



Análise do comportamento à flexão de ligações em UHPC de lajes pré-moldadas de tabuleiro de pontes

Marcos Silva¹, Alex de Sousa², Mounir El Debs³

¹ Universidade de São Paulo / Escola de Engenharia de São Carlos / marcosilva@usp.br

² Universidade de São Paulo / Escola de Engenharia de São Carlos / alex_dantas@usp.br

³ Universidade de São Paulo / Escola de Engenharia de São Carlos / mkdebs@sc.usp.br

Resumo

O desempenho estrutural de pontes que utilizam lajes pré-moldadas depende em grande parte da capacidade das ligações de concreto moldado no local (CML) de transferir esforços entre esses elementos. Uma das principais preocupações levantadas na utilização desse sistema é sobre como quantificar a resistência à flexão das ligações entre as lajes pré-moldadas do tabuleiro. Esta resistência está diretamente relacionada as especificações de projeto tais como: geometria da ligação, detalhamento das armaduras e o tratamento da superfície nas interfaces da ligação. Além disso, as excelentes propriedades mecânicas do concreto de altíssimo desempenho (UHPC) apresentam grande potencial no uso em ligações entre elementos pré-moldados de pontes. Entretanto, poucos trabalhos discutem o efeito de algumas variáveis de projeto na capacidade resistente destas ligações quando utilizado o UHPC. Este trabalho tem como objetivo analisar como algumas variáveis de projeto, utilizando nichos preenchidos de UHPC, influenciam no comportamento à flexão destas ligações. Para este fim, foram calibrados modelos numéricos em elementos finitos a partir ensaios de experimentais disponíveis na literatura. Posteriormente, foram realizadas modificações no modelo numérico calibrado para avaliar o comportamento à flexão dos modelos variando parâmetros como o comprimento de emenda das barras na ligação, geometria da ligação com UHPC, detalhamento e taxa da armadura na região de ligação. Os resultados indicaram que os parâmetros que mais obtiveram influência foram a geometria da ligação e a taxa de armadura. Os resultados esperados da pesquisa serão úteis para fornecer uma compreensão abrangente sobre o desempenho de flexão e orientação de projeto de ligações com UHPC em pontes de concreto pré-moldado.

Palavras-chave

Pontes em concreto pré-moldado, ligações, sistema ABC, UHPC, simulação numérica.

Introdução

Com o avanço das tecnologias da construção civil que visam rápida execução, redução de custos e sustentabilidade, elementos e sistemas de pontes de concreto pré-moldado (CPM) têm sido amplamente adotados em todo o mundo, como exemplo, o uso do *Accelerated Bridge Construction* (ABC) (CULMO, 2011). Segundo El Debs (2021), o ABC é utilizado, principalmente, para a reduzir os impactos do tráfego, pois os viajantes são diretamente afetados pela construção no local. Desse modo, a principal vantagem do ABC reside em evitar longos desvios e construções provisórias. O sistema de tabuleiros de pontes pré-moldadas é composto por elementos e sistemas de pontes pré-fabricadas (*Prefabricated Bridge Elements and Systems* – PBES) conectados por ligações que utilizam concreto moldado no local colocadas sobre armadura entrelaçada (exemplo, Figura 1).

Entretanto, segundo Wang *et al.* (2022), uma das maiores preocupações para o sistema ABC é a transmissão adequada de esforços entre os elementos pré-moldados. As ligações entre os elementos pré-fabricados é um dos aspectos mais importantes no projeto de estruturas pré-moldadas. Essa ligação é realizada por meio do desempenho de aderência entre a armadura e o concreto moldado no

local (GRAYBEAL, DE LA VARGA e HABER, 2017). Na prática, este tipo de ligação tem como objetivo reproduzir o comportamento das estruturas de concreto monolíticas moldadas no local, através da transmissão de momentos fletores e demais esforços internos entre os elementos.

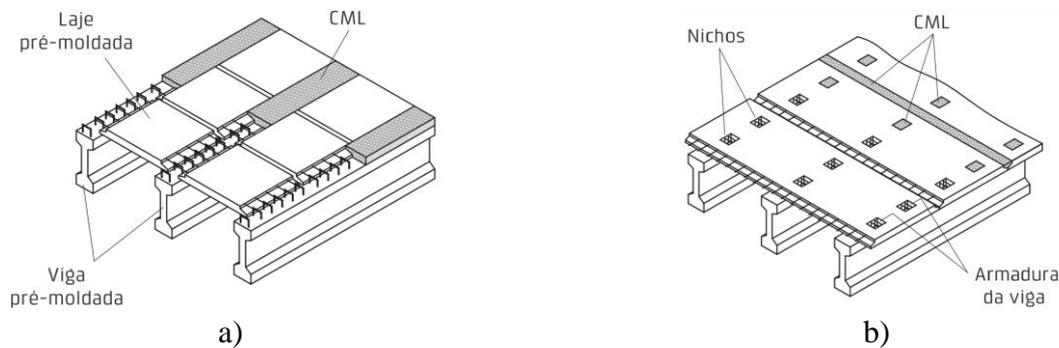


Figura 1 – Tabuleiro de ponte composto pela ligação de lajes pré-moldadas. a) ligações sobre vigas. b) ligações no nível de tabuleiro.

Visando atender essas características, nas últimas décadas, o concreto de altíssimo desempenho (*ultra-high performance concrete* – UHPC) passou a ser mais utilizado em construções de pontes (HABER *et al.* 2018). Isto ocorre porque o UHPC apresenta melhores propriedades mecânicas comparado ao concreto convencional, como maior resistência máxima à tração e resistência residual pós-fissuração. Apesar do maior custo do UHPC comparado ao concreto convencional, a pequena quantidade de material utilizado nas ligações torna a solução com UHPC economicamente competitiva. Além disso, a menor porosidade do UHPC melhora a durabilidade do material, o que reduz custos de manutenção na estrutura.

