura de fissura) para o UHPC, de modo a não bloquear possíveis rupturas de emenda neste tipo de ligação e representar adequadamente o comportamento do UHPC em modelagens numéricas; em outras palavras, a consideração do *bond-slip* por si só não garante

representar adequadamente possíveis falhas de emenda neste tipo de ligação;

- ▶ Representar de forma mais adequada os parâmetros da interface entre o UHPC e concreto pré-moldado na interface da ligação em modelos numéricos, de modo a melhorar a representação do comportamento no caso de combinação de esforços de flexão e força cortante; na prática, a maioria dos estudos numéricos sobre o tema ainda tem considerando aderência perfeita entre estes concretos, o que pode não ser representativo de todas as formas de tratamento da interface.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca por soluções de projeto que acelerem as construções de pontes e minimizem impactos ambientais, sociais e desperdícios de materiais tem sido um tópico de frequente investigação ao redor do mundo no intuito de aumentar a sustentabilidade na indústria da construção. Neste contexto, o uso de tabuleiros de pontes compostas por painéis de lajes pré-moldadas e ligações preenchidas com UHPC apresentam um grande potencial quando comparado às soluções de preenchimento com concreto convencional.

Conforme apresentado, as ligações são o aspecto mais importante deste sistema. Por esta razão, surgiram diversas formas de detalhamento possíveis que

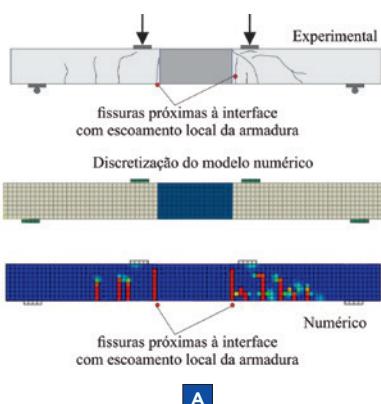
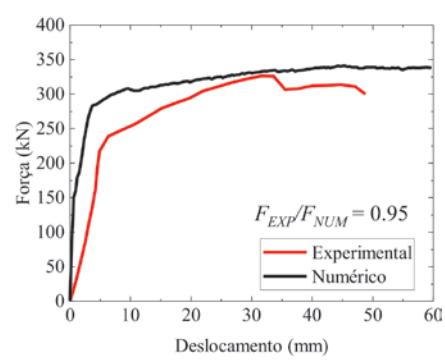


FIGURA 9

COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS DE SILVA *et al.* [12]:

A) PADRÃO DE FISSURAÇÃO; B) CURVA FORÇA X DESLOCAMENTO DO ATUADOR CENTRAL



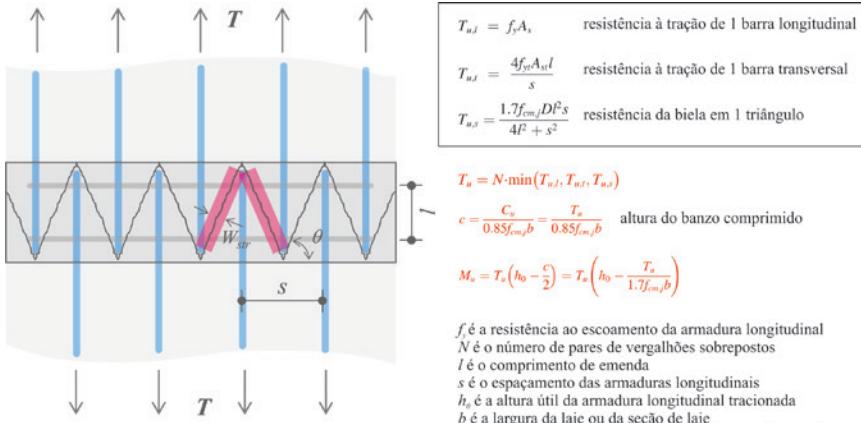


FIGURA 10

MODELO DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO COM BASE NA TEORIA DE BIELAS E TIRANTES

FONTE: ADAPTADO DE WANG *et al.* [1]

têm sido objeto de investigações experimentais, numéricas e analíticas. Os modelos de verificação da resistência deste tipo de ligação existentes são relativamente simples, mas não levam em consideração

aspectos como o tratamento da interface na região de ligação, forma da ligação, comprimento de emenda e comportamento *bond-slip* das armaduras no UHPC. Por esta razão, são necessários maiores

estudos nacionais e internacionais para subsidiar a formalização de recomendações práticas acerca do detalhamento necessário para este tipo de ligação.

