



Simulação Numérica pelo Método dos Elementos Finitos das Etapas Construtivas de uma Ponte Segmentada Pré-moldada com Protensão

Gabriela G. Machado¹, Américo Campos Filho², Paula M. Lazzari³, Bruna M. Lazzari⁴

¹ UFRGS / PPGEC / gabriela_grutzmacher@outlook.com.br

² UFRGS / PPGEC / americo@ufrgs.br

³ UFRGS / PPGEC / p.manica.lazzari@gmail.com

⁴ UFRGS / PPGEC / bruna.ml@gmail.com

Resumo

O projeto de pontes segmentadas, que utilizam elementos de concreto pré-moldado com protensão e a técnica de construção do tabuleiro por balanços sucessivos, envolve uma análise de alta complexidade. O presente trabalho apresenta uma análise numérica, a partir de um modelo tridimensional em elementos finitos, que simula as etapas construtivas de um trecho do tabuleiro da Nova Ponte do Guaíba, localizada na cidade de Porto Alegre, Brasil, utilizando o software ANSYS, versão 21.2. Os materiais, concreto e aço, foram considerados com um comportamento viscoelástico. Para o concreto, utilizou-se um modelo de Kelvin generalizado, com o auxílio da ferramenta de customização UPF (User Programmable Features), onde foram adicionadas sub-rotinas, ao programa principal, em linguagem FORTRAN. Para o aço utilizado nas armaduras de protensão, foi empregado o modelo de Maxwell Generalizado, disponível no ANSYS. Foram, então, simuladas numericamente as etapas construtivas por balanços sucessivos de um trecho da Nova Ponte do Guaíba, seguindo fielmente a sequência adotada na sua construção. A partir dos dados de monitoramento da construção da ponte, foi possível realizar a comparação dos valores de deslocamentos verticais, obtidos no modelo numérico e coletados em campo. Observou-se uma boa concordância entre esses valores.

Palavras-chave

Pontes segmentadas; Método dos balanços sucessivos; Concreto Pré-moldado; Método dos Elementos finitos; ANSYS; UPF's – User Programmable Features.

Introdução

Pontes segmentadas são estruturas formadas por aduelas de concreto justapostas, sendo que as mesmas podem ser moldadas no local ou pré-moldadas. No sistema de aduelas pré-moldadas, essas estruturas são transportadas até a sua localização na superestrutura da ponte. Após o lançamento das aduelas, realiza-se a protensão das mesmas, garantindo a união desses elementos, formando a estrutura da ponte de forma estável.

A utilização de pontes segmentadas, construídas pela técnica de balanços sucessivos, vem crescendo ao longo dos anos, pois é uma alternativa muito eficaz para vencer grandes vãos. Essa técnica estrutural é bastante difundida e pode ser considerada uma das alternativas mais eficientes na construção de grandes estruturas de pontes.

Nesse tipo de ponte, as juntas entre os segmentos necessitam de um elevado grau de atenção no projeto e na fase construtiva, pois representam locais de descontinuidade e essa descontinuidade afeta o comportamento geral da estrutura, uma vez que elas são responsáveis pela transmissão das tensões de compressão e cisalhamento (Ahmed; Aziz, 2019).

A partir da simulação numérica das etapas construtivas de pontes segmentadas pré-moldadas, é possível acompanhar a evolução de tensões e deslocamentos que ocorrem no lançamento das aduelas pela construção dos balanços sucessivos.

Neste estudo, optou-se por utilizar o método dos elementos finitos. De acordo com Lazzari (2016), é uma das formas mais eficientes de se analisar o comportamento não-linear de estruturas de concreto



armado e protendido. A análise por elementos finitos permite a consideração do comportamento não-linear dos materiais concreto e aço, da fissuração do concreto e da plastificação do concreto e do aço. Assim sendo, o objetivo desta pesquisa é realizar a análise da simulação numérica das etapas construtivas de uma ponte segmentada protendida real, composta por aduelas pré-moldadas, executada pelo método dos balanços sucessivos, através do Método dos Elementos Finitos. Para isso foi analisada a Nova Ponte do Guaíba, localizada na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. A partir de um dos vãos da ponte, foi escolhido um balanço sucessivo e o mesmo foi simulado numericamente, tomando o cuidado para que a simulação representasse fielmente o processo construtivo realizado no lançamento das aduelas pré-moldadas.

