



A: XXXIX-0000

ESTUDO DE CASO: ANÁLISE NUMÉRICA PRELIMINAR DA PONTE CAYNARACHI NO PERU CONSIDERANDO SEU FASEAMENTO CONSTRUTIVO

CASE STUDY: PRELIMINARY NUMERICAL ANALYSIS OF THE CAYNARACHI BRIDGE IN PERU CONSIDERING ITS CONSTRUCTIVE PHASING

Marcela P. Miranda (1); Jorge L. P. Tamayo (2); Inácio B. Morsch (3)

(1) Eng. Civil, MSc., aluna de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

(2) Dr. Prof., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

(3) Dr. Prof., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Endereço para correspondência: m_palhares@yahoo.com; (A) Apresentador

Área temática: Análise estrutural: Métodos Computacionais.

Resumo

Durante a fase de construção, diferentes alterações de geometria, condições de contorno e carregamentos são responsáveis por provocar variações de deslocamentos e redistribuições de forças internas em estruturas hiperestáticas, as quais são ainda mais relevantes quando os efeitos viscoelásticos são considerados na análise. Estas redistribuições podem afetar significativamente o comportamento da estrutura em situação de serviço e mesmo provocar colapsos estruturais ainda durante a execução. Portanto, com o propósito de contribuir para uma melhor compreensão dos efeitos associados ao processo de execução de pontes mistas de aço-concreto, este trabalho apresenta um estudo de caso com análise numérica das etapas de construção da Ponte Caynarachi, construída no Peru. Um modelo tridimensional de elementos finitos usando o programa VIMIS (CEMACOM/UFRGS), é empregado na simulação, considerando os efeitos de longa duração. A sequência construtiva é modelada utilizando a metodologia *Ghost Structures*. Os resultados preliminares da análise são comparados aos dados do projeto da ponte e demonstram a importância da consideração da análise construtiva para a obtenção de respostas mais realísticas para o comportamento destas estruturas.

Palavras-chave: processo construtivo, simulação numérica, pontes mistas, ghost structures.

Abstract

During the construction phase, different changes in geometry, boundary conditions and loads are responsible for causing variations in displacements and redistribution of internal forces in hyperstatic structures, which are even more relevant when viscoelastic effects are considered in the analysis. These redistributions can significantly affect the behavior of the structure in service situations and even cause structural collapse during construction. Thus, with the purpose of contributing to a better understanding of the effects associated with the execution process of steel-concrete composite bridges, this paper presents a case study with numerical analysis of the construction stages of a composite beam bridge, Caynarachi Bridge, built in Peru. A three-dimensional finite element model using the program VIMIS (CEMACOM/UFRGS), is employed in the simulation, considering long duration effects. The construction sequence is modeled using the Ghost Structures methodology. The preliminary results of the analysis are compared to the bridge design data and demonstrate the importance of considering of the construction analysis to obtain more realistic responses for the behavior of these structures.

Keywords: construction process, numerical simulation, composite bridges, ghost structures.



1. INTRODUÇÃO

Ao longo do faseamento construtivo, as diferentes alterações de geometria, condições de contorno e carregamentos são responsáveis por provocar variações de deslocamentos e redistribuições de forças internas nas estruturas. Estes esforços podem ser os mais significativos dentro do projeto de uma ponte, principalmente quando são considerados os efeitos de fluência e retração do concreto. Destaca-se que dentre as causas relacionadas aos colapsos estruturais, as mais recorrentes são erros de dimensionamento e falhas durante as etapas de construção (Branco, 2013). A Fig.1 ilustra alguns colapsos durante a fase de execução que ocorreram nos últimos anos, tais como: a ponte de concreto Botan Bridge na Turquia (Ozcelik e Tutus, 2020) e a Ponte Chirajara na Colômbia que apresentaram colapso em 2018, Viaduto Kote na Índia que falhou em 2016 (Narasingarao e Narayanan, 2017) , e Viaduto Batalha dos Guararapes no Brasil (Consol, 2014), que apresentou colapso em 2014.



Figura 1. Casos de colapsos de pontes/viadutos durante a execução. (a) Ponte Chijara – Colômbia. (b) Viaduto Kote – Índia.

A fim de minimizar possíveis falhas das pontes durante sua fase de construção, é importante se fazer uma correta previsão do seu comportamento estrutural antes de sua execução, e a modelagem numérica é uma ferramenta interessante para esta tarefa. Nos modelos de análise do processo construtivo de estruturas mistas, alguns fatores devem ser avaliados com maior atenção, como por exemplo, a existência de escoramento e a fase na qual a ligação mista é efetivada, os quais afetam principalmente a sollicitação dos perfis de aço. Por outro lado, a tecnologia de execução empregada nos tabuleiros, se concreto moldado *in-loco* ou pré-moldado, além também da sequência de execução das lajes, são fatores importantes no estudo da fissuração dos elementos e no desenvolvimento das sollicitações. A sequência de execução otimizada, na qual as regiões de sollicitação negativa são executadas alternativamente com os vãos com sollicitação positiva, é capaz de reduzir em 20% os esforços sobre as lajes na zona dos apoios (Dezi *et al.*, 2006).

