



XIV Congresso Brasileiro
de Pontes e Estruturas

Estudo de caso: Análise numérica da Ponte Caynarachi considerando seu faseamento construtivo.

Eng.^a Dr.^a Marcela Palhares Miranda¹, Prof. Dr. Jorge Luis Palomino Tamayo², Prof. Dr. Inácio Benvegnu Morsch³

¹ Engecorps Engenharia S.A./Departamento de Estruturas/marcela.miranda@engecorps.com.br

^{2,3} Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Departamento de Engenharia Civil /00184713@ufrgs.br²,
morsch@ufrgs.br³

Resumo

O processo do faseamento construtivo de pontes envolve diferentes alterações da estrutura em relação à sua geometria, condições de contorno e introdução de distintos conjuntos de carregamentos que são responsáveis por provocar variações de deslocamentos e redistribuições de forças internas em estruturas hiperestáticas. Estas redistribuições são ainda mais relevantes quando os efeitos viscoelásticos gerados pela fluência e retração do concreto são considerados na análise e podem afetar significativamente o comportamento da estrutura durante sua utilização e mesmo provocar colapsos estruturais ao longo da etapa de execução. Este trabalho é uma contribuição para o melhor entendimento dos efeitos associados ao processo de construtivo de estruturas de pontes mistas aço-concreto, sendo este um sistema bastante empregado devido à suas vantagens em desempenho estrutural. Um estudo de caso com análise numérica das etapas de construção de uma ponte em viga mista, Ponte Caynarachi, construída no Peru é apresentado a partir de um modelo tridimensional de elementos finitos usando o programa institucional VIMIS (CEMACOM/UFRGS). A análise da estrutura considera os efeitos de longa duração e a sequência construtiva é modelada por meio da metodologia denominada na literatura inglesa *Ghost Structures*. Além do faseamento construtivo uma simulação da prova de carga da estrutura também foi realizada. Os resultados da simulação numérica foram comparados aos valores de esforços obtidos para o projeto da ponte e reforçam a importância destas análises para a obtenção de respostas mais realísticas para o comportamento destas estruturas.

Palavras-chave

Faseamento construtivo, simulação numérica, pontes em estruturas mistas, estruturas fantasmas (*Ghost Structures*).

Introdução

Durante o estudo e desenvolvimento do projeto de pontes e viadutos é indispensável a avaliação das diferentes situações estruturais que ocorrem desde a etapa de execução. Alterações nas condições de contorno, variações da geometria e seção transversal e diferentes situações de carregamentos são situações que influenciam no comportamento estrutural ainda durante as etapas construtivas. Consequentemente, as respostas da estrutura e as solicitações existentes serão distintas e podem ser ainda mais importantes decorrentes dos efeitos de fluência e retração do concreto, além das possíveis implicações associadas às não linearidades física e material. Nos últimos anos, diferentes episódios de colapsos de pontes e viadutos durante a etapa de execução reforçam ainda mais a importância dos estudos destas estruturas considerando ainda na etapa de projeto as verificações pertinentes ao faseamento construtivo. De acordo com estudiosos, como Branco (2013), as principais causas destes acidentes estão relacionadas à erros de dimensionamento dos elementos, por subestimação dos esforços e consequente adoção de soluções inadequadas, e falhas dos procedimentos de execução. Como exemplo, destaca-se o viaduto Batalha dos Guararapes em Belo Horizonte, MG (CONSOL, 2014), que apresentou colapso em 2014, o viaduto Kote na Índia que falhou em 2016

(NARASINGARAO E NARAYANAN, 2017), a Ponte Chirajara na Colômbia que apresentou colapso em 2018 e a ponte de concreto Botan Bridge na Turquia (OZCELIK E TUTUS, 2020).

A utilização da modelagem numérica de pontes e viadutos para o estudo da faseamento construtivo, e suas implicações, tornou-se muito comum ao redor do mundo, sendo empregados modelos autorais ou a utilização dos softwares comerciais. Cabe ressaltar que para as diferentes características dos sistemas estruturais e também das distintas metodologias construtivas é importante que as análises sejam capazes de considerar e reproduzir adequadamente o comportamento da estrutura real. Um estudo realizado por Bergenudd et al. (2023) para uma ponte de madeira, em diferentes estágios de execução, indicam fatores que são realmente relevantes de se considerar no modelo para a obtenção de resposta dinâmicas realistas.

Já na análise do faseamento construtivo de estruturas mistas, algumas variáveis exigem maior atenção. A forma de execução a partir de escoramentos e também o instante na qual a ligação mista é efetivada são informações indispensáveis para as verificações quanto à solicitação dos elementos de aço. Nos trabalhos apresentados por Butler et al. (2018) e Zhu et al. (2020) os resultados do modelo numérico calibrado apontam para o significativo aumento das deformações nos componentes da seção mista logo após a concretagem da seção e posterior estabilização da resposta quando a ligação mista é efetivada.