Apesar do crescente número de estudos sobre as ligações com UHPC, o número de pesquisas com ênfase sobre o desempenho à flexão de ligações em UHPC para lajes pré-moldadas de pontes ainda é limitado. Na prática, de acordo com Jiu *et al.* (2023), ligações com concreto convencional ainda são mais usadas na engenharia. Portanto, faz-se necessário a realização de estudos comparativos entre as propriedades antes ligações com UHPC em relação as que utilizam o concreto convencional para orientar projetos de engenharia. O efeito da configuração de emendas das barras da armadura, forma da interface da ligação e taxa de armadura em ligações que utilizam UHPC devem ser melhor investigadas de modo a contribuir na definição de recomendações de projeto para este tipo de ligação. Desse modo, este trabalho tem o objetivo de avaliar como algumas das variáveis de projeto influenciam no desempenho estrutural das ligações entre elementos pré-moldados utilizando o UHPC, a partir de uma análise numérica não linear em elementos finitos no software ABAQUS.

Primeiramente, ensaios experimentais disponíveis na literatura foram usados para validar os modelos numéricos desenvolvidos para representar o comportamento estrutural deste tipo de ligação. Em seguida, foi realizado um estudo paramétrico para investigar a influência de (i) comprimento de emenda, (ii) detalhamento da armadura na região de ligação, (iii) diferentes configurações da interface da ligação e (iv) taxa de armadura.

Ensaio experimental de referência

Geometria do modelo experimental

Ao todo foram utilizados neste estudo cinco modelos experimentais ensaiados por Deng *et al.* (2023) para validação dos modelos numéricos em elementos finitos, que posteriormente foram utilizados para investigar o desempenho à flexão da ligação de UHPC. Estes ensaios foram escolhidos porque simulam o comportamento de ligações de elementos pré-moldados de pontes com diferentes configurações de projeto. Portanto, estes resultados experimentais permitiram validar os modelos numéricos considerando diferentes parâmetros influentes no problema.

Na Figura 2 é apresentado os modelos testados por Deng *et al.* (2023). O ensaio experimental considerou lajes com mudanças no projeto da ligação tais como: (i) detalhamento da armadura na

ligação, (ii) taxa de armadura e (iii) forma da interface da ligação. Na Tabela 1 estão descritos os detalhes dos modelos testados por Deng *et al.* (2023) e utilizados neste trabalho.

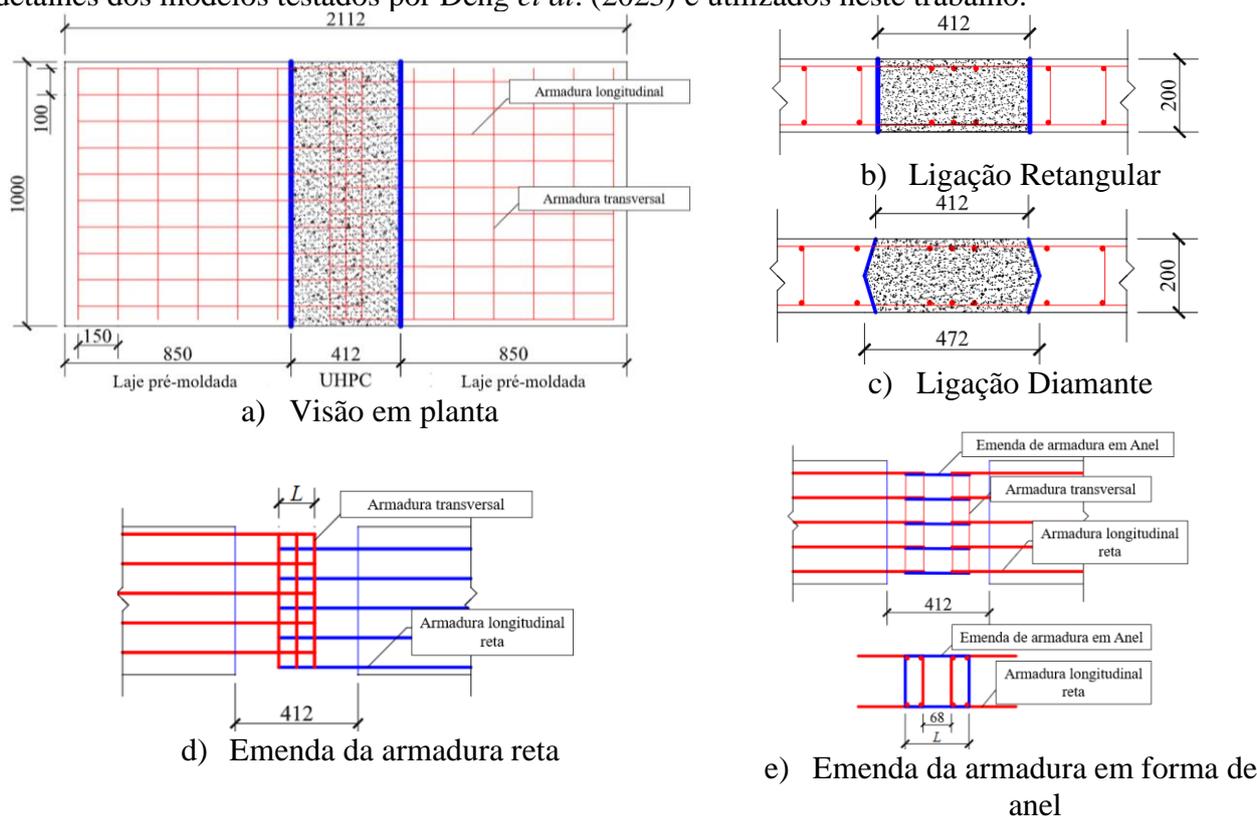


Figura 2 – Geometria dos tabuleiros testados por Deng *et al.* (2023).