Como ferramenta para a modelagem da estrutura, utilizou-se o software ANSYS 21.2 customizado. Com a utilização do ANSYS é possível realizar análises estáticas, dinâmicas, de fluídos, assim como de materiais lineares e não-lineares, atribuindo a eles o seu comportamento elástico, plástico, viscoso ou uma combinação entre os mesmos. Junto ao sistema, existe uma ferramenta de desenho que é capaz de modelar os elementos estruturais de forma simples. Além disso, o programa ANSYS possui uma linguagem chamada APDL (ANSYS Parametric Design Language), a qual permite estruturar o problema em arquivos de texto. Estes arquivos, denominados scripts, utilizam uma lista de comandos, que possibilitam total controle sobre a simulação numérica. Neste arquivo, encontram-se os dados referentes à geometria, condições de contorno, etapas de carregamento e método de análise da estrutura. Através do ANSYS, é possível optar por diversos elementos finitos e modelos constitutivos de materiais, ademais possui recursos de ativação e desativação de elementos. Este último recurso, é de extrema importância para a simulação das etapas construtivas da ponte analisada no presente trabalho. O programa ANSYS, ainda disponibiliza uma ferramenta de customização, programável em Fortran 77, que permite a introdução de novos modelos de materiais. Destaca-se o trabalho de Lazzari et al. (2017), que implementa rotinas na interface do ANSYS para validação do modelo a partir de ensaios experimentais de vigas de concreto protendido.

Os resultados obtidos de deslocamento das aduelas a partir da análise incremental numérica foram comparados aos resultados de monitoramento real da ponte durante a fase de construção dos balanços, resultando em uma grande proximidade entre esses valores. Além disso, a partir da análise realizada, foi possível observar as resultantes de tensões nos cabos de protensão ao longo do processo construtivo, observando pequenas variações causadas pelos fenômenos de fluência e retração do concreto, assim como relaxação da armadura ativa.

Modelagem de um dos balanços sucessivos da Nova Ponte do Guaíba no ANSYS

A ponte analisada foi a Nova Ponte do Guaíba, localizada sobre o lago Guaíba, na cidade de Porto Alegre. Consideram-se as etapas construtivas por balanços sucessivos de parte do tabuleiro da ponte, executado sobre o trecho navegável, Figura 01.



Figura 1 – Vista lateral da Nova Ponte do Guaíba – vãos principais sobre o canal de navegação (CONSÓRCIO PONTE DO GUAÍBA 2020)

Como descreve Machado (2022), as etapas de cálculo foram constituídas por uma análise estática com incremento de tempo, cujo objetivo era obter as tensões e deformações nos elementos de



concreto, bem como as tensões axiais resultantes nos cabos de protensão, devido aos efeitos causados pela sequência construtiva do balanço sucessivo. O estudo das etapas construtivas da Nova Ponte do Guaíba visa apresentar de forma detalhada a simulação numérica da execução de uma ponte segmentada protendida, composta por aduelas pré-moldadas de diferentes geometrias, lançada pelo método dos balanços sucessivos, considerando juntas de 20 cm, concretadas sem a utilização de armadura.

A modelagem considerou as aduelas de concreto pré-moldado e os cabos de protensão do balanço direito de um dos eixos da ponte que formam a ponte pelo canal navegável. Não foram consideradas na modelagem as armaduras passivas das aduelas e a formação de fissuras no concreto, pois, nas etapas construtivas, as aduelas encontram-se sob tensão de compressão. Outro parâmetro desconsiderado foi a perda por atrito dos cabos de protensão. Ademais, para reduzir o número de elementos finitos, foi aproveitada a simetria transversal da ponte, modelando-se apenas metade do tabuleiro, conforme ilustra a Fig. 2.