Por outro lado, a metodologia de execução empregada nos tabuleiros de concreto, se moldado in-loco ou pré-moldado, além também da sequência de execução das lajes, são fatores importantes no estudo da das condições de fissuração dos elementos, deformações e solicitações. Como demonstrado por Dezi et al. (2006), a adoção da sequência de execução do tabuleiro chamada otimizada, na qual as regiões de solicitação negativa são construídas alternativamente com os vãos com solicitação positiva, reduz em 20% os esforços sobre as lajes na zona dos apoios. Estudos mais recentes que associam o faseamento construtivo de pontes com análises de risco de danos devido à sismos destacam as vantagens da utilização das estruturas pré-moldadas devido à velocidade de execução e, portanto, na ocorrência de um evento sísmico, o sistema estrutural, dimensionado para tal condição, está completo (ZHONG ET AL., 2023).

Diante deste contexto, este trabalho apresenta uma avaliação da Ponte Caynarachi, executada no Peru em 2006, considerando sua execução a partir de uma simulação utilizando o programa chamado VIMIS, desenvolvido pelos autores no PPGEC/UFRGS. Os resultados obtidos com a avaliação numérica são comparados aos dados que constam na memória de cálculo do projeto da estrutura. A técnica de simulação da fase construtiva emprega a metodologia denominada Ghost Structures, que tem por base o conceito da ativação e desativação de elementos (HANAFY E EMERY, 1981). Além de reforçar a importância desta análise na fase de estudo e desenvolvimento de projetos, nosso objetivo é também apresentar a potencialidade da ferramenta desenvolvida no grupo de pesquisa.

Modelo de elementos finitos

O modelo foi desenvolvido utilizando o comportamento elástico e linear do perfil de aço e dos conectores de cisalhamento e um modelo viscoelástico linear foi adotado para a laje de concreto. A seguir é apresentada uma breve descrição do modelo de elementos finitos empregado. Para mais detalhes recomenda-se ler Miranda et al. (2022a, 2022b), Sánchez et al. (2021) e Tamayo et al. (2019).

Modelo constitutivo para o concreto

O comportamento viscoelástico do concreto foi definido a partir do princípio da superposição de Boltzmann, na qual a deformação total do concreto é separada em uma parcela mecânica e em uma parcela não mecânica, para o presente estudo representada pela retração.

A determinação da deformação por fluência (ε_{cc}) é realizada a partir da função específica de fluência $C(t, t')$, obtida por meio da aproximação da série de *Dirichlet*. Por esta abordagem, a função de fluência é definida sendo a equação característica do modelo reológico Generalizado de Kelvin, como mostra a equação 1, na qual N é número de parâmetros do modelo, $E_i(t')$ é o módulo de ajuste dependente do tempo e τ_i é o tempo de retardação do sistema. Os módulos de ajuste do modelo são obtidos pelo procedimento dos métodos de mínimos quadrados, para cada instante de tempo t' de aplicação de carregamento.

$$C(t, t') = \sum_{i=1}^N \frac{1}{E_i(t')} (1 - e^{-\alpha_i}); \quad \alpha_i = (t - t') / \tau_i \quad (1)$$

No modelo numérico, esta abordagem é empregada para a determinação de incrementos de deformação de fluência $\Delta\varepsilon_{cc}$ e retração $\Delta\varepsilon_{sh}$ que são aplicadas na estrutura como *pseudo*-forças. Para cada intervalo de tempo Δt , é obtido um incremento de deformação do concreto $\Delta\varepsilon_c$. Considerando um intervalo de tempo qualquer $\Delta t_j = t_j - t_{j-1}$, pode-se obter a expressão para o incremento de deformação por fluência $\Delta\varepsilon_{cc}(t_j)$, conforme a equação 2, utilizando uma aproximação retangular para a integração das tensões (PÓVOAS (1991)).

$$\Delta\varepsilon_{cc}(t_j) = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^*(t_{j-1}) (1 - e^{-\alpha_{j,i}}); \quad \varepsilon_i^*(t_{j-1}) = \varepsilon_i^*(t_{j-2}) e^{-\alpha_{j-1,i}} + \frac{\Delta\sigma(t_{j-1})}{E_i(t_{j-1})} \quad (2)$$

Sendo: $\alpha_{j,i} = \frac{\Delta t_j}{\tau_i}$; $\alpha_{j-1,i} = \frac{\Delta t_{j-1}}{\tau_i}$, e $\varepsilon_i^*(t_1) = \frac{\Delta\sigma(t_1)}{E_i(t_1)}$.

O conjunto de relações expressas anteriormente fazem parte de um dos algoritmos capazes de determinar as deformações diferidas do concreto decorrente de um histórico de tensões. Neste caso, a parcela $\varepsilon_i^*(t_{j-1})$ é responsável por recuperar a resposta associada ao histórico de tensões avaliado até um instante de tempo precedente, para a determinação da deformação no tempo atual.