Nos de Butler *et al.* (2018) e Zhu *et al.* (2020), estruturas reais foram monitoradas ao longo do processo de execução e posteriormente à esta etapa. Em ambos os trabalhos há um destaque para um aumento acelerado e significativo das deformações nos componentes da seção mista logo após a concretagem da seção e estabilização desta medida quando a ligação mista é efetivada. No



decorrer do processo, e também em situação de utilização, estas deformações podem ser incrementadas a níveis significativos e afetar o comportamento estrutural.

Neste contexto, este trabalho apresenta uma avaliação da Ponte Caynarachi – Peru ao longo de sua execução utilizando o programa chamado VIMIS, desenvolvido pelos autores no PPGE/UFGRS. 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 demonstrar a importância desta análise na fase de estudo e desenvolvimento de projetos, nosso objetivo é validar o módulo de processos construtivos implementado no programa e apresentar a potencialidade da ferramenta desenvolvida no grupo de pesquisa.

2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Neste trabalho, foi considerado 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. Na sequência, é apresentada uma descrição sucinta do modelo de elementos finitos utilizado. Para mais detalhes recomenda-se ler Miranda *et al.* (2022a, 2022b), Sánchez *et al.* (2021), Tamayo *et al.* (2019).

2.1. 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, que neste estudo representa as deformações por retração.

A determinação da deformação à fluência (ε_{cc}) é realizada a partir da função específica de fluência $C(t, t')$, obtida por meio da aproximação da série de *Dirichlet*. Nesta metodologia, a função de fluência é definida como 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 ($E_i(t')$) são obtidos pelo procedimento dos métodos de mínimos quadrados, para cada instante de tempo t' de aplicação de carregamento.

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

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.

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

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

2.2. 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.

2.3. 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. 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 com 4 nós e 6 graus de liberdade, três translações e três rotações.

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.

3. ESTUDO DE CASO: PONTE CAYNARACHI

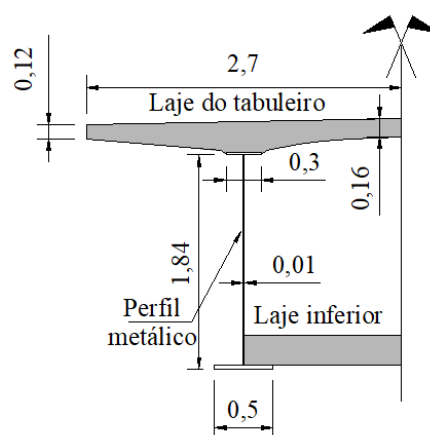
A ponte Caynarachi, apresentada na Fig.2(a), é uma ponte contínua, semi-integral, com três vãos. A estrutura consiste em uma ponte em viga mista, com duas longarinas de aço, composta por dois vãos de extremidade com 40 m e um vão central de 50 m. A ponte possui o tabuleiro de



concreto com seção variável, como mostra a Fig.2(b), e uma laje inferior retangular disposta na região dos apoios, com comprimento total de 21 m, 10,5 m para cada lado dos apoios. Ao longo do comprimento das vigas de aço foram dispostos enrijecedores espaçados a cada 10 m.



(a)



(b)

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

Segundo os documentos disponibilizados, o processo de execução da ponte foi iniciado e finalizado em 2006, sendo os perfis de aço executados pelo método de deslocamentos sucessivos, (*Incremental Launching Method*) e as lajes de concreto foram executadas com moldagem *in loco*, sem escoramentos. Após o lançamento dos perfis, foram concretadas a lajes inferiores e posteriormente o tabuleiro para qual foi empregada uma sequência construtiva otimizada, executando primeiramente as lajes sobre apoios e depois os demais trechos. Neste trabalho foi avaliado o processo de execução a partir da finalização do lançamento das vigas de aço, assim como considerado na memória de cálculo do projeto, como apresenta a Tab.1. Cabe ressaltar que o tempo de cura considerado para o concreto foi de 14 dias.

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.

