



Análise pelo Método dos Elementos Finitos de Tabuleiro de Ponte Segmentada composta por Aduelas Pré-Moldadas de Concreto com Juntas

Rafaella Possamai Spessatto¹, Américo Campos Filho², Bruna Manica Lazzari³, Paula Manica Lazzari⁴

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / rafaellaspezzatto@outlook.com

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / americo.campos.filho@gmail.com

³ Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul / Escola Politécnica / bruna.ml@gmail.com

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / p.manica.lazzari@gmail.com

Resumo

Existe demanda de pesquisa para aperfeiçoar as ferramentas de projeto e análise estrutural de pontes segmentadas, com foco no funcionamento das juntas. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi realizar uma modelagem numérica tridimensional, via Método dos Elementos Finitos, para simular o comportamento de juntas de concreto em tabuleiros de pontes segmentadas. A estrutura estudada é a Nova Ponte do Guaíba. Para a modelagem, utilizou-se o *software* ANSYS, versão 21.2. Verificou-se o comportamento das tensões atuantes no concreto e nas armaduras, além da abertura das juntas. Ao final das análises, percebeu-se que os modelos desenvolvidos são capazes de prever o comportamento desta estrutura, porém, devido às simplificações adotadas para as condições de contorno e para as fases construtivas, a estrutura apresentou seu comportamento alterado. Assim, é fundamental a consideração da construção do modelo completo para uma determinação mais realista das aberturas de juntas e da distribuição das tensões nos elementos

Palavras-chave

Pontes Segmentadas; Abertura de juntas; ANSYS; Nova Ponte do Guaíba

Introdução

Nos sistemas com aduelas pré-moldadas, conforme mencionado em Lima (2011), existe a necessidade de utilização de juntas, que representam um elemento enfraquecedor e exigem uma verificação a respeito da transmissão de esforços cisalhantes nessas regiões. Neste contexto, este estudo tem como objetivo apresentar a possibilidade de simular numericamente, através de um modelo tridimensional de elementos finitos, o comportamento real de uma ponte segmentada, executada pelo método dos balanços sucessivos, com aduelas pré-moldadas justapostas e unidas por juntas de concreto e protensão interna e externa. Dessa forma, foi possível estimar as tensões e os deslocamentos na estrutura, bem como os valores de abertura das juntas. A estrutura estudada foi a Nova Ponte do Guaíba, concluída no ano de 2020 (figura 1).



Figura 1 – Nova Ponte do Guaíba, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil.



Para a simulação, foi utilizada uma versão customizada do *software* ANSYS, versão 21.2, como ferramenta para a modelagem. A não linearidade dos materiais e do comportamento das juntas torna a análise complexa e, portanto, foi preciso implementar novos modelos constitutivos para os materiais concreto e aço. Para isso, as aduelas, as lajes, as mãos-francesas e o concreto moldado *in loco* foram discretizados em elementos sólidos, as juntas foram modeladas como elementos de contato, as armaduras passivas foram representadas de forma distribuída, a protensão interna foi introduzida com elementos de reforço incorporado e a protensão externa foi representada por elementos de barra.

A introdução dos modelos numéricos no ANSYS foi realizada através de uma ferramenta de customização do próprio programa, UPF (*User Programmable Features*), em que novas sub-rotinas em linguagem FORTRAN77 foram adicionadas ao programa principal. Utilizou-se a sub-rotina USERMAT para simular os modelos reológicos dos materiais customizados, permitindo representar o comportamento elastoplástico com fissuração do concreto. Utilizaram-se os modelos constitutivos implementados por Lazzari *et al.* (2017), Lazzari *et al.* (2019), Hoffman *et al.* (2022) e Machado *et al.* (2022).

Detalhes do Projeto

A ponte estudada é a Nova Ponte do Guaíba que, juntamente com seus acessos, foi executada na BR-116/290, em Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul. O empreendimento tem uma extensão de 2,9 quilômetros sobre o Lago Guaíba, com um total de 13,6 quilômetros de obra, com seus vãos e altura definidos de maneira a respeitar os gabaritos de navegação e aéreo. O projeto refere-se a uma ponte reta, composta de cinco vãos, sendo três vãos centrais com 140 metros de comprimento e dois vãos laterais de 90 metros de comprimento. Na figura 2, visualiza-se o sistema estrutural adotado.

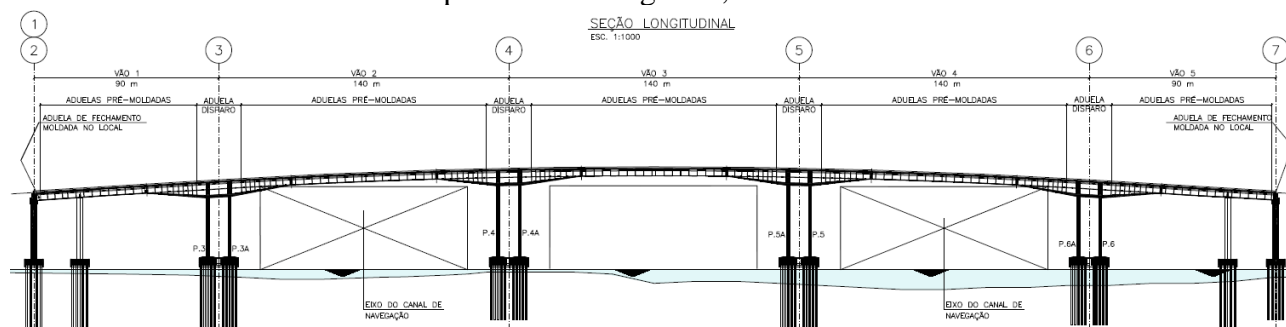


Figura 1 – Elevação longitudinal da Nova Ponte do Guaíba.