Tabela 1 – Parâmetros dos modelos experimentais.

| Modelos | Índices | Forma da interface da ligação | ρ (%) | Detalhe da emenda da armadura | L (m) |
|---------|-------------|-------------------------------|------------|-------------------------------|-------|
| A | ICBD | - | - | - | - |
| B | RA-372-1.13 | Retangular | 1,13 | Anel | 372 |
| C | RS-240-1.13 | Retangular | 1,13 | Reto | 240 |
| D | RS-240-1.35 | Retangular | 1,35 | Reto | 240 |
| E | DS-240-1.13 | Diamante | 1,13 | Reto | 240 |

O modelo A é um tabuleiro de ponte de concreto pré-moldado monolítico usado como referência no programa experimental. Os modelos B, C e D foram projetados para investigar a influência do detalhe das emendas e da taxa de armadura longitudinal no comportamento à flexão da ligação com UHPC. O modelo E foi projetado com uma ligação em forma de diamante para verificar a influência da forma da interface. Os modelos foram designados da seguinte forma: “forma da ligação (R = retangular; D = Diamante); detalhamento da emenda da armadura (A = anel; S = Reto); comprimento emenda da armadura (372 mm ou 240 mm) – taxa de armadura (1.13% ou 1.35%)”. Por exemplo, o espécime RA-372-1.13 é referente ao tabuleiro com ligação de formato retangular e as armaduras longitudinais foram emendadas por transpasse com reforço da armadura de sobreposição em anel, conforme mostrado na Figura 2e. Enquanto isso, a taxa de armadura de flexão e o comprimento de emenda da armadura são 1,13 % e 332 mm, respectivamente.

Todas as lajes são retangulares com as mesmas dimensões em planta de 2012 mm \times 1000 mm e com 200 mm de espessura. Os espécimes com ligação em UHPC eram compostos por dois painéis em CPM com dimensões de 850 mm \times 1000 mm \times 200 mm, sendo a ligação com 412mm de comprimento. No estudo de Deng *et al.* (2023) foram realizados ensaios de flexão em quatro pontos para investigar o comportamento à flexão dos modelos conforme detalhado na Figura 3, onde o trecho central está sob momento fletor constante.

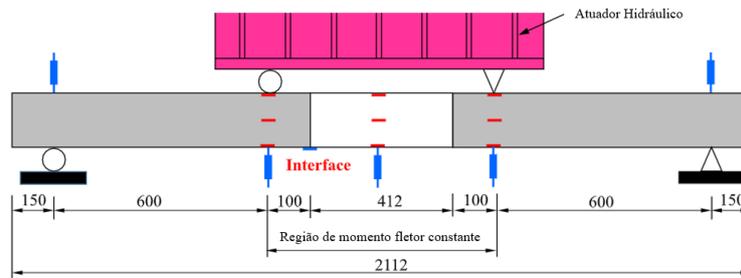


Figura 3 – Detalhe do ensaio de flexão em quatro pontos. Adaptado de Deng *et al.* (2023)

As duas cargas verticais são aplicadas próximas a ligação utilizando um atuador hidráulico mecânico. Desta forma, tanto a junta úmida UHPC quanto parte do painel de CPM estavam na região de flexão pura (sem força cortante) para investigar o comportamento interfacial sob flexão. As amostras foram submetidas a um carregamento monotônico até a ruína do elemento.

Propriedades dos Materiais

A Tabela 2 descreve as propriedades dos materiais utilizados nos ensaios experimentais. Para o painel em CPM, a resistência a compressão média foi de 52,2 MPa, a resistência a tração e o módulo de elasticidade do CPM não foram relatadas. Desse modo, foram utilizadas as expressões do *fib* (2013) do Model Code 2010 para estimar os valores de resistência a tração e o módulo de elasticidade do CPM. A resistência média à compressão do UHPC foi de 131,3 MPa enquanto a resistência a tração média foi de 5,7 MPa. Foram utilizados cerca de 2,5% de volume de fibras de aço retas na mistura do UHPC. Essas microfibras de aço revestidas com cobre tinham 13 mm de comprimento, diâmetro de 0,5 mm e resistência à tração de 2500 MPa. A armadura das lajes foi constituída por barras de aço HRB400 com diâmetro (ϕ_b) de 12 mm, que foram dispostas longitudinalmente e transversalmente. O cobrimento de concreto foi de 25 mm. Foi utilizado o espaçamento de 150 mm para as barras transversais ($\rho_t = 0,8\%$) e 100 mm para as barras longitudinais ($\rho_l = 1,18\%$), com exceção do modelo D que utilizou o espaçamento de 80 mm para as barras longitudinais para corrigir a taxa de armadura (Figura 2) ($\rho_l = 1,35\%$). A tensão de escoamento da armadura foi de 409,6 MPa.

Tabela 2 – Propriedades dos materiais descritos por Deng *et al.* (2023).

| Material | f_y (MPa) | f_u (MPa) | E_s (GPa) |
|----------|----------------|----------------|-------------|
| Aço | 409,6 | 552,9 | 205,8 |
| | f_{cm} (MPa) | f_{ct} (MPa) | E_c (GPa) |
| CPM | 52,2 | 4,2 | 37 |
| UHPC | 131,3 | 5,7 | 41,4 |

Simulação em elementos finitos

O software de elementos finitos ABAQUS/CAE foi utilizado para modelar os ensaios experimentais. A comparação com os resultados experimentais tem como objetivo demonstrar que o modelo numérico pode prever com precisão o comportamento mecânico dos modelos (Figura 4).