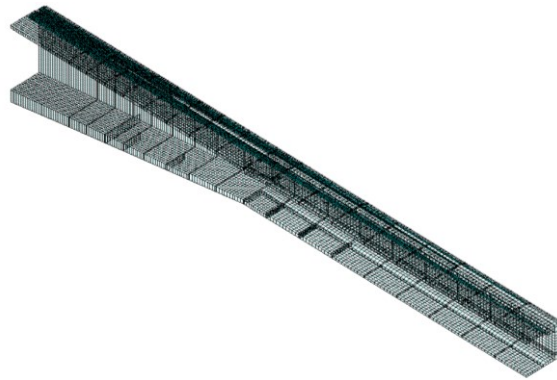


Figura 2 – Modelagem de um dos balanços da Nova Ponte do Guaíba através do ANSYS

Como condição de contorno foi considerado um engastamento nos nós da extremidade esquerda do tabuleiro, e uma restrição ao deslocamento no eixo z, imposta no centro das aduelas, representando a continuidade da seção de concreto. O total de elementos no modelo é de 16.505, sendo 14.101 que representam o concreto, através do SOLID186 e 2.404 que representam a armadura de protensão, através do REINF264.

O lançamento da estrutura no ANSYS se inicia pela modelagem dos elementos de concreto do balanço, pela aduela denominada A2, seguindo a sequência apresentada até a aduela A36. Realizou-se a simulação do comprimento total do balanço.

Com a finalidade de se discretizar as seções transversais, de modo que os nós dos elementos de concreto permaneçam sempre coincidentes, dividiu-se as seções de concreto por volumes (Fig. 3). Cada aduela, assim como cada junta, possui 31 volumes que compõem a geometria total de cada elemento. Para isso foi necessário um estudo detalhado, cuidando para que houvesse a variação dos volumes sem desajustar os nós.

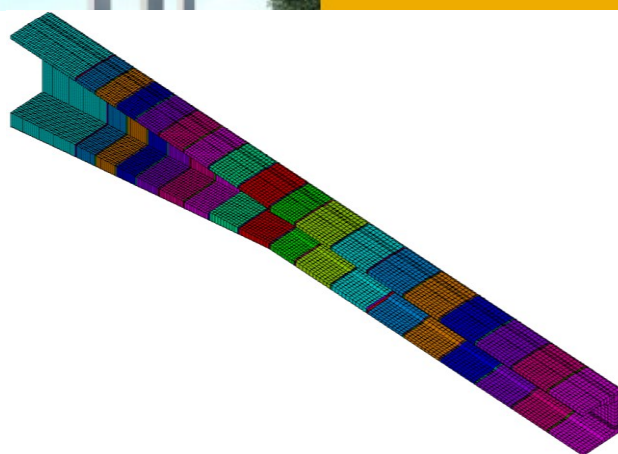


Figura 3 – Malha em elementos finitos das aduelas pré-moldadas através do ANSYS

Ao todo foram modeladas 18 aduelas e 34 elementos de junta. As juntas de 20 cm foram modeladas em duas camadas de elementos finitos de 10 cm. Para cada aduela e junta foi criado um material diferente, sendo que a única diferença entre eles é referente as datas de concretagem e ativação (içamento) das aduelas, assim como ativação das juntas. Conforme já mencionado, as aduelas são peças pré-moldadas e possuem uma idade diferente umas das outras, assim como as juntas que foram concretadas in loco no decorrer do processo construtivo. Demais informações, características, propriedades e idades dos elementos de concreto podem ser encontrados em Machado (2022). Os cabos de protensão, referentes às armaduras ativas no modelo, são responsáveis por manter as aduelas em balanço na etapa construtiva do tabuleiro. Deste modo, foram modelados os cabos posicionados que protendem as aduelas do balanço sucessivo em análise, conforme Fig. 4.

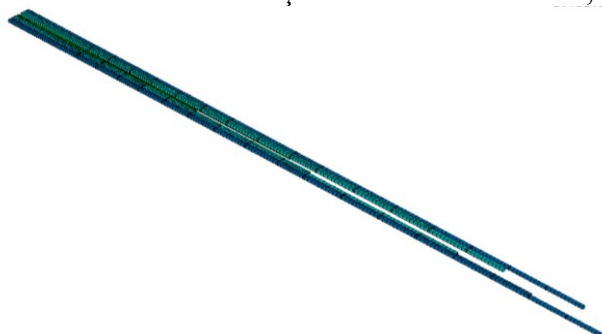


Figura 4 – Cabos de protensão modelados no ANSYS

Os cabos foram lançados de modo a representar de forma realista a sua posição na alma das aduelas, conforme projeto real da ponte. Cada aduela recebe em ambas as laterais da sua alma um cabo de protensão, responsável por manter a mesma estável no balanço. O lançamento dos cabos de protensão foi realizado com a aplicação de tensão inicial nos respectivos materiais dos cabos. Através do comando INISTATE, aplicou-se a tensão inicial sobre todos os nós do elemento de cada cabo de protensão, simulando a força aplicada no caso real da ponte para cada cabo de protensão.