Por fim, o incremento de deformação total no concreto $\Delta\varepsilon_c(t_j)$ para um instante de tempo t_j é expresso na equação 3.

$$\Delta\varepsilon_c(t_j) = \Delta\sigma(t_j) \left[\frac{1}{E_c(t_j)} + \sum_{i=1}^N \mathbf{D}_\mu \frac{\gamma'_{j,i}}{E_i(t_{j-1})} \right] + \sum_{i=1}^N \gamma'_{j,i} \cdot \varepsilon_i^*(t_{j-2}) \cdot \gamma'_{j-1,i} + \Delta\varepsilon_0(t_j) \quad (3)$$

Sendo: $\gamma'_{j,i} = (1 - e^{-\alpha_{j,i}})$; $\gamma'_{j-1,i} = (1 - e^{-\alpha_{j-1,i}})$ e \mathbf{D}_μ uma matriz constitutiva do material modificada pelo módulo de ajuste das cadeias do modelo reológico.

Modelo constitutivo para o perfil e para os conectores

Para os componentes do perfil metálico e conectores foi admitido o comportamento elástico e linear dos materiais. Na modelagem dos conectores de cisalhamento é utilizada uma lei característica não linear que retrata a relação força cisalhante e deslocamento, típica dos ensaios mecânicos *pull-out test*. Esta força é considerada como aplicada nas direções transversal e longitudinal, simulando assim o comportamento na interface viga-laje.

Elementos finitos

Todos os componentes estruturais, neste modelo numérico, são representados por planos que passam no centro geométrico das seções transversais. Para as lajes de concreto é utilizado um elemento de casca plano com 8 nós e cinco graus de liberdade, três translações e duas rotações, como ilustra a Figura 1-a. Este elemento é dividido em camadas, o que proporciona uma melhor representação do comportamento não linear do componente, quando considerada uma análise com não linearidade. Para o perfil de aço é empregado um elemento de casca fina, Figura 1-b, com 4 nós e 6 graus de liberdade, três translações e três rotações.

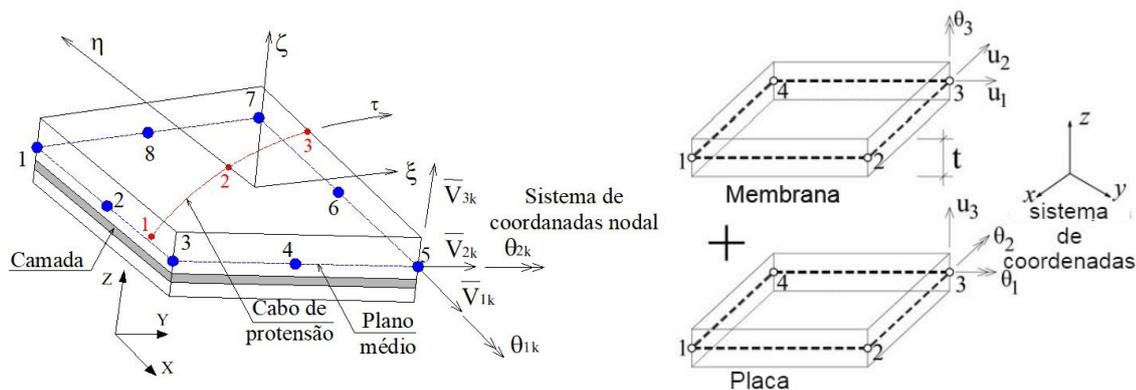


Figura 1 - Elementos finitos. (a) Elemento de casca do concreto. (b) Elemento casca fina do perfil de aço.

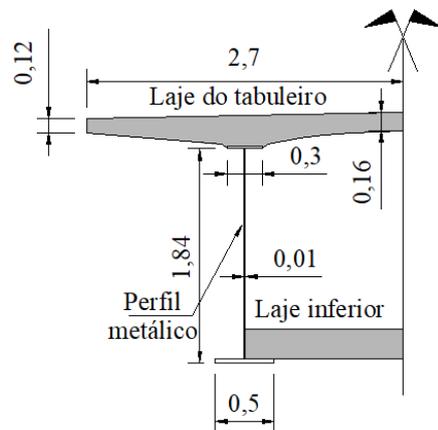
A união entre a mesa superior do perfil e a laje de concreto é efetivada por elementos de viga-coluna representativo dos conectores de cisalhamento. Estes elementos possuem dois nós, são distribuídos ao longo do comprimento da viga e possuem a altura dos conectores reais da estrutura analisada.

Ponte Caynarachi

A estrutura avaliada é uma ponte contínua com três vãos e caracterizada como semi-integral. É composta por duas longarinas constituídas por vigas mista e apresenta dois vãos de extremidade com 40 m e um vão central de 50 m. As vigas são associadas a um tabuleiro de concreto com seção variável, como mostra a Figura 2, além disso ainda possui uma laje inferior retangular, com comprimento total de 21 m, disposta na região dos apoios, estendendo-se 10,5 m para cada lado dos apoios. Ao longo do seu foram dispostos enrijecedores na alma das vigas, espaçados a cada 10 m.



(a)



(b)

Figura 2 - (a) Ponte Caynarachi. (b) Seção transversal da ponte (unidade em metros).