No trecho sobre os canais de navegação, a ponte foi projetada pelo método dos balanços sucessivos, com a superestrutura concebida em seção caixão e unicelular, através do emprego de aduelas. Além disso, devido à grande largura da ponte, foram utilizados pares de mãos-francesas com lajes laterais nelas apoiadas. A respeito dos componentes estruturais, a aduela de disparo e a aduela de fechamento dos vãos são moldadas no local e o restante das aduelas, mãos-francesas e lajes são pré-moldadas. Em Spessatto (2022) é apresentado o detalhamento sobre a concepção do projeto da Nova Ponte do Guaíba.

A figura 3 mostra a representação esquemática do vão 3, compreendido entre os pilares 4 e 5, com a disposição e a identificação de cada aduela que compõe o tabuleiro deste vão. Este vão é composto por 37 aduelas, construídas através do método dos balanços sucessivos, e duas aduelas de disparo, moldadas *in loco* sobre os pilares de arranque.

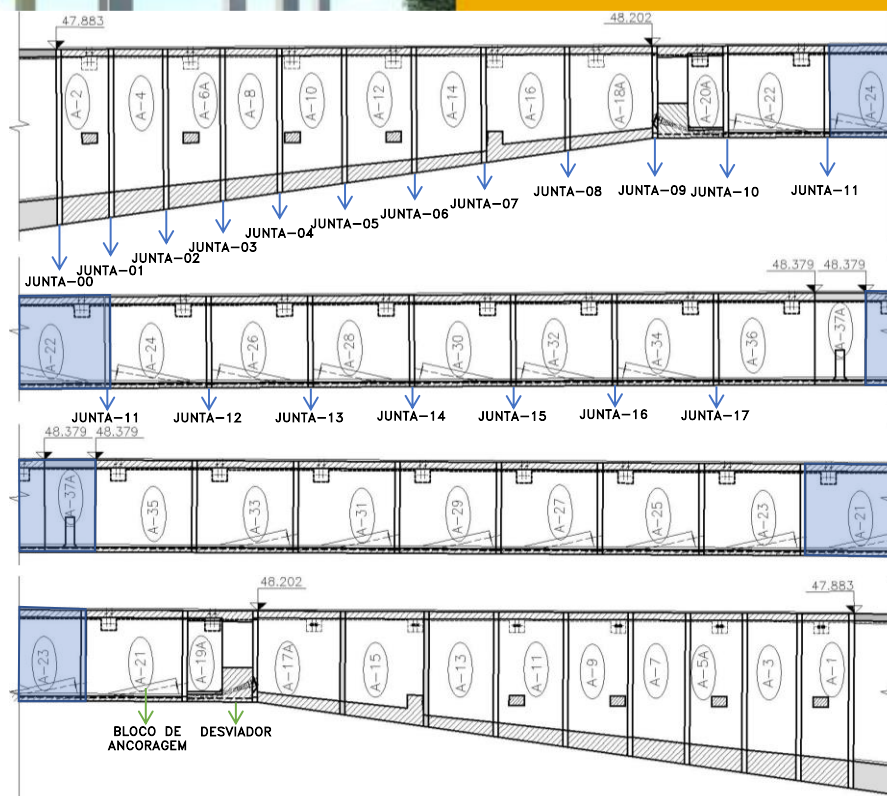


Figura 3 – Perfil longitudinal do tabuleiro da ponte com as aduelas que compõem o vão 3.

Metodologia

Iniciou-se com o estudo sobre a Ponte do Guaíba, através da leitura e interpretação dos projetos, permitindo um entendimento sobre os processos executivos da obra e o método de montagem utilizado na construção. A partir disso, estudou-se o *software* ANSYS, versão 21.2. Nele, iniciou-se avaliando sobre a geração de volumes e criação de malhas, permitindo o início da discretização geométrica da estrutura. Para a entrada de dados do programa ANSYS, utilizou-se a linguagem APDL (*ANSYS Parametric Design Language*).

Na etapa seguinte, inicialmente, modelou-se a parte referente às armaduras passivas e aos cabos de protensão da ponte. Nesta fase, implementou-se um novo modelo para a representação das armaduras passivas, através da utilização de uma malha de elementos finitos sólidos (SOLID95) e utilização do modelo constitutivo ANISO, que permite adotar as propriedades do aço e diferentes taxas de armaduras nas três direções principais. Para a representação das armaduras ativas, adotou-se uma malha de vazios, composta por elementos finitos sólidos (SOLID186), modelados com propriedades nulas, sobreposta à malha de concreto, que permitiu a passagem contínua dos cabos de protensão interna, sem que eles tenham descontinuidade com a abertura das juntas. Além disto, utilizou-se o comando INISTATE para representar as forças de protensão aplicadas nos cabos. Com a modelagem finalizada, foram utilizados elementos de contato e modelos de aderência, disponibilizados pelo ANSYS, para representar as juntas de concreto entre os segmentos de aduelas e, finalmente, analisar o seu comportamento.

Por fim, determinaram-se os carregamentos atuantes na estrutura, aplicando-os em três etapas distintas. Na primeira etapa, consideraram-se as forças de protensão e o peso próprio da estrutura; na segunda etapa foram aplicadas as cargas permanentes; e por fim, aplicaram-se as cargas móveis. Passou-se para a solução do problema e utilizou-se um modelo elastoplástico com fissuração para simular o comportamento do concreto, através do uso da sub-rotina USERMAT. Dessa forma, foi possível analisar os resultados obtidos, e a possibilidade ou não da abertura das juntas.