As lajes do tabuleiro sobre os apoios internos possuem um cabo de protensão reto disposto no centro da laje, com comprimento total de 21 metros. Devido a uma limitação do modelo numérico, a força de protensão foi aplicada como cargas nodais distribuídas ao longo da direção



transversal do tabuleiro. Para a modelagem da seção transversal do tabuleiro, foi empregado um fator de penalização das camadas, como mostra a Fig.3, sendo modelada originalmente uma seção retangular que se aproxima da seção original a partir da anulação de camadas, para quais é atribuído o parâmetro $\beta=0$. A distribuição das camadas foi definida de forma a aproximar-se da inércia e rigidez da seção variável. Considerando a simetria da seção transversal, apenas uma viga foi considerada para a simulação, cujo modelo é apresentado na Fig.3.

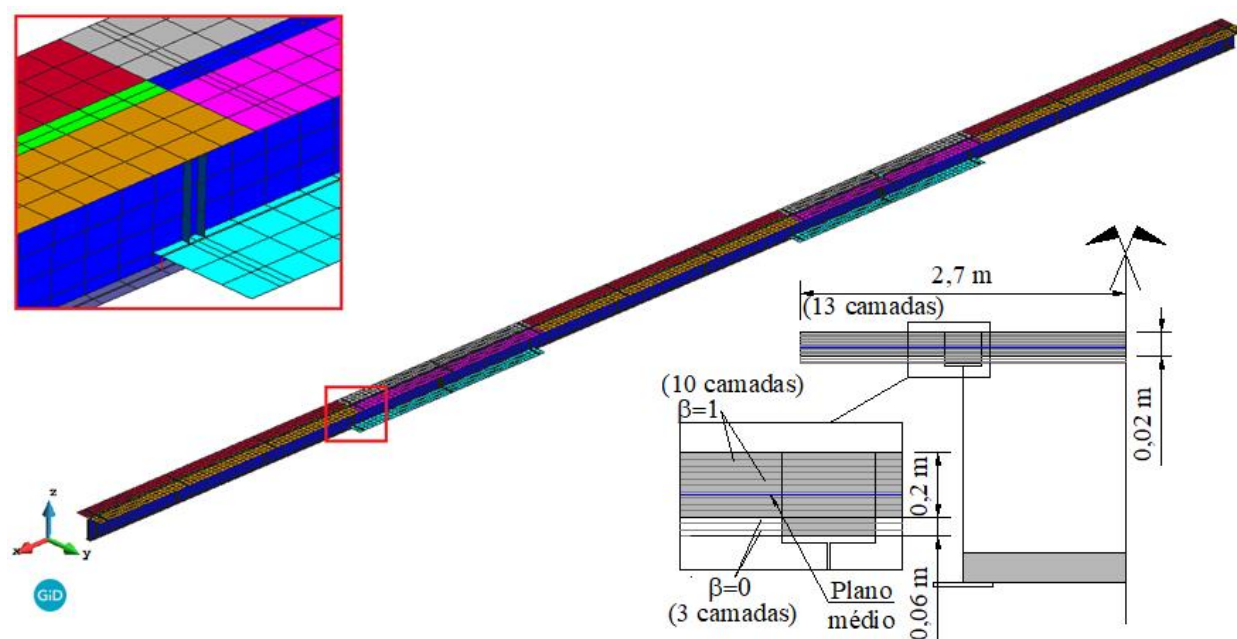


Figura 3. (a) Modelo de elementos finitos para uma viga. (b) Seção transversal modelada.

As propriedades adotadas são: módulo de elasticidade do concreto $E_{28} = 32140$ MPa, $Poisson = 0,2$, resistência à compressão $f_{c28} = 35,5$ MPa, módulo de elasticidade do perfil = 199948 MPa, $poisson = 0,3$, 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.

Avaliou-se as tensões desenvolvidas nos componentes da ponte, viga de aço e lajes de concreto, em comparação aos valores disponibilizados na memória de cálculo de projeto, como apresenta a Fig. 4. A simulação foi estendida até o período de 5 anos. Sabe-se que as normas de projeto para estruturas mistas empregam uma relação modular ($n = E_s/E_c$) 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 $3n$.

Como observado nos gráficos, os resultados do modelo atendem bem ao comportamento determinado por norma, seguindo as mesmas variações e tendência de manter-se constante nos estágios finais, como é esperado pois a estrutura já está finalizada. Especificamente para o perfil de aço, percebe-se que a norma apresenta valores mais conservativos para a seção fora da região dos apoios, o que é esperado, porém bem mais próximos ao do modelo numérico na região dos



apoios. Considerando que as análises em elementos finitos geralmente apresentam resultados mais próximos das solicitações reais das estruturas, seria mais adequado que na região dos apoios os resultados fossem mais conservativos principalmente por ser a mais solicitada. Com relação as lajes de concreto, as solicitações do modelo numérico são bem mais relevantes que as tensões determinadas por norma, ficando muito próximas aos limites resistentes do material (0,355 kN/cm² em tração e 1,065 kN/cm² em compressão) ao final da execução. Acredita-se que as diferenças observadas sejam devidas as metodologias de avaliação dos efeitos de fluência e retração, que no modelo numérico são mais realistas. Por outro lado, os deslocamentos apresentaram resultados comparativos melhores, ajustando-se bem para o período de 5 anos indicando a adequada previsão normativa em termos gerais dos resultados avaliados.