No tocante aos estudos numéricos desenvolvidos sobre o tema na literatura, observou-se que a grande maioria deles apresenta algumas opções de modelagem que podem conduzir a conclusões errôneas sobre o comprimento mínimo necessário de emenda das armaduras (devido à consideração de aderência perfeita entre a armadura e o UHPC). Por esta razão, novos estudos têm sido desenvolvidos na EESC/USP com vistas a apresentar contribuições sobre a modelagem numérica deste tipo de ligação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela CAPES (Código 001) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processo Nº 2021/13916-0).

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Wang X, Liu Y, Chen A, Ruan X. Flexural capacity assessment of precast deck joints based on deep forest. *Structures* 2022;41:270-86. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.05.009>.
- [2] EL DEBS MK. Pontes de Concreto: com ênfase na Aplicação de Elementos Pré-moldados. vol. 1. 1st ed. São Paulo: Oficina de Textos; 2021.
- [3] Garber D, Shahrokhinasab E. Performance Comparison of In-Service, Full-Depth Precast Concrete Deck Panels to Cast-in-Place Decks. Report ABC-UTC-2013-C3-FIU03-Final, Accelerated Bridge Construction, Transportation Center Florida International University 2019.
- [4] Haber ZB, Graybeal BA. Lap-Spliced Rebar Connections with UHPC Closures. *Journal of Bridge Engineering* 2018;23:04018028. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001239](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001239).
- [5] Graybeal BA. Design and Construction of Field-Cast UHPC Connections. Report FHWA-HRT-14-084, Federal Highway Administration (FHWA) 2014.
- [6] Deng E-F, Zhang Z, Zhang C-X, Tang Y, Wang W, Du Z-J, et al. Experimental study on flexural behavior of UHPC wet joint in prefabricated multi-girder bridge. *Eng Struct* 2023;275:115314. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115314>.
- [7] Haber ZB, Graybeal BA. Performance of Grouted Connections for Prefabricated Bridge Deck Elements. Report FHWA-HIF-19-003, Federal Highway Administration (FHWA) 2018.
- [8] Ma ZJ, Lewis S, Cao Q, He Z, Burdette EG, French CEW. Transverse Joint Details with Tight Bend Diameter U-Bars for Accelerated Bridge Construction. *Journal of Structural Engineering* 2012;138:697-707. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000518](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000518).
- [9] AASHTO. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 8th Editio. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO); 2017.
- [10] Nguyen Q-T, Maki T, Mutsuyoshi H, Ishihara Y. Flexural Behavior of Precast Concrete Slab Connections using Loop Steel Bars and Mortar. *Journal of Advanced Concrete Technology* 2023;21:436-49. <https://doi.org/10.3151/jact.21.436>.
- [11] Yuan J, Graybeal BA. Bond Behavior of Reinforcing Steel in Ultra-High Performance Concrete. Report No FHWA-HRT-14-090, Federal Highway Administration (FHWA) 2014.
- [12] Silva MA do R da, de Sousa AMD, El Debs MK. Análise do comportamento à flexão de ligações em UHPC de lajes pré-moldadas de tabuleiro de pontes. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 2023, Rio de Janeiro: 2023.
- [13] Huang D, Nie X, Zeng J, Jiang Y. Experimental and numerical analysis on flexural behavior of improved U-bar joint details for accelerated bridge construction. *Eng Struct* 2023;289. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116328>.
- [14] Zhang Z, Zhang Y, Zhu P. Flexural Behavior of Precast RC Deck Panels with Cast-in-Place UHPFRC Connection. *Coatings* 2022;12. <https://doi.org/10.3390/coatings12081183>.
- [15] Di J, Han B, Qin F. Investigation of U-bar joints between precast bridge decks loaded in combined bending and shear. *Structures* 2020;27:37-45. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.05.041>.