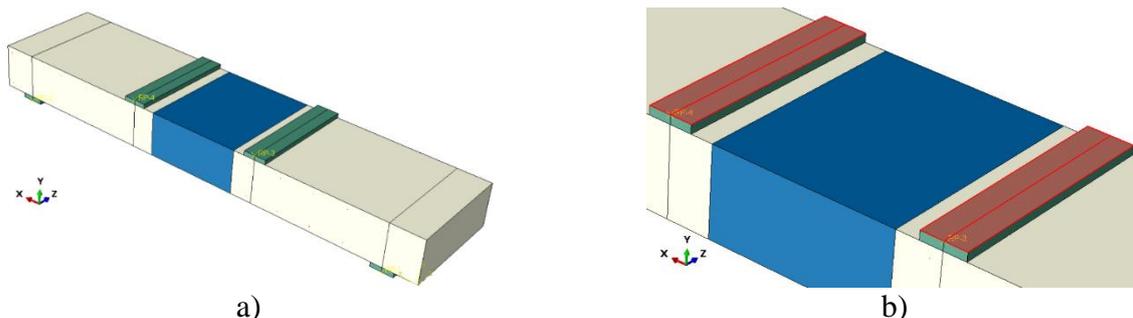


Figura 4 – Modelo numérico do ensaio de Deng *et al.* (2023). a) Modelo com simetria no eixo longitudinal da laje. b) Detalhe do carregamento por controle de deslocamento.

Em todas as análises, a carga foi aplicada com controle de deslocamento, a fim de avaliar o modo de falha à flexão.

Condições de contorno e interface

A carga vertical é aplicada uniformemente em ambos os lados do modelo através de duas placas de aço rígidas com largura de 100 mm e espessura de 20 mm. Foi considerado também placas rígidas de aço para os dois pontos apoios, com os três graus de liberdade de X, Y e Z restringidos no lado esquerdo. Além disso, os graus de liberdade X e Y da placa no lado direito foram restringidos para formar uma condição de contorno de suporte simples. De acordo com os ensaios, a propagação da fissura na interface é bastante lenta devido ao efeito da fibra de aço no UHPC, demonstrando o excelente desempenho de aderência entre UHPC e concreto normal. Portanto, foi assumido uma interação rígida (aderência perfeita) entre o CPM e o UHPC (sem deslizamento). A interface entre a estrutura de apoio e a superfície da placa de carregamento com a laje foi modelada assumindo contato rígido (permitindo a separação das superfícies) e coeficiente de atrito tangente de 0,4. Em relação do contato entre armadura e concreto, foi considerado nas simulações e uma aderência perfeita.

Malha e processamento

O concreto e as placas de apoio e carregamento foram modelados com elementos sólidos hexaédricos de 8 nós com integração reduzida (C3D8R), com o tamanho dos elementos finitos de 25 mm, permitindo ter 8 elementos ao longo da espessura da laje. Foi considerado também elementos sólidos de cunha de 6 nós (C3D6) para a região triangular do modelo E com ligação em forma de diamante. A armadura foi modelada com elementos treliçados de 2 nós (T3D2). A Figura 5 mostra o refinamento dos modelos em elementos finitos.

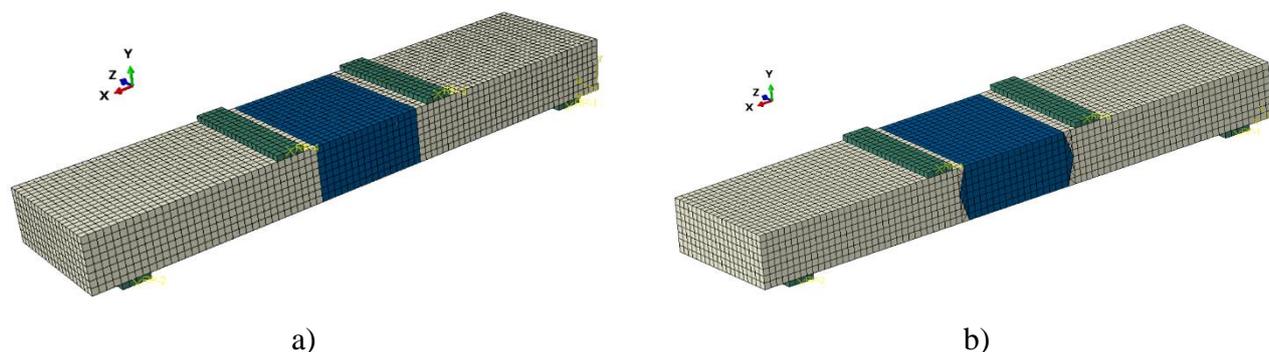


Figura 5 – Discretização da malha de elementos finitos: a) ligação em forma reta; b) ligação em forma de diamante.

Modelos constitutivos dos materiais e parâmetros de plasticidade

O modelo constitutivo adotado para o concreto no ABAQUS foi o *Concrete Damage Plasticity* (CDP), que corresponde ao modelo combinado de dano e plasticidade. O CDP objetiva representar o comportamento tensão-deformação não-linear do concreto, incluindo (i) elasticidade, (ii) enrijecimento (anterior ao pico) e (iii) comportamento pós-pico. A Tabela 3 apresenta os modelos de tensão-deformação propostos usados para descrever o comportamento do CPM e UHPC sob tração e compressão. Na Tabela 3 também são apresentados os modelos de evolução de dano utilizados nos modelos numéricos. Os parâmetros de entrada para o modelo CDP considerados neste artigo foram escolhidos com base no trabalho de Sousa *et al.* (2021). Para o aço foi considerado o modelo elastoplástico com encruamento após a tensão de escoamento.

Validação do modelo não-linear de elementos finitos

A Figura 6 apresenta uma comparação entre os resultados experimentais e numéricos em termos da curva força \times deslocamento. A partir da Figura 6, é possível observar que tanto os modelos numéricos e experimentais apresentam um trecho linear que representa o comportamento linear do concreto.