Resultados da simulação numérica de etapas construtivas da nova ponte do Guaíba

Neste item são apresentados os resultados da análise das etapas construtivas de um dos vãos da Nova Ponte do Guaíba. Foi simulado, através do ANSYS, o lançamento das aduelas, em balanços sucessivos de um dos eixos centrais do canal navegável, de acordo com projeto da ponte. As etapas de cálculo compreendem os casos de carga através de uma análise não linear com incremento de tempo, com o objetivo de obter as tensões e deslocamentos verticais nos elementos de concreto e as



tensões na armadura ativa, ao longo do processo construtivo pelo método dos balanços sucessivos das aduelas da ponte.

Na análise viscoelástica, utilizando o software ANSYS, versão 21.2, o tempo de processamento da estrutura foi de cerca de seis horas. Nestas análises, não foram consideradas a armadura passiva e a possibilidade de fissuração do concreto, pois em função da protensão as seções se encontravam totalmente comprimidas durante o processo construtivo.

Análise dos Deslocamentos

Inicialmente, comparam-se os valores dos deslocamentos verticais relativos nas aduelas, obtidos pelo monitoramento realizado durante a construção da ponte, com os correspondentes valores determinados através da simulação numérica pelo ANSYS. Esses deslocamentos relativos são determinados a partir da variação da posição inicial das aduelas com o seu deslocamento ao longo do processo construtivo.

Os gráficos seguintes contêm os valores de variação de deslocamentos verticais, obtidos pelo ANSYS para cada tempo acumulado de lançamento, assim como as resultantes de variação de deslocamentos reais medidos em obra durante a execução do balanço. O monitoramento dos deslocamentos das aduelas, durante a execução do balanço, foi realizado com a medição em dois pontos situados nas laterais da alma de cada aduela, acima das paredes principais. Deste modo, são apresentados os deslocamentos reais da borda esquerda e da borda direita de cada aduela referente à medição real. Com a finalidade da análise comparativa, retiram-se do ANSYS os resultados de deslocamento na mesma posição do monitoramento.

Como trata-se de um número expressivo de gráficos, a fim de simplificar, a apresentação dos resultados, foram escolhidos os gráficos referentes às aduelas A-24, A-28 A-32 e A-34. Da análise destes resultados, observa-se que as curvas de deslocamentos verticais, obtidas pelo ANSYS, se aproximam das correspondentes curvas do monitoramento. Os deslocamentos das aduelas se mostram coerentes, conforme o decorrer das fases de construção, ou seja, quando pretendidas as aduelas entram em carga e sofrem um pequeno deslocamento vertical positivo, causado pela aplicação da força de protensão da armadura ativa.

Quando submetidas a um carregamento, como, por exemplo, o avanço da treliça e o içamento da aduela subsequente, ocorre o deslocamento vertical negativo, forçando o balanço para baixo, provocando uma deflexão.

A variação de deslocamentos encontrados nas aduelas a partir do programa ANSYS se aproximam das medições reais realizadas no monitoramento da ponte. Observa-se que os resultados obtidos pelo ANSYS, a partir da Aduela A-24, Fig. 5, localizada a uma distância de aproximadamente 45 m do eixo do pilar que comporta o balanço, acompanham a variação dos deslocamentos das medições reais de forma bastante aproximada.