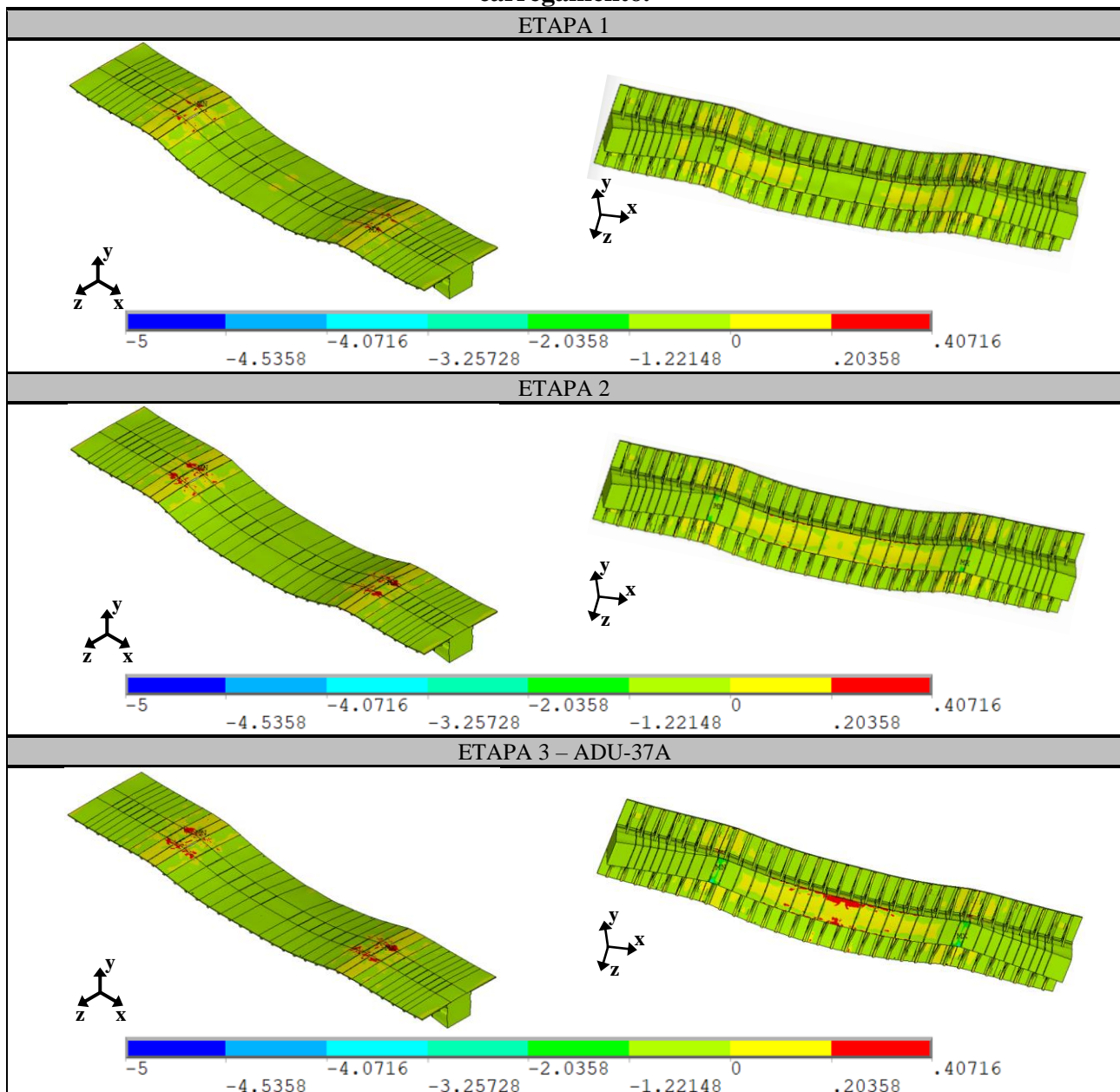
Resultados

Foi realizada uma análise estática, durante todas as etapas, com o intuito de obter as tensões e deslocamentos nos elementos de concreto e de aço, bem como a eventual abertura das juntas, considerando a estrutura já em serviço. Para esta análise, foi considerada uma perda de 10% nos cabos de protensão. Apresentam-se, a seguir, os resultados obtidos para as análises da estrutura da Nova Ponte do Guaíba.

Tensões No Concreto

A evolução das tensões normais, σ_x , na direção longitudinal, atuantes nos elementos de concreto com fissuração (aduelas, lajes e mãos-francesas), através do modelo em elementos finitos, são apresentadas no quadro 1. Os valores encontrados são indicados na escala de coloração em kN/cm².

Quadro 1 – Tensões normais σ_x (kN/cm²) nos elementos de concreto do tabuleiro da ponte, para o modelo com o veículo tipo posicionado em cima da Aduela-37A, nas três etapas de carregamento.





Observando os resultados do quadro 1, percebe-se que as tensões máximas de tração e compressão se encontram na região da Aduela-20A, conforme indicado na figura 4. Os cabos da protensão interna inferior iniciam na Aduela-16A e se estendem até o meio do vão. Entre a Aduela-16A e a Aduela-20A, as alturas das aduelas sofrem redução, permanecendo constantes a partir desta. Neste local, existe a presença de um desviador com a ancoragem de um cabo de protensão externa. Portanto, ela se torna a seção mais crítica.