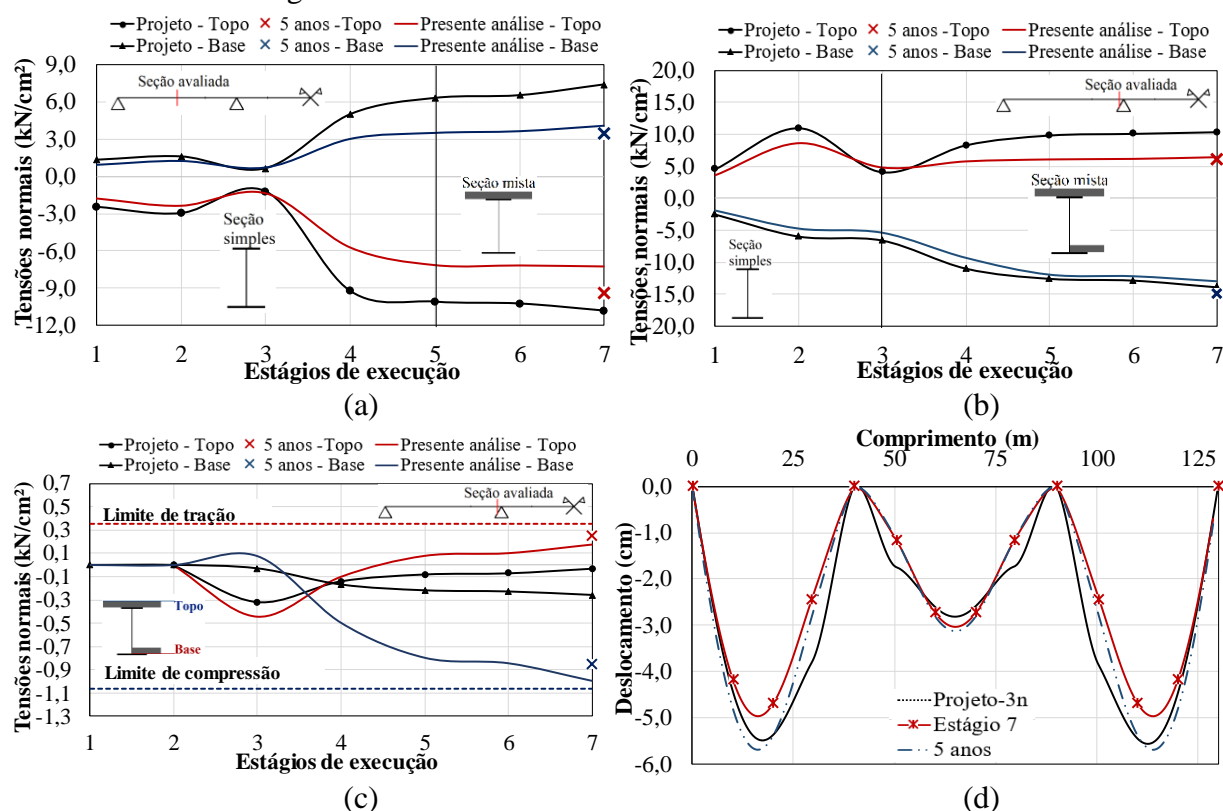


Figura 4. (a) Tensões no perfil de aço – seção de extremidade. (b) Tensões no perfil de aço – seção sobre apoios. (c) Tensões nas lajes de concreto. (d) Deslocamentos verticais.

4. CONCLUSÕES

A verificação das etapas de execução das estruturas é uma análise crucial para a avaliação mais realista do comportamento estrutural. A ferramenta computacional apresentada neste estudo mostrou-se com grande potencialidade para o estudo de processos construtivos em pontes com a inclusão de análises de longa duração. Com relação ao estudo com a ponte Caynarachi, as determinações de projeto mostram-se bem mais adequadas para o perfil de aço, com resultados conservadores, porém com relação ao concreto foi verificado que as determinações normativas podem estar subestimando as solicitações devido a deficiências nas previsões de longa duração.



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro fornecido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e (UFRGS).

REFERÊNCIAS

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 Benvegnu. Benchmark Examples for Structural System Changes: Analytical and Numerical Approaches. **Archives of Computational Methods in Engineering**, 2022b.

Narasimgarao, 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 Benvegnu; 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.

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.