Tabela 3 – Modelos de comportamento de tensão-deformação e evolução para CPM e UHPC.

| Parâmetros | COM | UHPC |
|---------------------------------|-------------------------|--|
| Comportamento à tração | Hordijk (1992) | Fehling <i>et al.</i> (2014) |
| Comportamento à compressão | Carreira e Chu (1985) | Carreira e Chu (1985) modificado por Mansur <i>et al.</i> (1999) |
| Dano à tração | Yu <i>et al.</i> (2010) | Yu <i>et al.</i> (2010) |
| Dano à compressão | Yu <i>et al.</i> (2010) | Yu <i>et al.</i> (2010) |
| Ângulo de dilatação ψ | 30° | 54° |
| Excentricidade, ε | 0.1 | 0.1 |
| Razão σ_{b0}/σ_{c0} | 1.667 | 1.07 |
| Parâmetro K_c | 0.667 | 0.667 |
| Parâmetro de viscosidade, μ | 0.00001 | 0.00001 |

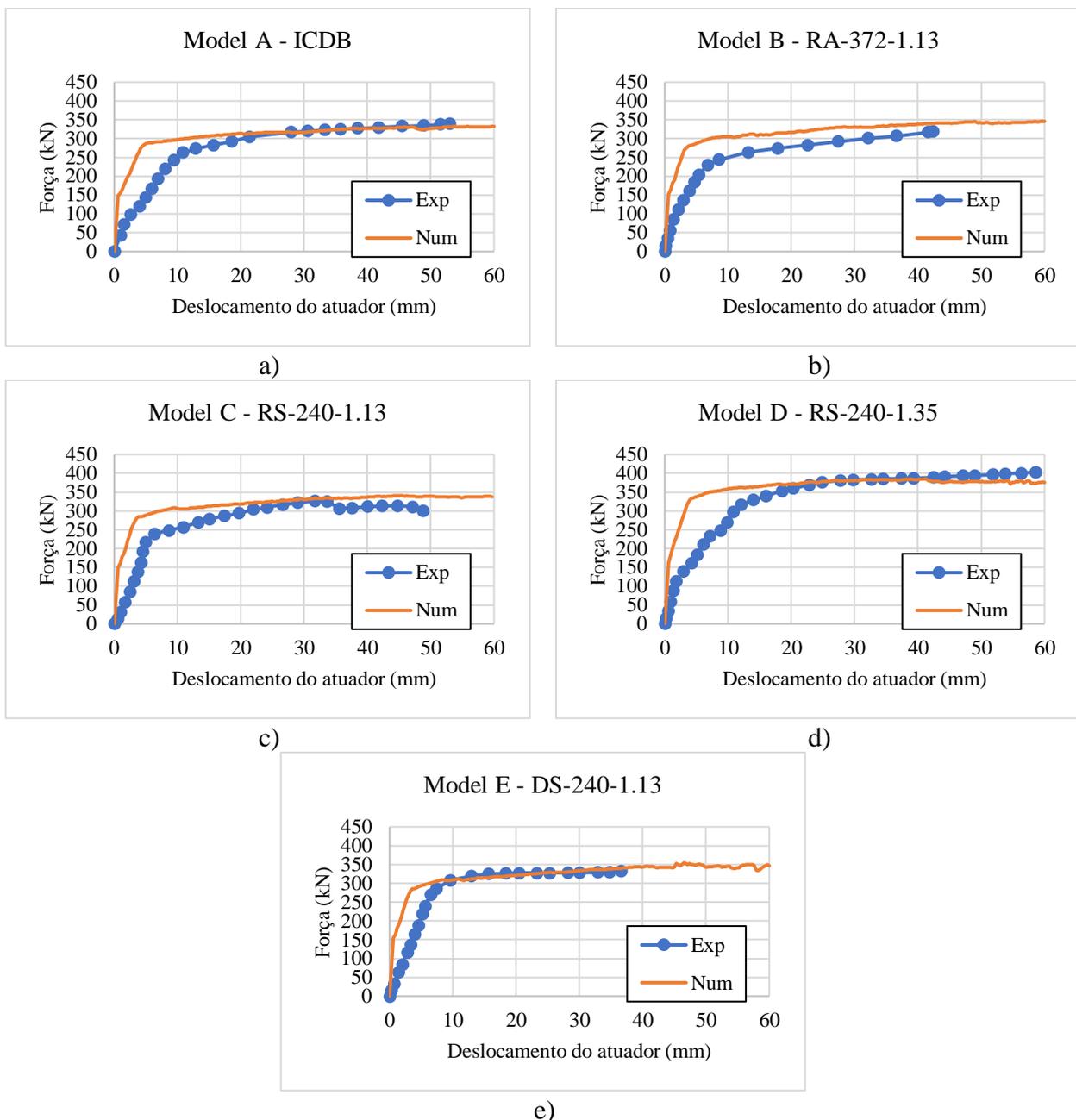


Figura 6 – Curva Força x Deslocamento do atuador dos modelos experimentais e numéricos.