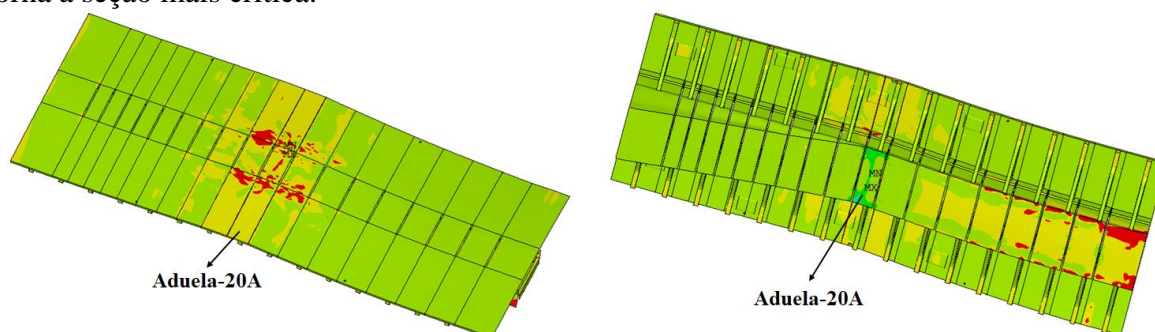


Figura 4 – Indicação da localização da Aduela-20A no tabuleiro de concreto.

Ainda, verifica-se que a seção mais solicitada de todo o tabuleiro se encontra na Aduela-20A. É nela que ocorrem as maiores tensões de compressão nas fibras inferiores e, as maiores tensões de tração nas fibras superiores. Este comportamento ocorreu, pois é nesta seção que acontece a ancoragem de um novo cabo da protensão externa no desviador e dos cabos da protensão interna inferior junto à laje inferior das aduelas. O efeito da protensão dos cabos, na região inferior da seção, gera um acúmulo de tensões de compressão na parte inferior da Aduela-20A, resultando em tração na parte superior desta mesma seção. Consequentemente, as juntas, nestas seções, abrem na região superior.

Tensões Nas Armaduras

A seguir, apresentam-se os valores das tensões normais atuantes nos cabos de protensão: interna superior, interna inferior e externa. Eles entram em funcionamento na Etapa 1 de carregamento, instante em que todas as forças de protensão são aplicadas, em conjunto, na estrutura da ponte.

Com relação aos resultados apresentados, escolheu-se um trecho relevante do tabuleiro, entre a Aduela-16A e a Aduela-28, para apresentar as soluções pontuais para a análise. Na figura 5, é visualizado o trecho adotado e como os cabos da protensão interna superior e inferior estão modelados.

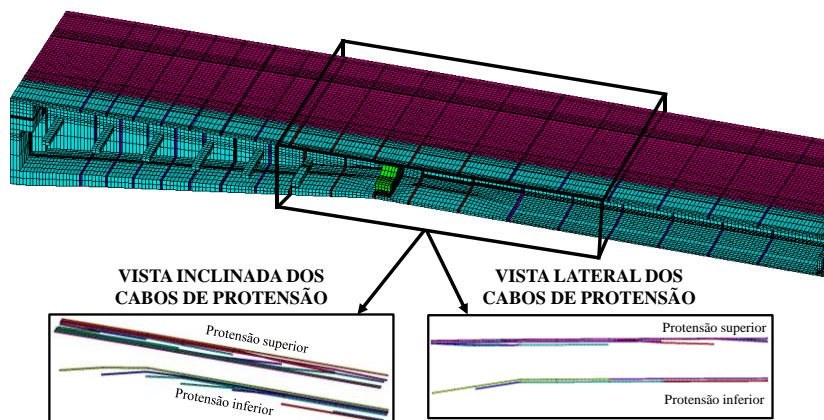
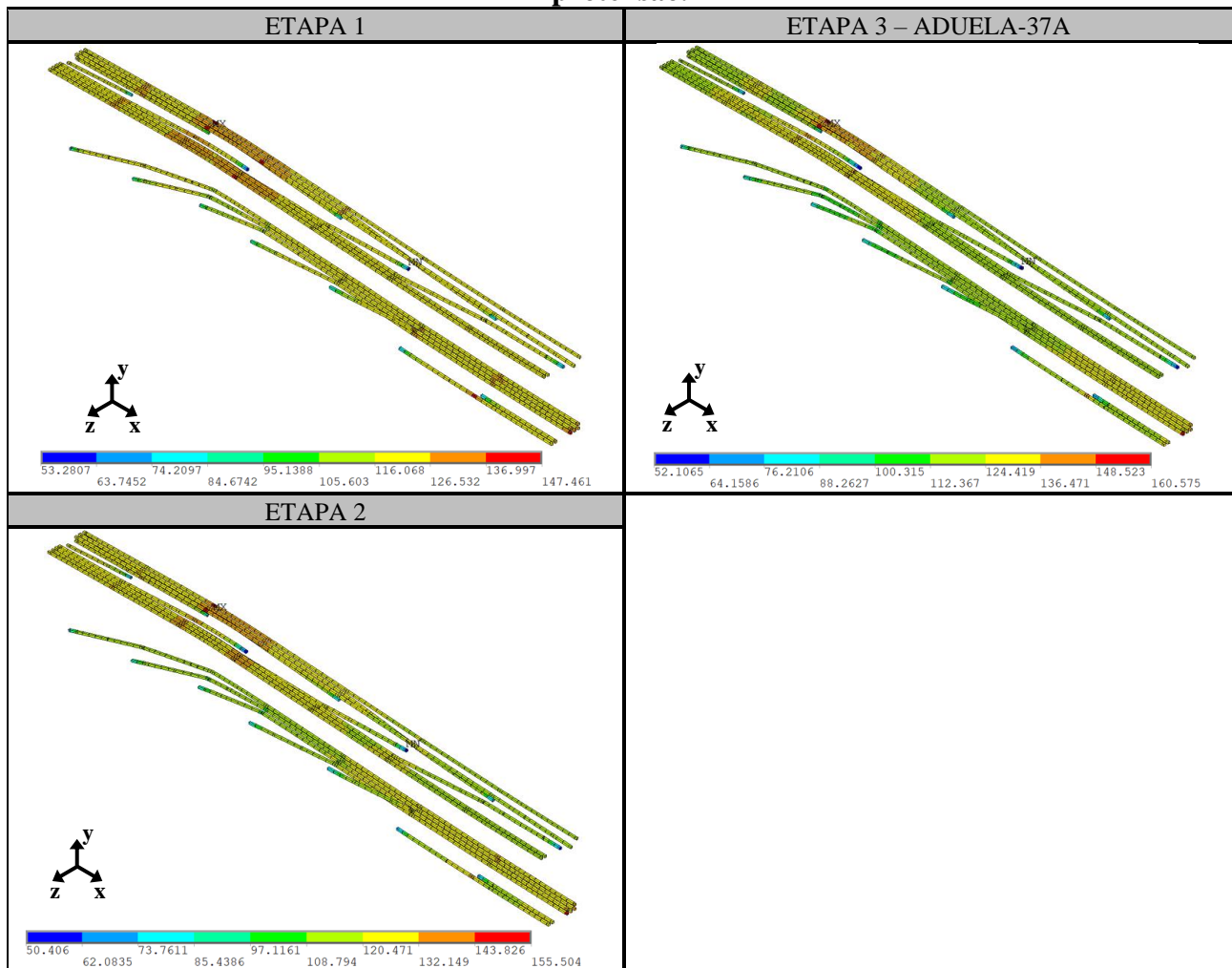