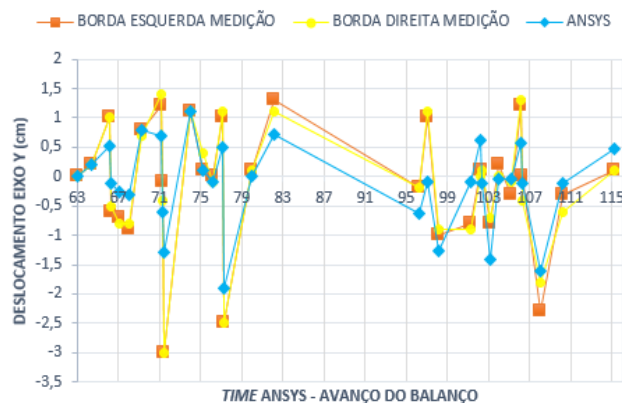


Figura 5 – Deslocamentos verticais obtidos na aduela A24

Observando os resultados obtidos para a aduela A-28, localizada a uma distância de aproximadamente 53 m, conforme Fig. 6, e do eixo do pilar que comporta o balanço, é possível verificar que à medida que o avanço do balanço ocorre, os deslocamentos reais comparados aos do ANSYS tornam-se cada vez mais próximos.

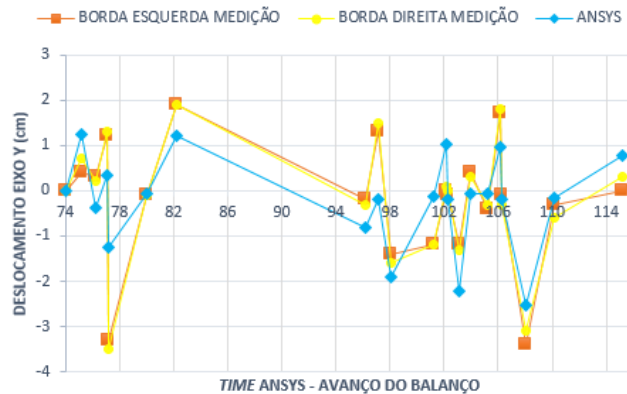


Figura 6 – Deslocamentos verticais obtidos na aduela A28

Ao analisar a variação dos deslocamentos verticais, observou-se que os deslocamentos verticais ocorridos, no passar dos casos de carga é muito pequeno, a maioria dos deslocamentos verticais medidos e encontrados na análise via ANSYS se mantiveram próximos e até inferiores a 1 cm. Os maiores deslocamentos foram observados nas aduelas posicionadas no final do balanço, A-30, A-32 e A-34 (Fig.7), que se encontram a uma distância do eixo do balanço de 57 m, 61 m e 65 m, respectivamente. Nessas aduelas o deslocamento vertical máximo medido foi de 5,3 cm, nas medidas reais fornecidas pelo monitoramento da ponte e 4,5 cm no ANSYS. Diante desta análise, constata-se, além da precisão do projeto estrutural realizado, a eficácia do processo construtivo e da força dos cabos de protensão que são responsáveis pela sustentação do balanço.

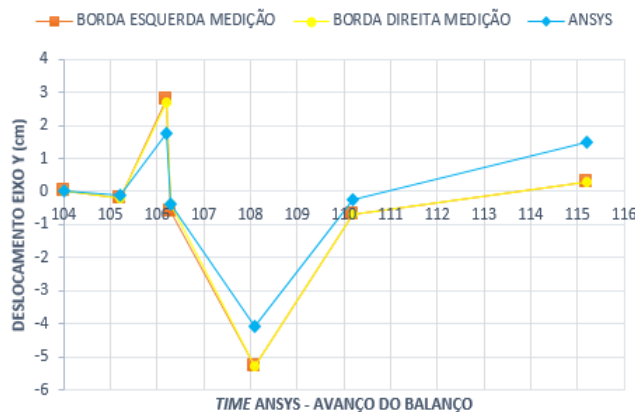


Figura 7 – Deslocamentos verticais obtidos na aduela A34

A partir do histórico de deslocamentos para as aduelas A-28 e A-34, observado nas Fig. 8 e Fig. 9, nota-se o aumento dos deslocamentos com o tempo, evidenciando a consideração da fluência, de acordo com o que foi adotado no modelo em elementos finitos para os elementos de concreto. É possível observar, em alguns casos, que o passar do tempo é longo entre uma etapa de carregamento e outra, podendo nestes casos, visualizar de forma clara o fenômeno da fluência. Demais resultados encontram-se no trabalho de Machado (2022).