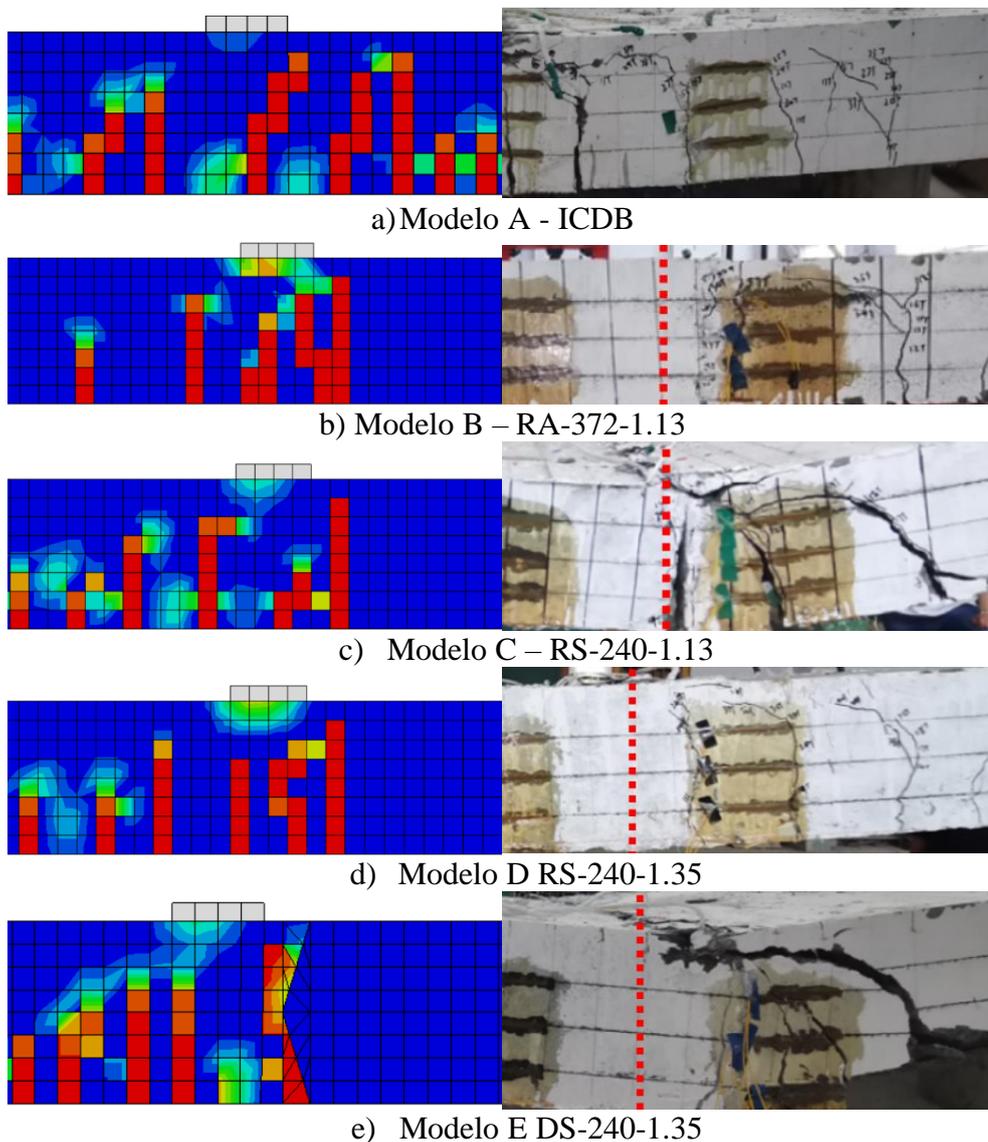


Figura 7 – Comparação do padrão de fissuração dos modelos experimentais de Deng *et al.* (2023) e numéricos.

Após fissuração do concreto, a curva força \times deslocamento muda de inclinação, mas permanece quase linear até atingir a plastificação da armadura. Em geral, as curvas apresentam um patamar de resistência após plastificação da armadura que configura uma ruptura dúctil da ligação. Pode-se observar que o modelo de elemento finito reproduziu bem a capacidade resistente à flexão, além de prever o modo de falha governante das lajes de acordo com o padrão de fissuração (Figura 7). A diferença de rigidez entre as curvas dos modelos numéricos e experimentais pode ser atribuída a diversos fatores, como o uso de materiais com menor rigidez na interface entre as lajes e os apoios para acomodação dos modelos, o que não foi considerado nos modelos numéricos pela ausência de informações sobre estes materiais.

Tabela 4 – Comparação da resistência máxima entre os resultados experimentais numéricos.

| Modelos | Índice | P_{exp} | P_{num} | P_{exp}/P_{num} |
|---------|-------------|-----------|-----------|-------------------|
| A | ICBD | 325.3 kN | 332.4 kN | 0.98 |
| B | RA-372-1.13 | 314.8 kN | 345.8 kN | 0.91 |
| C | RS-240-1.13 | 327.1 kN | 341.0 kN | 0.96 |
| D | RS-240-1.35 | 385.9 kN | 385.4 kN | 1.00 |
| E | DS-240-1.13 | 334.4 kN | 354.7 kN | 0.96 |
| Média | | | | 0.96 |
| COV. | | | | 3.61% |

Para melhor avaliação entre os resultados, na Tabela 4 apresenta a comparação da resistência máxima obtida experimentalmente com os modelos numéricos em elementos finitos. A partir dos resultados constata-se que os modelos numéricos em elementos finitos propostos previram bem a capacidade resistente a flexão das lajes estudadas por Deng *et al.* (2023). A relação entre as resistências experimentais e numéricas (P_{exp}/P_{num}) apresenta um valor médio de 0.96 e coeficiente de variação de 3.61%. Portanto, observa-se que os modelos numéricos apresentaram boa aproximação com relação aos resultados experimentais de resistência máxima.

Os resultados dos modelos numéricos demonstram que a utilização de UHPC na ligação de tabuleiros pré-moldados de pontes aumenta a capacidade resistente à flexão em todos os casos quando comparado ao tabuleiro de concreto monolítico. Têm-se que a variação do tipo de detalhe de emenda na ligação apresentou pouca influência no comportamento à flexão. Em contrapartida, forma geométrica da ligação e a taxa de armadura influenciam significativamente o comportamento à flexão. Para aumentar a investigação da influência de variáveis no projeto de ligação com UHPC, a partir do modelo calibrado, foi realizado um estudo paramétrico com novas configurações de projeto.

Estudo Paramétrico

Neste estudo, propõem-se investigar a influência de 4 parâmetros que podem nortear o projeto de tais ligações para pontes: (i) comprimento de emenda das barras retas, (ii) detalhamento da armadura na região de ligação, (iii) geometria da ligação (iv) taxa de armadura. Na prática, estes parâmetros são alguns dos mais importantes pois definem a quantidade de UHPC necessária ao preenchimento da ligação e a quantidade de armadura necessária para garantir adequado comportamento estrutural da ligação. O estudo paramétrico teve como foco a curva força-deslocamento, tendo como referência os modelos numéricos utilizados para validação com os resultados experimentais na seção anterior.