Figura 5 – Representação de 1/4 do vão do tabuleiro, com metade das aduelas e das lajes, indicando o trecho escolhido para apresentar os resultados de tensões nos cabos de protensão.

No quadro 2 são apresentados os resultados para as etapas 1, 2 e 3 de carregamento da estrutura.



Quadro 2 – Resultados da tensão normal (kN/cm^2) nos cabos de protensão interna superior e inferior, para as etapas 1, 2 e 3 de carregamento e considerando o caso com 10% de perdas de protensão.



Com as cargas atuantes na estrutura, nos locais onde o tabuleiro tende a se afastar, ou seja, nas regiões de contato das juntas de concreto, ocorre um aumento na tensão dos cabos de protensão para estes pontos, na busca de impedir a abertura das juntas. Portanto, a ação dos esforços de tração atuantes nos cabos de protensão interna apresentam o pico do seu valor ocorrendo nestas regiões, conforme se observa no quadro 2, que ocorre devido à abertura das juntas.

Abertura Das Juntas

A evolução das aberturas das juntas de concreto que compõem o tabuleiro da ponte, modeladas através dos elementos de contato, são apresentadas neste item. Os valores encontrados para a abertura das juntas durante a simulação são mostrados através das etapas de carregamento e indicados na escala de coloração com os valores em centímetros. Foram escolhidas 8 juntas, que apresentaram os resultados mais relevantes para a situação de abertura delas. A figura 6 indica quais as juntas que foram analisadas, com relação à metade do vão da ponte, o Eixo 4.