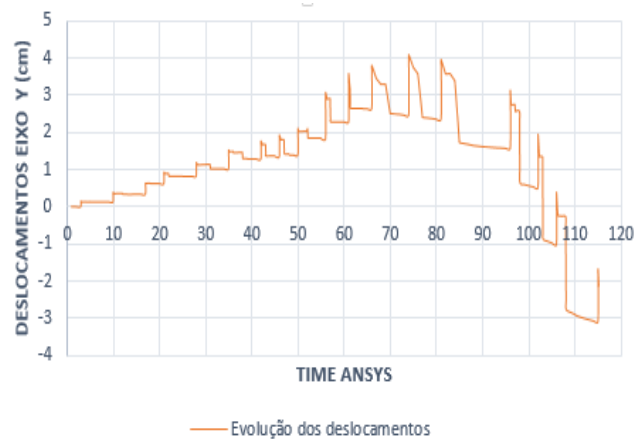


Figura 8 – Evolução dos deslocamentos verticais obtidos na aduela A28

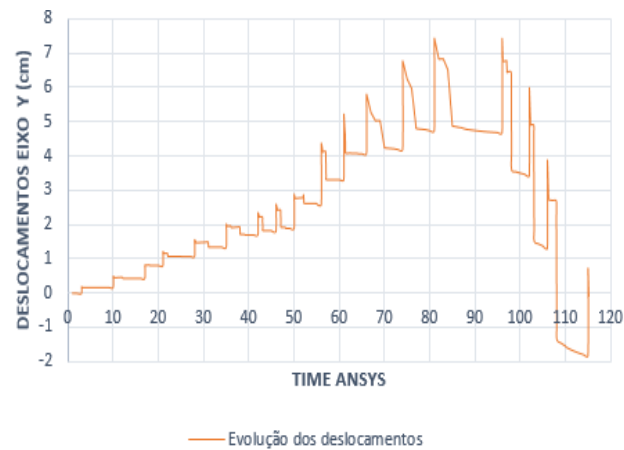


Figura 9 – Evolução dos deslocamentos verticais obtidos na aduela A34

Análise das tensões (σ_x) nos cabos de protensão

Para a verificação das tensões nas armaduras de protensão, é realizada uma análise em dois tempos, ou seja, quando a armadura é protendida, neste tempo, a mesma tende a sofrer uma perda na sua força, devido ao fenômeno de perda imediata. Assim como a análise no final do processo construtivo, ao passar do tempo de construção, neste período pós construção, se observam as perdas de protensão ocorridas devido ao fenômeno viscoelástico de relaxação do aço, que tende a ocasionar a diminuição das tensões na armadura protendida com o tempo.

São apresentadas as tensões nas armaduras ativas obtidas pela análise no ANSYS, referente aos cabos de protensão C-25, C-24, C-09 e C-08, que protendem as aduelas A-02, A-04, A-34 e A-36, respectivamente, ou seja, os cabos responsáveis por protender as duas primeiras aduelas e as duas últimas aduelas do balanço.

Nas Fig. 10 e Fig. 11, observa-se que as tensões de tração resultantes nos elementos de armadura ativa para os cabos C-25, C-24, respectivamente, que protendem as duas primeiras aduelas que compõem o balanço analisado, obtidas pela análise numérica no ANSYS. Para esses cabos, a tensão inicial de protensão, imposta no modelo foi de 134,9 kN/cm², de acordo com a força de protensão aplicada na ponte real.

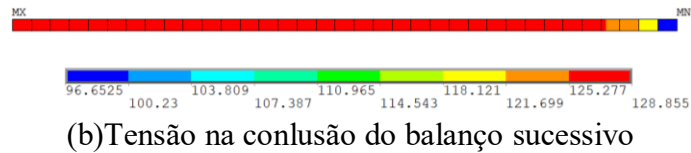
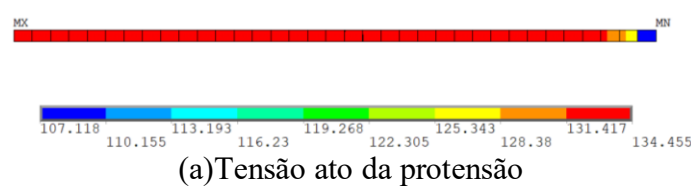