O processo de execução da ponte foi iniciado e finalizado em 2006. As vigas mistas foram executadas pelo método de deslocamentos sucessivos, (*Incremental Launching Method*) e as lajes de concreto foram moldadas in loco, sem escoramentos. Após o lançamento dos perfis, foi concretada toda a laje inferior e posteriormente foi realizada a concretagem, em etapas, do tabuleiro sendo utilizada a sequência construtiva otimizada, lajes sobre apoios são executadas em uma primeira etapa e depois é realizada a concretagem dos demais trechos. Neste trabalho foi avaliado o processo a execução das lajes como apresenta a Tabela 1.

Tabela 1 – Atividades do processo construtivo consideradas para a simulação.

Estágio	Início do estágio (dias)	Atividades
1	0	Lançamento das vigas metálicas
2	1	Montagem das formas e concretagem da laje inferior.
3	8	Montagem das formas e concretagem da laje do tabuleiro (sobre apoios internos).
4	36	Aplicação da protensão (28 dias após a concretagem do tabuleiro)
5	37	Concretagem do restante do tabuleiro.
6	65	Calçadas.
7	66	Guarda-corpo.
8	67	Pavimento asfáltico.

Os resultados obtidos foram comparados com os apresentados na memória de cálculo do projeto. Cabe ressaltar que o tempo de cura considerado para o concreto foi de 14 dias.

Sobre os apoios internos foi disposto um cabo de protensão reto no centro da laje do tabuleiro, com comprimento total de 21 metros. Esta força de protensão foi aplicada, neste trabalho, como cargas nodais distribuídas ao longo da direção transversal do tabuleiro. Para a simulação da seção transversal variável do tabuleiro, o modelo foi preparado considerando um fator de penalização de camadas, como mostra a Figura 3. Originalmente foi modelada uma seção retangular, que se aproxima da seção original, com uma discretização em camadas, ao longo da altura, de forma que a partir da anulação de algumas destas camadas, para quais é atribuído o parâmetro de penalização $\beta=0$, fosse possível uma aproximação da seção real com relação à sua inércia e rigidez. A simulação considerou a seção completa da estrutura, conforme apresenta a Figura 2. A malha empregada possui 37723 nós, 226338 graus de liberdade, 13346 elementos de casca plana (aço), 7586 elementos de casca espessa (concreto) e 900 elementos de barra viga coluna (conectores).

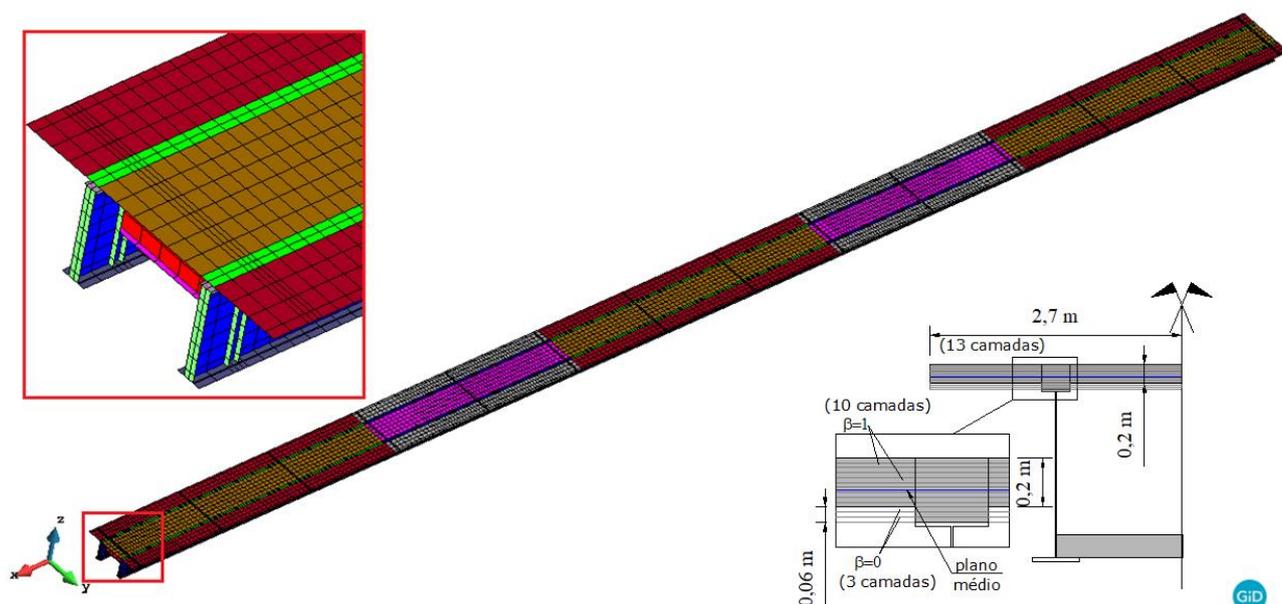


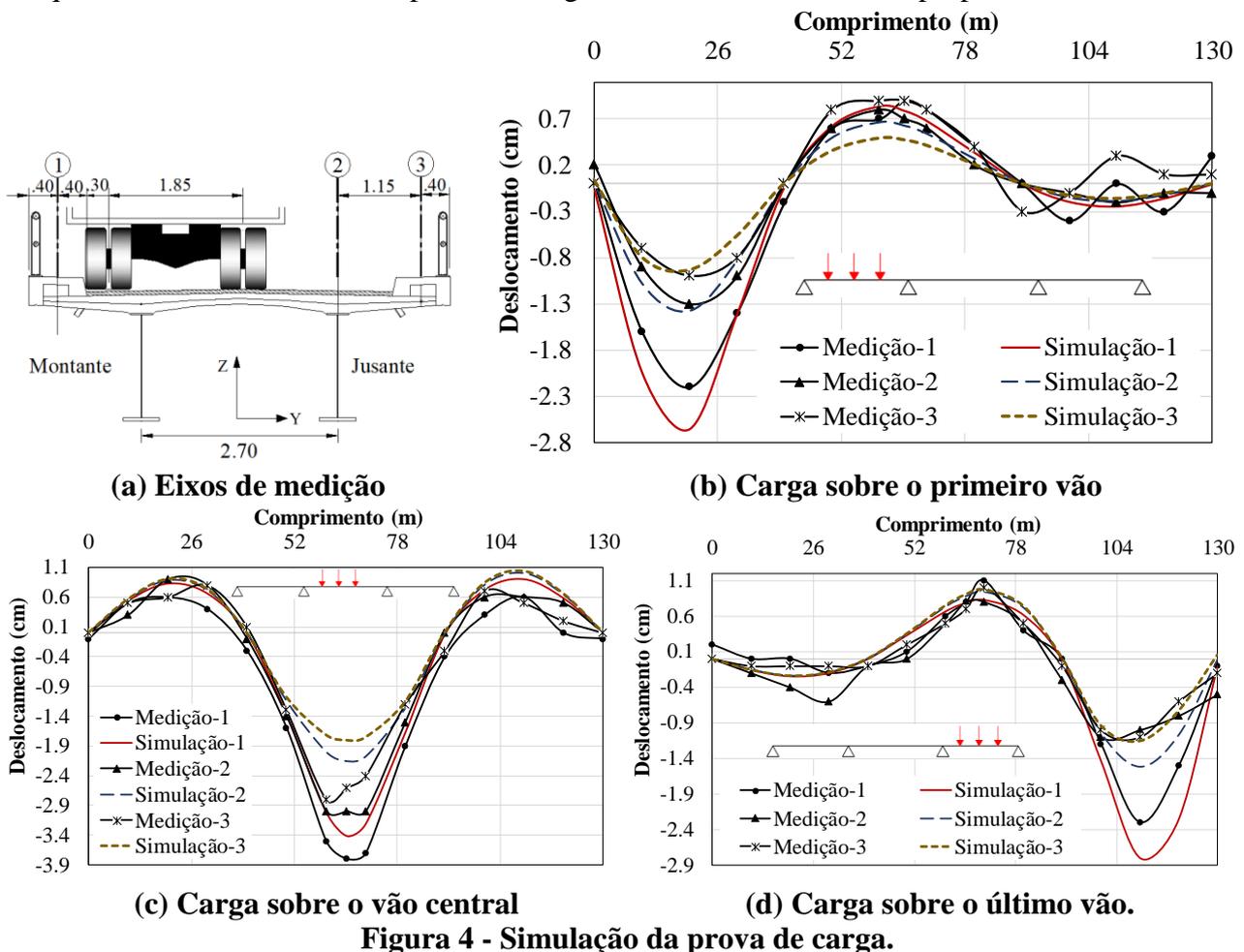
Figura 3 - (a) Ponte Caynarachi. (b) Seção transversal da ponte (unidade em metros).

Foram adotadas as propriedades: módulo de elasticidade do concreto $E_{c,28} = 32140$ MPa, Poisson do concreto = 0,2, resistência à compressão $f_{c28} = 35,5$ MPa, módulo de elasticidade do perfil $E_s = 199948$ MPa, Poisson do aço = 0,3, tensão de escoamento $f_y = 250$ MPa. Para os conectores de cisalhamento foram determinados parâmetros de ajuste da lei constitutiva com base em pesquisas

sobre dados experimentais de conectores com as características definidas em projeto. Para avaliação dos efeitos viscoelásticos foram utilizadas as equações do modelo normativo ACI-208, umidade relativa de 87,5%, cimento tipo I e método de cura úmida.

Resultados e discussões

Inicialmente foi realizada uma verificação do modelo e da malha a partir da reprodução da prova de carga realizada 3 meses após a conclusão da execução da ponte. A avaliação consistiu na passagem de três caminhões enfileirados ao longo da estrutura, com parada em posições específicas em cada um dos 3 vãos, realizando, em cada parada, medições ao longo do sentido transversal do tabuleiro em posições definidas por eixos apresentados na Figura 4-a. As posições de medição no tabuleiro para o terceiro vão são simétricas ao primeiro. A identificação dos eixos é apresentada na legenda do gráfico de resultados (Figuras 4-b a 4-d) representada pelo número indicado na sequência do título do resultado representado. Como esperado, há uma pequena diferença entre a simulação e a medição, principalmente para o eixo 1 (aproximadamente 20%), que tende a reduzir ao longo dos eixos. Dessa forma, os resultados foram considerados satisfatórios sendo o modelo capaz de reproduzir adequadamente os resultados da prova de carga da estrutura e atendeu ao propósito desta análise.