Comprimento de emenda por transpasse

O estudo de Haber e Graybeal (2018) sugere o comprimento de emenda (L) para barras retas de no mínimo 10db, nessa análise foram comparados três valores de L: 120 mm (10db), 240 mm (20db – referência) e 360 mm (30db).

Detalhe da armadura na região de ligação

Outro fator importante que afeta a capacidade resistente das ligações entre elementos pré-moldados é o detalhamento da armadura nas emendas. Neste trabalho foi investigado os tipos de detalhe de emenda das armaduras de forma em anel e com barras retas. Para Ma *et al.* (2012), a armadura na ligação com barras dobradas em formato de U (Figura 8), ou laço, aproveitam melhor a ancoragem mecânica, necessitando um comprimento de nicho menor que com as barras retas. Por este motivo, também foi modelado o detalhamento de armadura em forma de U.

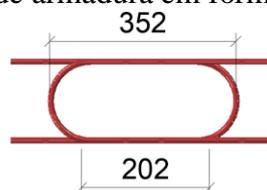


Figura 8 – Detalhamento da armadura em forma de U na região da ligação.

Geometria da ligação

De modo a abranger o entendimento da influência da geometria da ligação na capacidade resistente à flexão, além das amostras já modeladas de forma da ligação retangular e diamante, é proposto neste trabalho o modelo de laje com ligação em forma de T. As dimensões desta ligação são detalhadas na Figura 9, nesse caso optou-se por manter a largura da base igual ao modelo retangular de 412 mm e reduziu a largura do topo para 312 mm, desse modo a ligação terá uma largura maior na região tracionada e reduzindo a quantidade de UHPC utilizado na ligação.

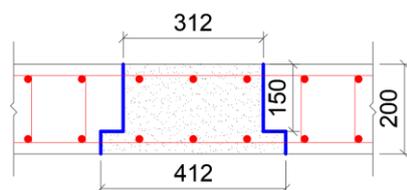


Figura 9 – Geometria da ligação em forma de T.

Taxa de armadura

Além das amostras já modeladas com espaçamento entre barras longitudinais de 100 mm ($\rho=1.13\%$) e 80 mm ($\rho=1.35\%$), foi modelado a laje com o espaçamento entre as barras longitudinais de 120 mm, resultando em uma taxa de armadura de $\rho=0.91\%$.

Resultados da variação dos parâmetros

A Figura 10 mostra a comparação das curvas força deslocamento das variações de detalhes de projeto de ligação proposta para a análise paramétrica na variação do parâmetro.

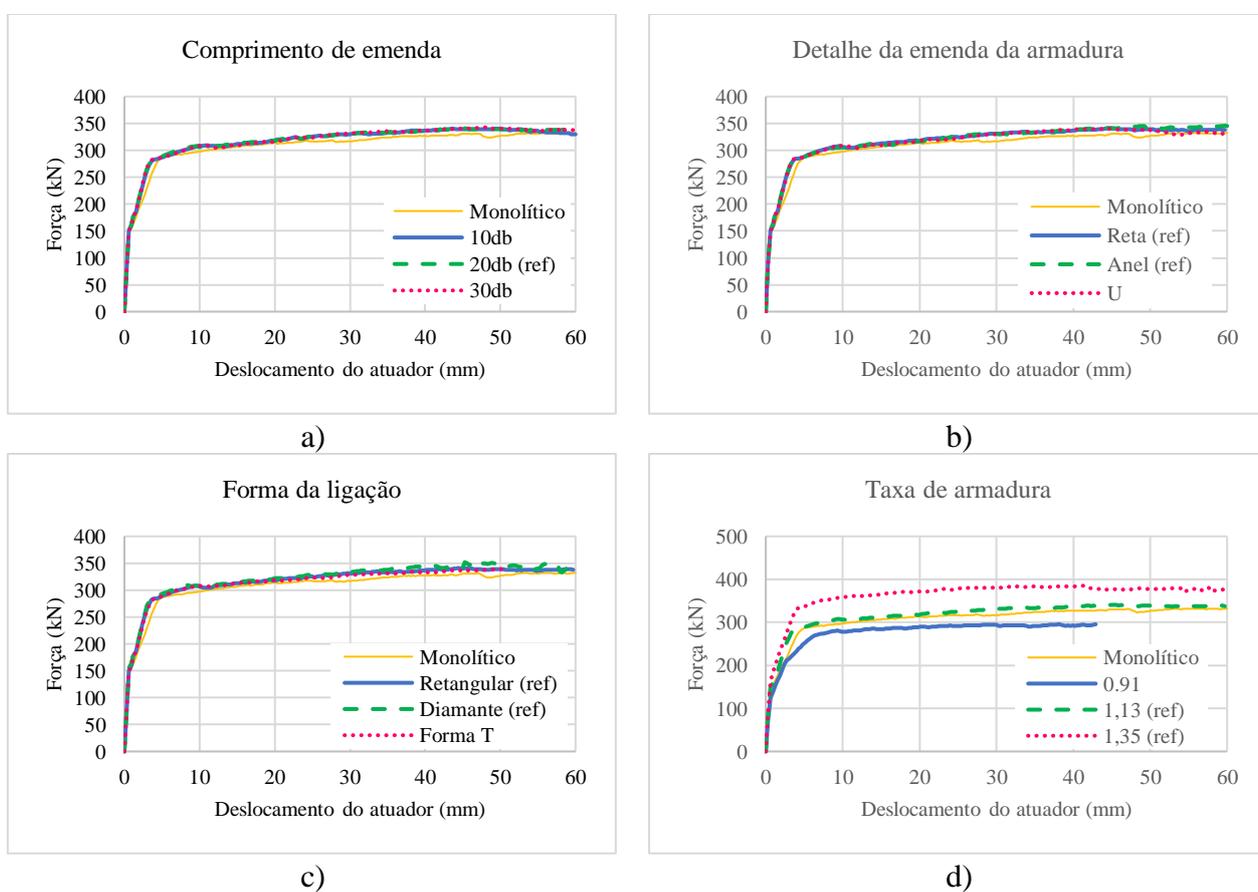


Figura 10 – Curvas Força x Deslocamento das variações de parâmetros.