Figura 10 – Tensão nos cabos C-25 σ_x (kN/cm²) que protende A-02

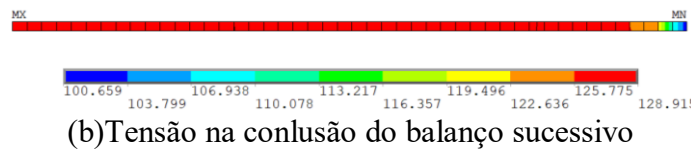
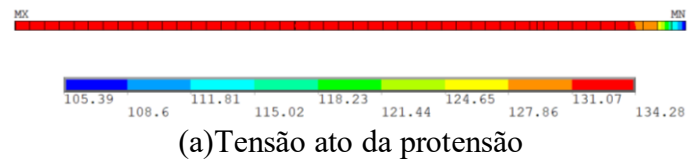


Figura 11 – Tensão nos cabos C-24 σ_x (kN/cm²) que protende A-04

Observa-se nas figuras apresentadas uma pequena perda de tensão, ocasionada pela perda imediata da força de protensão, entretanto essa perda é muito pequena. As tensões, em todos os cabos analisados, se mantêm estabilizadas e constantes ao longo de todo o elemento de aço, sofrendo uma pequena variação na ponta do cabo, ponto de ancoragem, que fica em direção ao balanço.

Com o avanço das etapas construtivas, e com o passar do tempo de construção do balanço, verificou-se que as tensões de tração tiveram mais uma pequena redução. Isto ocorre devido ao fenômeno de fluência e retração do concreto e relaxação da armadura de protensão, desta vez, uma perda ao longo do tempo na tensão imposta para representar a força de protensão, mesmo com a relaxação da armadura de protensão.

Por fim, os diagramas demonstram a eficiência do modelo ao passar dos casos de carga e ao final do lançamento do balanço da ponte, apresentando um comportamento eficiente da armadura ativa, sem grandes oscilações nas tensões, garantindo a estabilidade da estrutura da ponte na fase construtiva analisada.

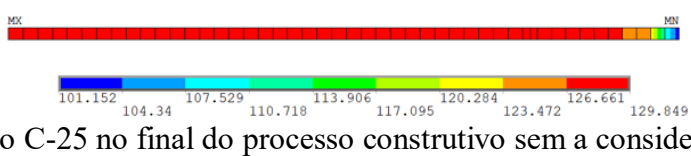
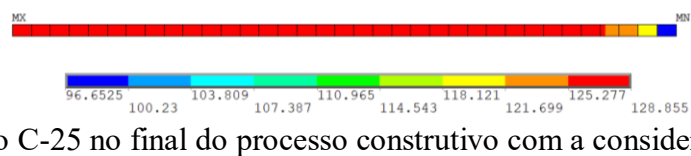


Figura 12 – Tensão nos cabos C-25 S_x (kN/cm²) que protende A-34



Para demonstrar a influência da consideração da relaxação da armadura de protensão, a Fig. 12 mostra a tensão no cabo C-25 que protende a primeira aduela, após a conclusão do balanço com e sem a consideração do fenômeno da relaxação na armadura. Observa-se que o cabo C-25 em Fig. 12(a) possui uma maior variação de tensão no modelo que utiliza a relaxação comparado a resultante de tensão quando não se considera esse parâmetro, em Fig. 12(b).

Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo principal apresentar a análise estrutural das fases construtivas de uma ponte segmentada, composta por aduelas pré-moldadas e protendidas, construída pelo método dos balanços sucessivos, através do método dos elementos finitos, utilizando o software ANSYS, versão 2021.2. A apresentação deste estudo, justifica-se pela crescente utilização deste tipo estrutural e pela importância da análise numérica das fases construtivas de composição de balanços sucessivos, pois projetos com esse tipo de sistema estrutural exigem um detalhado controle para a sua realização. Projetos deste porte, devem ser realizados com um alto grau de detalhamento, uma vez que a construção dos balanços sucessivos requer precisão, para a ligação final dos balanços que compõe o tabuleiro da ponte.