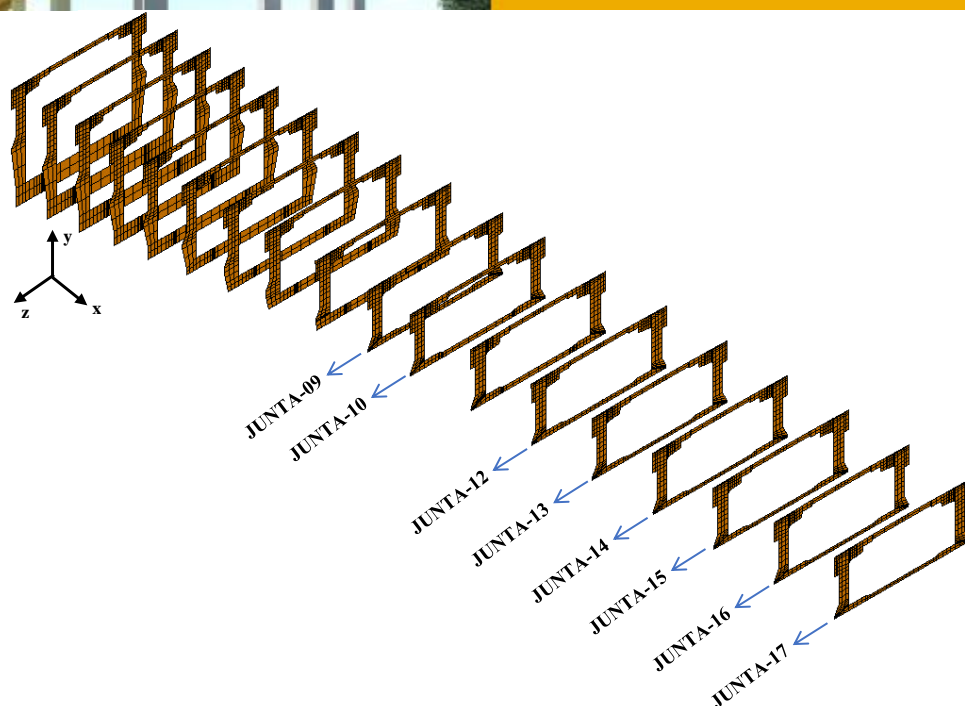
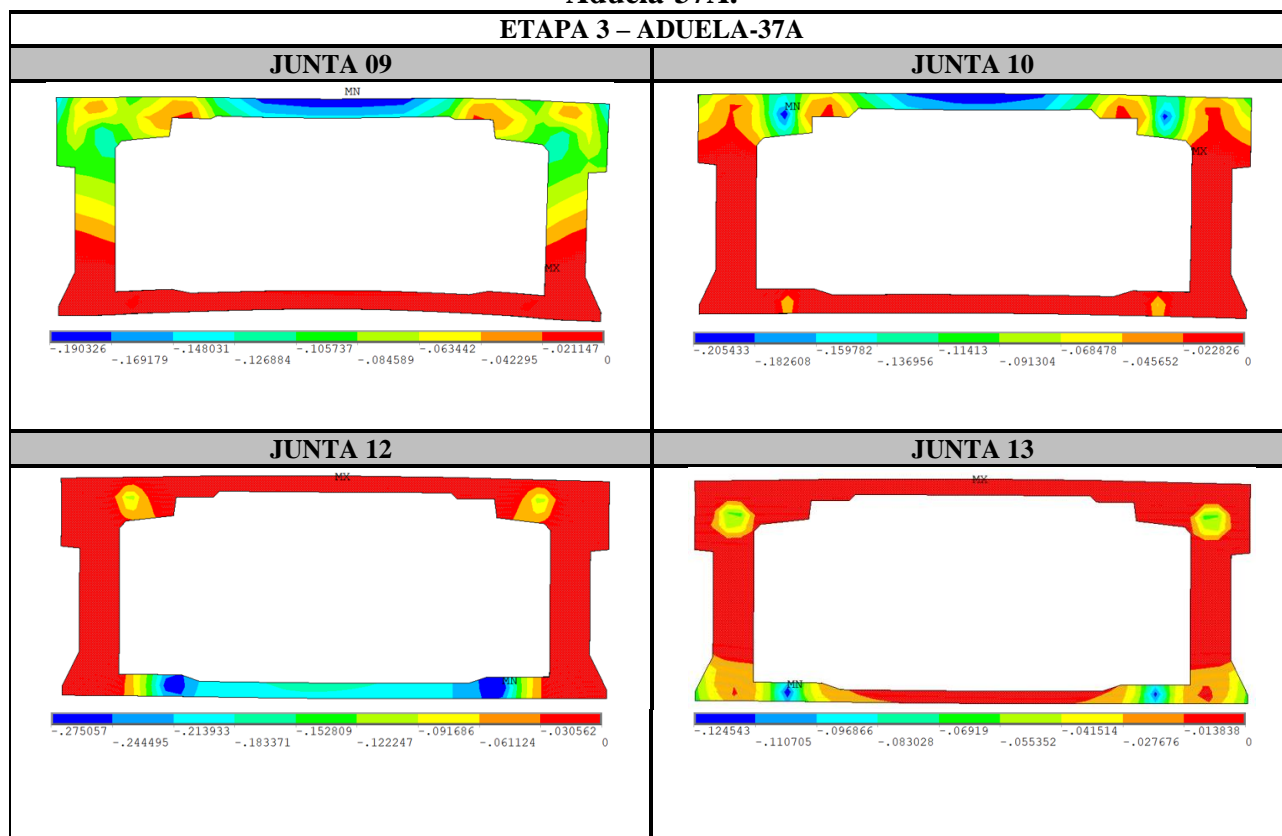
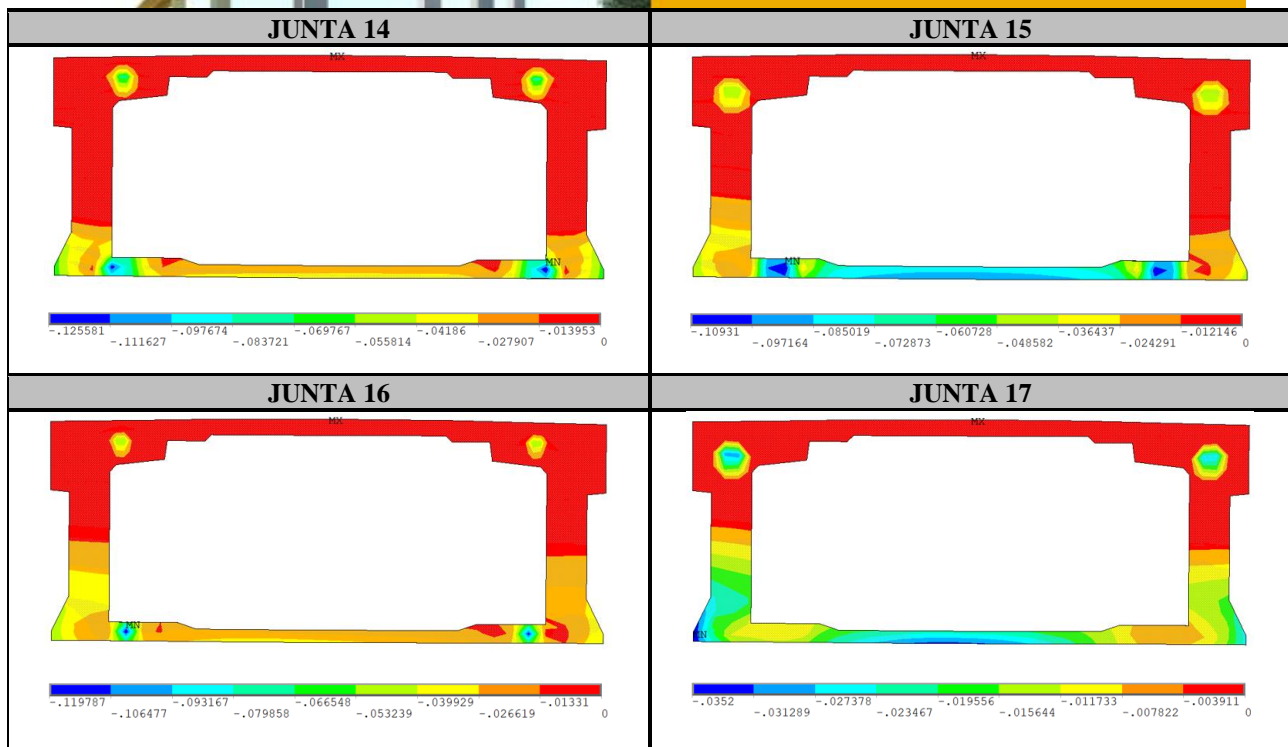


Figura 6 – Discretização das juntas de concreto do Eixo 4 do tabuleiro e definição das juntas escolhidas para a análise dos resultados.

Para apresentar os resultados de abertura de juntas, montou-se um comparativo, conforme quadro 3, entre as juntas Junta-09, Junta-10 e Junta-12 a Junta-17. Nele, são apresentados os resultados da abertura de juntas para a etapa 3 de carregamento.

Quadro 3 – Resultado da abertura (em centímetros) das juntas Junta-09, Junta-10 e Junta-12 a Junta-17 para a etapa 3 de carregamento e com o veículo tipo posicionado em cima da Aduela-37A.





Examinaram-se as combinações de carga que resultassem nas situações mais críticas. Portanto, com relação ao comportamento da abertura das juntas, nas juntas 9 e 10 foram observadas as maiores aberturas na face superior do tabuleiro. Nas juntas 12 a 17 foram observadas as maiores aberturas na superfície inferior do tabuleiro. O motivo para ocorrer uma abertura elevada na junta 12 é explicado, pois nesta região, apesar das aduelas possuírem altura constante, existe uma mudança de espessura da laje inferior da Aduela-24 para a Aduela-26.

Na situação estudada, como o tabuleiro é considerado engastado nas duas extremidades, observa-se que as juntas mais próximas aos apoios se encontram fechadas ou com baixas aberturas. Além disso, a localização do veículo tipo influencia na quantidade de juntas abertas e no tamanho de sua abertura. Assim, as juntas que se encontram próximas à posição do veículo tipo apresentam maiores valores de abertura.

Como não existe armadura passiva nas juntas de concreto, as fissuras que surgem se apresentam concentradas nestas regiões. As juntas abrem, inicialmente, na região da ancoragem dos cabos de protensão. Observou-se uma maior abertura das juntas próximo aos cabos internos inferiores. Acredita-se que isto ocorreu devido à não modelagem dos blocos de ancoragem das aduelas, onde estes cabos são ancorados, o que causou algumas concentrações de tensões. E conforme se aumenta o valor das cargas aplicadas à estrutura, o efeito da protensão vai se reduzindo e regiões, inicialmente comprimidas, passam a ser tracionadas. Surge, então, a possibilidade de ocorrência de abertura das juntas.

As figuras 7 e 8 apresentam as tensões de tração do tabuleiro, para uma vista inferior e para uma vista superior, respectivamente, além de exibirem o aumento da abertura da junta selecionada devido ao aumento das cargas. Elas estão com um fator de amplificação de 150 vezes para melhor visualização da abertura das juntas. Para a escala das tensões, foi escolhido apresentar somente os resultados das tensões de tração. Desta forma, o que está em cinza nas figuras representa o concreto comprimido.

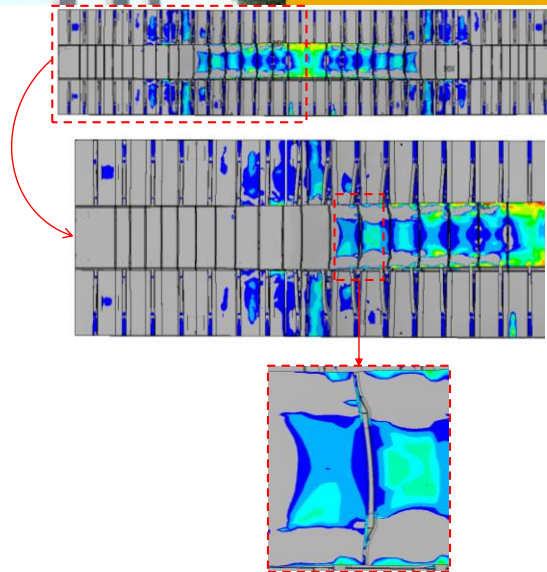


Figura 7 – Tensões de tração (em kN/cm²) no tabuleiro da ponte, com foco na abertura da Junta-09, considerando a etapa 3 de carregamento e o veículo tipo posicionado em cima da Aduela-37A.