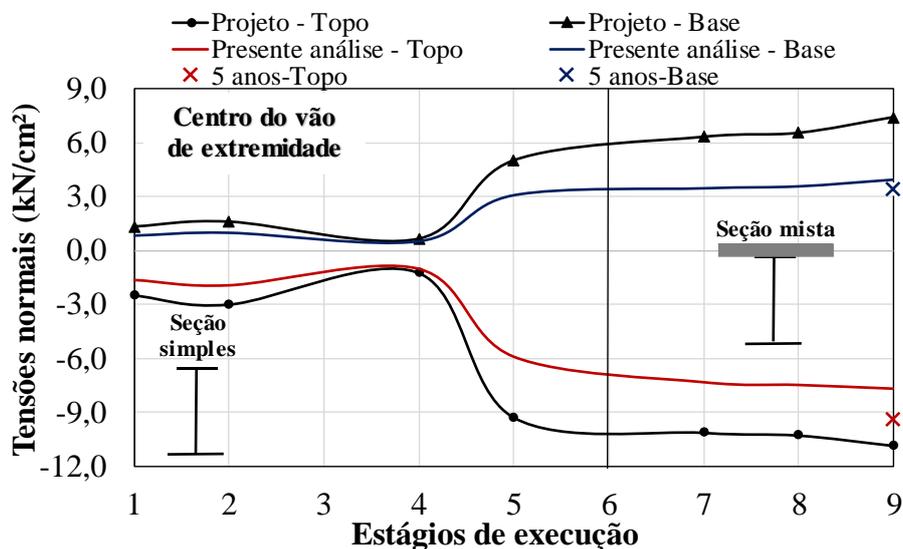


Por fim, realizou-se a simulação do faseamento construtivo. Os resultados foram avaliados em cada fase da execução e também após 5 anos da data de início do processo. Assim como na memória de cálculo, foram verificadas as tensões no topo e na base dos perfis e bem como as tensões nas lajes. Sabe-se que as normas de projeto para estruturas mistas empregam uma relação modular ($n=Es/Ec$) entre aço e concreto para determinação dos esforços e deslocamentos das estruturas deste sistema, a depender da condição de análise se em curta duração ou longa duração. Neste estudo a relação modular determinada por norma foi $3n$. Para a simulação foram considerados estágios intermediários relacionados a ativação dos elementos de concreto, já que as cargas foram aplicadas após 28 dias da

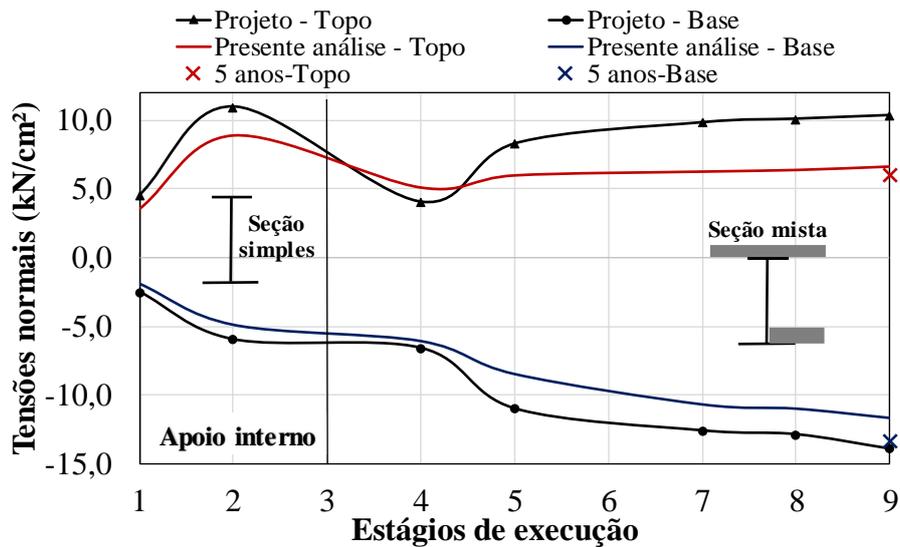
concretagem das estruturas de concreto, para o modelo, 28 dias após sua ativação. Assim, nos gráficos dos resultados os estágios 3 e 6 são estes associados à ativação destes elementos no modelo e por isso há uma diferença entre o número de estágios da Tabela 1 e o disposto na Figura 5.

Observa-se na Figura 5 que os resultados do modelo acompanham as tendências destacadas nos resultados do projeto, com menores variações nos estágios finais, como é esperado pois a estrutura já está finalizada. Destaque para o perfil de aço (Figuras 5-a e 5-b), cujos resultados comparativos indicam valores mais conservativos obtidos no projeto, o que era esperado, uma vez que as análises em elementos finitos geralmente apresentam resultados mais próximos das solicitações reais das estruturas e o desenvolvimento de projetos considera diferentes ponderados e fatores de segurança que majoram as solicitações. Por outro lado, para as lajes de concreto (Figura 5-c) observa-se que as solicitações do modelo numérico são mais relevantes que as tensões determinadas no projeto e próximas aos limites resistentes do material ($0,355 \text{ kN/cm}^2$ em tração e $1,065 \text{ kN/cm}^2$ em compressão) ao final da execução. Acredita-se que as diferenças observadas sejam associadas às metodologias de avaliação dos efeitos de fluência e retração, que no modelo numérico são mais realistas. Além disso, a laje inferior começa a sofrer os efeitos de retração junto da finalização da concretagem do trecho superior, além também dos efeitos associados ao envelhecimento material e as variações nas propriedades de resistência que podem intensificar as diferenças observadas.

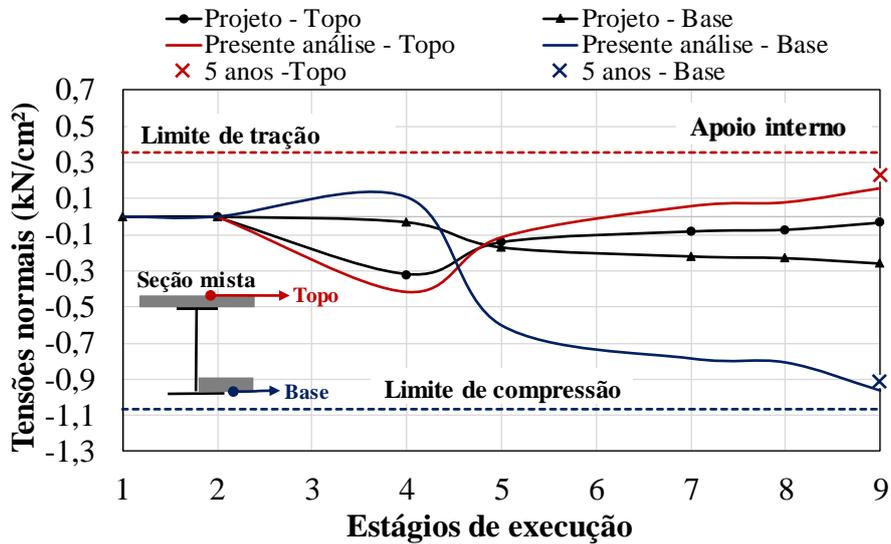
Em análises de longa duração, espera-se que os resultados dos cálculos normativos sejam mais indicativos das solicitações estruturais após vários anos da execução, quando os efeitos diferidos já estariam mais ou menos estabilizados. Assim, avaliou-se também as tensões desenvolvidas no concreto após 5 anos do início da construção, os valores com o marcador X, e observa-se uma pequena variação destes resultados, mas ainda assim há uma diferença relevante das respostas neste período com relação projeto. Por outro lado, os deslocamentos (Figura 5-d) apresentaram resultados comparativos mais ajustados, ajustando-se melhor para o período de 5 anos, como esperado.



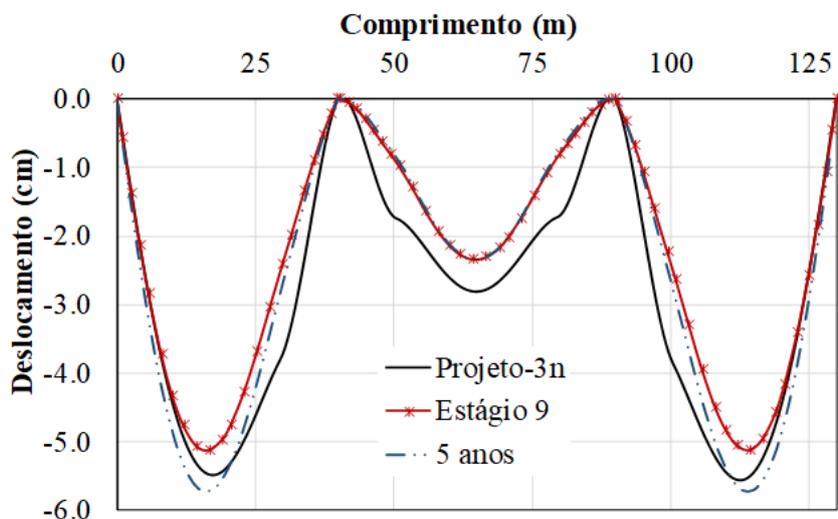
(a) Resultados para as vigas metálicas – seção do centro do vão.



(b) Resultados para as vigas metálicas – seção sobre apoios.



(c) Resultados para as lajes de concreto – seção sobre apoios.



(d) Resultados dos deslocamentos ao longo do comprimento.