Realizou-se a simulação numérica de um dos balanços sucessivos da Nova Ponte do Guaíba, localizada em Porto Alegre/RS, de modo a representar as etapas construtivas realizadas na construção desta estrutura. A partir da análise numérica, foi possível obter do modelo os valores de variação de deslocamentos verticais. No processo real de construção da ponte, foi realizado um controle de monitoramento no lançamento das aduelas pré-moldadas. A partir desses dados de monitoramento, é possível comparar os valores de deslocamentos verticais obtidos no modelo numérico do ANSYS com as informações coletadas em obra. Ao realizar esta comparação, observaram-se bons resultados. Além dos gráficos, indicando o deslocamento vertical das aduelas no processo de construção dos balanços, também são apresentados os resultados de tensões no concreto, assim como a evolução de tensões nos cabos de protensão no decorrer das etapas construtivas.

Os resultados de deslocamento apresentados, indicam um comportamento no modelo numérico extremamente próximo aos resultados de monitoramento da ponte durante as fases de içamento das aduelas que compõe o tabuleiro na construção do balanço sucessivo. Os resultados mostram que o modelo numérico consegue acompanhar a evolução das etapas construtivas, ou seja, ao se analisar os deslocamentos em cada etapa de construção, percebe-se que o modelo numérico é capaz de representar o comportamento obtido na fase construtiva real. Além disso, os resultados do monitoramento indicam deslocamentos verticais muito pequenos, deste modo, a análise desses dados evidencia que o projeto desta estrutura foi devidamente elaborado e bem sucedido.

Já as resultantes de tensões nas aduelas, no modelo numérico, apresentam uma evolução de tensões de compressão compatível com a evolução dos carregamentos. Ainda, observa-se a predominância das tensões de compressão nas aduelas pré-moldadas, o que retrata a condição imposta pelo processo de construtivo.

Nos cabos de protensão, as resultantes de tensões obtidas pelo ANSYS, se mantiveram próximas as impostas inicialmente, garantindo a estabilidade do balanço na fase construtiva em análise. Ao observar as tensões, os resultados indicam a ocorrência do fenômeno de relaxação no aço de protensão, mostrando uma pequena variação nas tensões de tração nos cabos, no que se refere a comparação das tensões no ato de protensão com as tensões no cabo após a conclusão do balanço. A perda de tensão observada nos cabos é pequena, e se mostra mais significativa nos cabos lançados inicialmente, ou seja, aqueles que passaram por um período de tempo maior no modelo.

A análise dos resultados demonstra a importância do estudo das solicitações que ocorrem nas etapas de construção por balanços sucessivos com a utilização de aduelas de concreto pré-moldado protendidas, uma vez que é preciso saber estimar as tensões de compressão nas aduelas que surgem



no decorrer do processo construtivo, assim como as forças de protensão necessárias para garantir a protensão das aduelas na fase construtiva por balanços sucessivos.

Uma análise completa dos resultados, bem como mais informações sobre os modelos utilizados e os scripts e códigos escritos são apresentados em Machado (2022).

Referências

- Ahmed, G. Aziz, O. (2019), “Shear strength of joints in precast posttensioner segmental bridges during 1959 – 2019, review and analysis”, *Structures*, **20**, 527-542. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.06.007>.
- Guaíba Bridge Consortium CQG e EGT. (2018), The new Guaíba bridge, Institute of Engineering, Brazil. <https://www.institutodeengenharia.org.br/site/wpcontent/uploads/2018/11/Clique-e-veja-o-materia-t%C3%A9cnico-da-palestra.pdf>.
- Lazzari, P.M. (2016), “Numerical simulation of construction stages of cable-stayed bridges through the finite element method”, Ph.D. Dissertation, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil.
- Lazzari, B.M., Campos Filho, A., Lazzari, P.M. and Pacheco, A.R. (2017), “Using element-embedded rebar model in ANSYS for the study of reinforced and prestressed concrete structures”, *Comput. Concrete*, **19**(4), 347-356.
- MACHADO, G.G. (2022), “Numerical Simulation by the Finite Element Method of the Constructive Steps of a Precast Prestressed Segmented Bridge”, M.S. Dissertation, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil.