



## **Vigas Vagonadas - Avaliação Numérica e Experimental de Reforço em Pontes Ferroviárias.**

**Delvined Rocha de Souza<sup>1</sup>, Caio Vinícius Scholgel<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Rumo Logística / Engenharia de Infraestrutura de Via / delvined.souza@rumolog.com

<sup>2</sup> Rumo Logística / Engenharia de Infraestrutura de Via / caio.scholgel@rumolog.com

### **Resumo**

Este trabalho descreve a aplicação de estrutura vagonada em uma ponte ferroviária. A ponte foi construída no município de São Carlos – SP, possui 84m de extensão em 3 vãos isoestáticos em aço sendo os vãos de aproximação vigas de almas cheias com 24 metros, e o vão central vigas vagonadas com 36 metros de extensão. A ponte foi montada sobre aterro existente acima de uma galeria de tijolos e pedras argamassadas, responsável pela travessia do córrego Monjolinho em aterro ferroviário. Devido às condições de acesso e inviabilidade de içamento, a estrutura foi posicionada por translação, sendo a proximidade do local de montagem e peso da estrutura parâmetros estressados ao longo do projeto. A solução em vigas de alma cheia, estrado inferior e o vão central reforçado com viga vagonada resultou na eficiência estrutural que tornou factível a obra. A implantação da OAE foi faseada, buscando minimizar as interferências na operação. A configuração em viga vagonada foi executada após a disponibilidade de gabarito vertical do aterro. Nesse período provisório, foram realizadas restrições de velocidade, atenuação na geometria da via, instrumentações, avaliações numéricas e controles de deformações. Após a implantação da viga armada, a operação com velocidade e geometria a pleno foi reestabelecida. A associação de modelos numéricos com instrumentação permitiu capturar os efeitos dos tirantes e montantes da viga vagonada no arranjo estrutural do vão de 36 metros. Foram observadas reduções nas tensões e deformações, bem como aumento de rigidez. Avaliações de fadiga foram realizadas com a utilização de dados experimentais e modelos em elementos finitos, sendo possível avaliar detalhes complexos em elementos soldados com ciclos de tração.

### **Palavras-chave**

Vigas Vagonadas; Instrumentação; Fadiga; Pontes Ferroviárias.

## Introdução

A ponte ferroviária sobre o córrego Monjolinho foi construída entre os anos de 2023 e 2024, com o objetivo de atender a vazão requerida pelo córrego, a qual não era suportada pela antiga galeria de drenagem. Diversos requisitos conflitantes de engenharia foram enfrentados durante o projeto e execução da estrutura, dentre os desafios destacam-se:

- Construção da ponte com a linha em operação;
- Compatibilização com a estrutura da antiga galeria sem interferência na vazão atual;
- Dispositivos da rede de drenagem e esgoto do município;
- Dificuldade de acesso para içamento de carga;
- Prazo de execução para adequação da capacidade de vazão.



*Figura 1 - Imagem aérea da Ponte Ferroviária sobre o córrego Monjolinho - São Carlos -SP*

## Projeto Conceitual

Os principais requisitos a serem atendidos durante a fase de projeto eram:

- Ponte lastreada;
- TB-360
- Execução da Obra com linha em operação.
- Vazão do canal não inferior a  $248\text{m}^3/\text{s}$

As condições de contorno foram extremamente desafiadoras, uma vez que existiam algumas interferências para serem contornadas, sendo o vão principal da ponte determinado pelos obstáculos presentes resultando no mínimo em 36 metros de extensão, conforme figura 2.