Pode-se concluir da Figura 10a a que ao aumentar o comprimento de emenda da armadura ocorre pouca alteração no comportamento à flexão. As curvas força \times deslocamento dos três modelos coincidem basicamente entre si. Todas as armaduras longitudinais falharam por flexão e não ocorreu falha de ancoragem. Desse modo o comprimento de 10 db é adequado para garantir o efeito de aderência da armadura longitudinal na ligação com UHPC. Se modo similar, como mostra a Figura 10b, a variação no detalhamento da armadura resultou em pouca influência no comportamento da estrutura.

A Figura 10c demonstra que as cargas de escoamento são similares entre os modelos. Os modelos de referência, forma retangular e diamante, têm-se as cargas resistente máximas de 341.0 kN e 354.7 kN

respectivamente. Já o modelo em forma em T resultou no carregamento máximo de 339.7 kN, portanto mesmo reduzindo as dimensões da ligação em comparação a forma retangular, o modelo em forma T obteve o valor de carga resistente máxima aproximado. Em relação a taxa de armadura, conforme pode-se observar na Figura 10d foi o parâmetro de maior influência no comportamento à flexão. Portanto, aumentar a taxa de armadura pode ser considerado um método eficiente para melhorar o desempenho de flexão da ligação com UHPC.

Conclusões

Este artigo abordou estudos numéricos sobre o desempenho à flexão de ligações entre elementos pré-moldados de pontes utilizando UHPC a partir de diferentes configurações de projeto, e os resultados levaram às seguintes conclusões:

- Fase de calibração: a simulação numérica reproduziu o comportamento dos modelos experimentais e, portanto, pode prever seu desempenho à flexão. Pequenas divergências entre resultados experimentais e numéricos devem-se a limitações na simulação relacionadas a diferenças entre as propriedades reais e as estimadas no modelo numérico e simplificações adotadas.
- Estudo das variáveis de projeto de ligação: os resultados numéricos reforçaram que o uso do UHPC em ligações de lajes pré-moldadas de ponte melhorou a capacidade resistente à flexão em todos os casos quando comparado a laje utilizando apenas concreto normal.
- Análise paramétrica: os resultados referentes as variáveis de projeto indicaram que o aumento comprimento de emenda de transpasse da armadura pouco altera o comportamento à flexão, sendo o comprimento de 10db suficiente para garantir uma boa aderência entre a armadura e o UHPC. O tipo de detalhe de emenda da armadura em U apresentou resultados aproximados aos tipos ensaiados por Deng *et al.* (2023), portanto, como necessita de menor ancoragem de armadura que as barras reta pode ser uma alternativa interessante para projetos que desejam reduzir a largura do nicho. A variação da forma da geometria da ligação para forma em T, mesmo usando menor quantidade de UHPC, garante um desempenho equivalente a forma retangular. Dentre as formas de geometria da ligação a diamante apresentou maior capacidade resistente à flexão. A taxa de armadura foi o parâmetro de maior influência no comportamento à flexão, ao aumentar a taxa de armadura a capacidade resistente da laje são melhoradas.

Referências

- CARREIRA, D. J.; CHU, K. H. Stress-strain relationship for plain concrete in compression. **ACI Journal**, v. 82(6), n. 6, p. 797–804, 1985.
- CULMO, M. P. **Connection details for prefabricated bridge elements and systems**. No. FHWA-IF-09-010. United States. Federal Highway Administration. Office of Bridge Technology, 2009.
- DENG, E. F.; ZHANG, Z.; ZHANG, C. X.; TANG, Y.; WANG, W.; DU, Z. J.; GAO, J. P. Experimental study on flexural behavior of UHPC wet joint in prefabricated multi-girder bridge. **Engineering Structures**, v. 275, n. 115314, 2023.
- DI, J.; HAN, B.; QIN, F. Investigation of U-bar joints between precast bridge decks loaded in combined bending and shear. **Structures**, v. 27, p. 37-45, 2020.
- EL DEBS, M.K. **Pontes de Concreto: com ênfase na Aplicação de Elementos Pré-moldados**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2021.
- FEHLING, E. et al. **Ultra-high performance concrete UHPC**. Berlin: Ernst & Sohn, 2014.
- FIB –INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. **fib model code for concrete structures 2010 (MC-10)**. 1 ed. Berlin: Ernst & Sohn, 2013.
- GRAYBEAL B. A.; DE LA VARGA I; Haber Z. B. **Bond of Field-Cast Grouts to Precast Concrete Elements**. FHWA-HRT-16-081. United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development, 2017
- HABER, Z. B.; GRAYBEAL, B. A. Lap-spliced rebar connections with UHPC closures. **Journal of Bridge Engineering**, v. 23, n. 6, p. 04018028, 2018.
- HORDIJK, D. A. **Local approach to fatigue of concrete**. 1992. PhD Thesis, Delft University of Technology, 1992.

JIA, J.; REN, Z.; BAI, Y.; LI, J.; LI, B.; SUN, Y.; ZHANG, Z.; ZHANG, J. Tensile behavior of UHPC wet joints for precast bridge deck panels. *Engineering Structures*, v. 282, p. 115826, 2023.

MA, Z. J.; LEWIS, S.; CAO, Q.; HE, Z.; BURDETTE, E. G.; FRENCH, C. E. Transverse joint details with tight bend diameter U-bars for accelerated bridge construction. ***Journal of Structural Engineering***, v. 138, n. 6, p. 697-707, 2012.

WANG, X.; LIU, Y.; CHEN, A.; RUAN, X. Flexural capacity assessment of precast deck joints based on deep forest. ***Structures***, v. 41, p. 270-286, 2022.

YU, T. et al. Finite element modeling of confined concrete-II: Plastic-damage model. ***Engineering Structures***, v. 32, n. 3, p. 680–691, 2010.