Figura 5 – Resultados comparativos.

Conclusões

Estudar o desenvolvimento das solicitações no decorrer do processo de construção das estruturas é uma etapa importante ao longo de todo o desenvolvimento do projeto e também da execução, uma vez que as informações corretas e precisas representam de forma mais adequada o comportamento estrutural e auxiliam no planejamento e atuação em intervenções quando de alguma eventualidade. A ferramenta computacional apresentada neste estudo, VIMIS, mostrou-se com grande potencialidade para o estudo de processos construtivos em pontes com a inclusão de análises de longa duração, destacando também sua capacidade na análise de estruturas mistas cuja análise adequada é um desafio dada as particularidades do comportamento dos materiais que trabalham em conjunto.

A análise da Ponte Caynarachi indicaram que as determinações de projeto se mostram mais adequadas para o perfil de aço, com resultados conservadores. Entretanto, para as lajes de concreto, foi verificado que as determinações normativas podem estar subestimando as solicitações devido a deficiências nas previsões dos efeitos de longa duração indicando tensões inferiores às que podem estar efetivamente ocorrendo nos elementos estruturais e que refletem, com menor intensidade, nos valores de deslocamentos. Estas observações reforçam a importância da consideração destes efeitos na análise estrutural e também nas combinações empregadas nas etapas de desenvolvimento de projetos além da necessidade de modelos normativos mais adequados para as respostas de fluência e retração.

Referências

- BERGENUDD, JENS; BATTINI, JEAN-MARC; CROSETTI, ROBERTO; PACOSTE, COSTIN. Dynamic testing and numerical modelling of a pedestrian timber bridge at different construction stages. *Engineering Structures*, p.1-10, 2023.
- BRANCO, HUGO ALBINO PIQUER. Colapsos de pontes: Lições aprendidas. 2013. 73 f. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, p.73, Lisboa, Portugal, 2013.
- BUTLER, LIAM J.; LIN, WEIWEI; XU, JINLONG; GIBBONS, NIAMH; ELSHAFIE, MOHAMMED. E. B.; MIDDLETON, CAMPBELL R. Monitoring, modeling, and assessment of a self-sensing railway bridge during construction. *Journal of Bridge Engineering*, vol. 23, no. 10, p. 1-16, Oct. 2018.
- CONSOL-ENGENHEIROS CONSULTORES. Viaduto Batalha dos Guararapes. Belo Horizonte, Brasil., , p. 1–19, 2014.
- DEZI, LUIGINO; GARA, FABRIZIO; LEONI, GRAZIANO. Construction sequence modelling of continuous steel-concrete composite bridges decks. *Steel and composite structures*, vol. 6, no. 2, p. 123–128pp., 2006.
- HANAFY, E.A.; EMERY, J.J. Advancing face simulation of tunnel excavations and lining placement. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 18, no. 6, p. 120, Dec. 1981.
- MIRANDA, MARCELA P., JORGE LP TAMAYO, AND INACIO B. MORSCH. Reassessment of viscoelastic response in steel-concrete composite beams. *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 81, no. 5, p. 617–631, 2022a.
- MIRANDA, MARCELA PALHARES; TAMAYO, JORGE PALOMINO; MORSCH, INÁCIO BENVEGNO. Benchmark Examples for Structural System Changes: Analytical and Numerical Approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2022b.
- NARASINGARAO, PRABHAKAR; NARAYANAN, SUBRAMANIAN. Collapse of Kolkata flyover - practitioner's perspective. *The Bridge & Structural Engineer*, vol. 47, p. 79–84, 2017.
- OZCELIK, MEHMET; TUTUS, OGUN. An investigation on Botan Bridge (Siirt – Turkey) collapse during construction. *Structures*, vol. 25, p. 268–273, Jun. 2020.
- PÓVOAS, R. Modelos não-lineares de análise e dimensionamento. 1991. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, p.422, Porto, Portugal, 1991.
- SÁNCHEZ, BÁRBARA DOS SANTOS; TAMAYO, JORGE PALOMINO; MORSCH, INÁCIO BENVEGNO; MIRANDA, MARCELA PALHARES. A nonlinear geometric model for pre-stressed steel–concrete composite beams. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, no. 5, p. 233, 2 May 2021.

TAMAYO, JORGE LUIS PALOMINO; FRANCO, MARINA IARA; MORSCH, INÁCIO BENVEGNU; DÉsir, JEAN MARIE; WAYAR, ALVARO MARCELO MOSCOSO. Some Aspects of Numerical Modeling of Steel-Concrete Composite Beams with Prestressed Tendons. *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 16, no. 7, 2019.

ZHONG, JIAN; MAO, YONGHENG; YUAN, XINZHE. Lifetime seismic risk assessment of bridges with construction and aging considerations. *Structures*, p.2259-2272, 2023.

ZHU, LI; WANG, YING; ZHOU, GUANGPAN; HAN, BING. Structural health monitoring on a steel-concrete composite continuous bridge during construction and vehicle load tests. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, p. 1–16, 13 Sep. 2020.