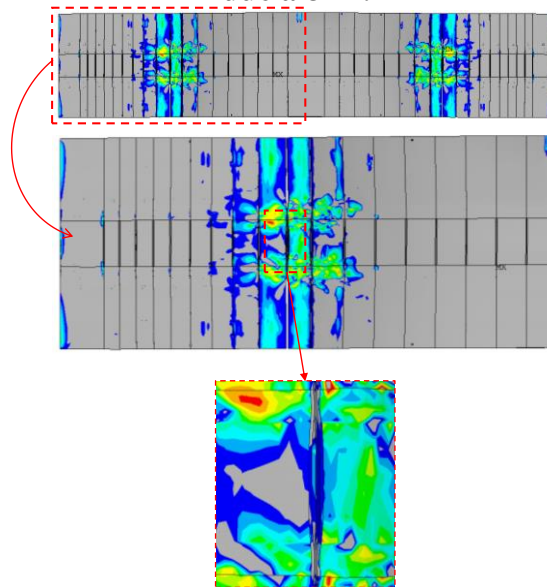


Figura 8 – Tensões de tração (em kN/cm²) no tabuleiro da ponte, com foco na abertura da Junta-12, considerando a etapa 3 de carregamento e o veículo tipo posicionado em cima da Aduela-37A.

Na verificação das tensões ao longo da superfície do tabuleiro, percebe-se que existe uma concentração de tensões na região de ancoragem dos cabos de protensão interna e externa. Com base na observação dos resultados, conclui-se que, quando as fibras inferiores e superiores do tabuleiro apresentam tensão normal de tração, excedendo a resistência à tração do concreto das juntas, há o surgimento de um afastamento entre os elementos de contato, caracterizando a abertura das juntas. Assim, a causa do aumento da abertura das juntas é o descolamento entre as suas superfícies de contato ao longo da altura do tabuleiro. Quando a junta se abre, a tensão na sua volta é aliviada. Dessa maneira, nos locais onde a junta abriu, os valores para as tensões de tração são baixos.

Conclusões

O objetivo deste trabalho foi apresentar um modelo computacional, através do Método dos Elementos Finitos, para simular o comportamento do tabuleiro de uma ponte segmentada, executada pelo método



dos balanços sucessivos, com aduelas justapostas pré-moldadas e aderidas com concreto e protensão interna. Com este estudo, foi possível gerar uma contribuição para os métodos de modelagem em elementos finitos, através da implementação de elementos de contato nas interfaces das juntas, da utilização de elementos finitos sólidos tridimensionais para representar o comportamento de armaduras passivas distribuídas e da utilização de uma malha de vazios para a passagem dos cabos de protensão sem que os mesmos apresentassem descontinuidade.

Portanto, com base nos resultados apresentados, conclui-se que o modelo proposto é adequado para representar o comportamento estrutural da ponte. Para os diferentes carregamentos aplicados, o modelo é capaz de fornecer os deslocamentos e tensões nos elementos de aço e concreto, considerando as não linearidades físicas da estrutura. Assim, evidencia-se que os modelos adotados conseguiram reproduzir de forma satisfatória o comportamento real da ponte.

Além disso, foi dado um enfoque especial no estudo do comportamento das juntas de concreto, nos locais da interface concreto-concreto. Observou-se que quando a tensão nos elementos de contato atinge a resistência à tração do concreto, eles iniciam o processo de descolamento, abrindo as juntas. Após isto, a tensão de tração, nesta região, começa a diminuir, até o seu desaparecimento com a abertura total das juntas. Também é possível observar que, ao longo dos cabos, ocorre uma variação nas tensões, conforme o carregamento atuante e a proximidade das juntas. As seções dos cabos, próximas às juntas, apresentam maiores tensões de tração, que diminuem em direção ao centro das aduelas. Isto ocorre, pois os cabos de protensão tendem a impedir que as juntas se abram, ocasionando o aumento da tensão de tração do cabo nestas regiões.

Analisou-se, também, que no modelo em elementos finitos, as máximas tensões de compressão no tabuleiro de concreto são predominantes na região entre a aduela de disparo e a Aduela-20A, ou seja, nas regiões mais próximas ao engaste. Além disto, nesta região da Aduela-20A, de início de ancoragem dos cabos da protensão interna inferior, existe uma inversão do sinal de momento. Os cabos de protensão inferiores, nesta região, buscam reduzir as tensões de tração na face inferior do tabuleiro no sentido do meio do vão, sendo observado que, para a etapa 1, no meio do vão, chegou-se a uma condição de compressão na fibra inferior.

Referências

- HOFFMAN, I. S.; LAZZARI, B. M.; CAMPOS FILHO, A.; LAZZARI, P. M.; PACHECO, A. R. Finite element numerical simulation of a cable-stayed bridge construction through the progressive cantilever method. *Structural Concrete*, v. 23, p. 632-651, 2022.
- LAZZARI, P. M.; CAMPOS FILHO, A.; LAZZARI, B. M.; PACHECO, A. R. Structural analysis of a prestressed segmented girder using contact elements in ANSYS. *Computers and Concrete*, v. 20, p. 319-327, 2017.
- LAZZARI, P. M.; CAMPOS FILHO, A.; LAZZARI, B. M.; PACHECO, A. R.; GOMES, R. Numerical simulation of the constructive steps of a cable-stayed bridge using ANSYS. *Structural Engineering and Mechanics*, v. 69, p. 269-281, 2019.
- LIMA, V. S. Projeto de superestruturas de pontes em concreto protendido aplicando a técnica de balanços progressivos. 135 f. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.
- MACHADO, G. G. Simulação numérica pelo método dos elementos finitos das etapas construtivas de uma ponte segmentada pré-moldada com protensão. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.
- MOURA, M. W. Avaliação da confiabilidade de longarinas de concreto protendido de pontes rodoviárias em relação ao estado limite último de flexão. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- SPESSATTO, R. P. Análise pelo método dos elementos finitos do comportamento das juntas de tabuleiro de ponte composto por aduelas pré-moldadas de concreto. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.