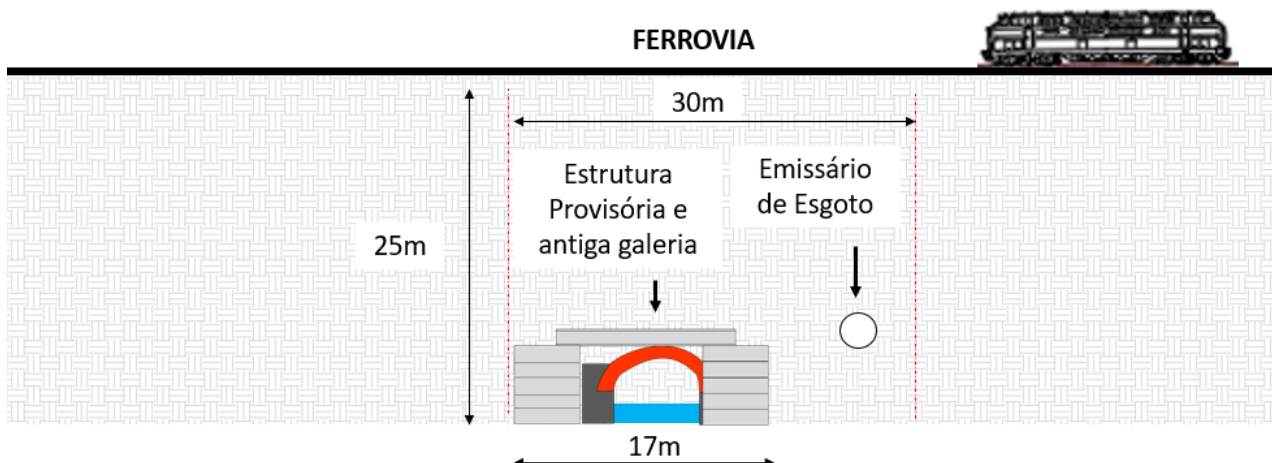


Figura 2 - Interferências existentes para projeto da nova estrutura

Com o vão central definido e devido a inviabilidade de içamento de estruturas premoldadas pela interferência com a operação ferroviária, uma ponte metálica se mostrava mais factível para o compromisso a ser cumprido. Os vãos de aproximação foram definidos após o *trade-off* realizado entre estabilização do talude e vão mínimo das extremidades, com os taludes estabilizados em solo grampeado, pode-se reduzir os vãos de aproximação para 24 metros, totalizando 84 metros de extensão de ponte em 3 vãos isoestáticos metálicos.

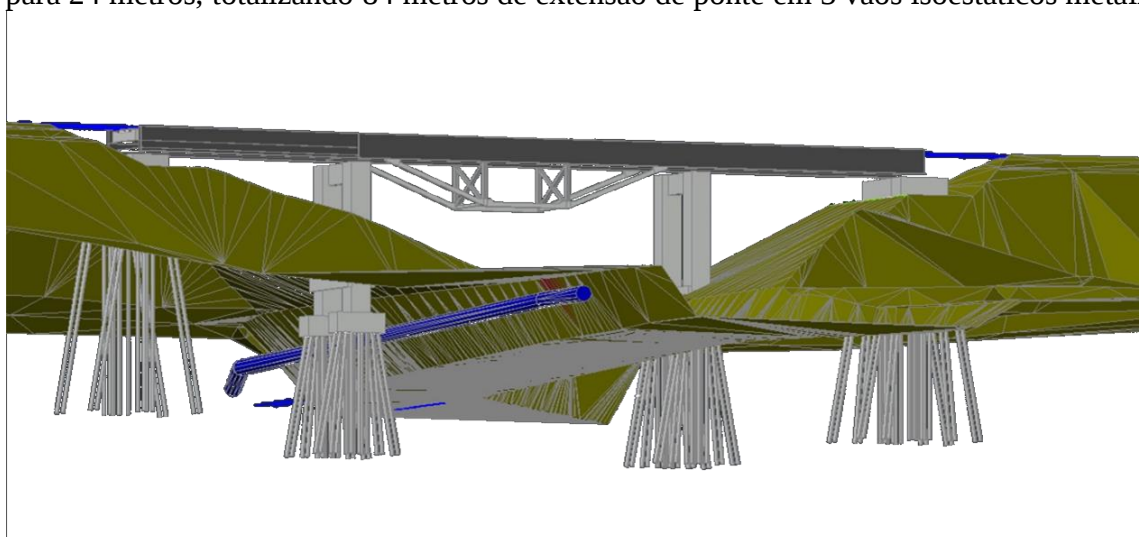


Figura 3 - Solução para interferências sobre o córrego

As vigas principais foram em alma cheia com estrado inferior fechado, configurando um tabuleiro ortotrópico para atender o requisito de ponte lastreada.

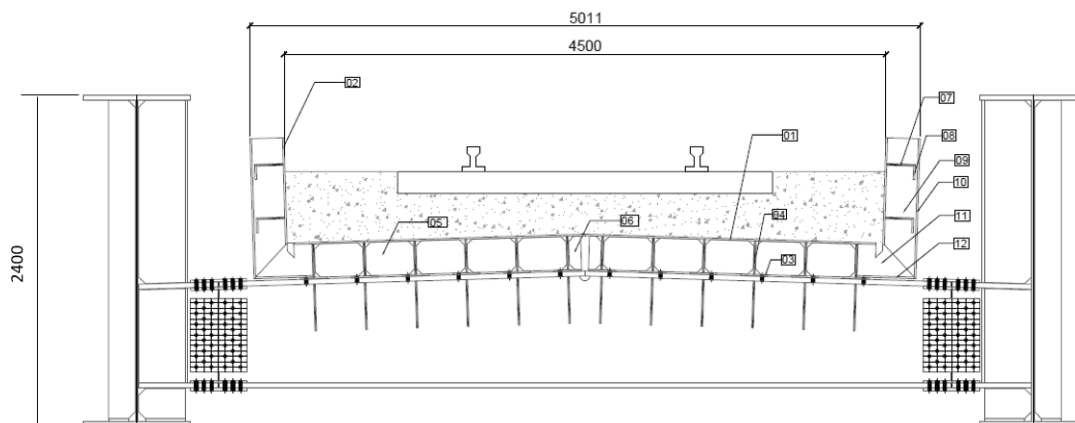
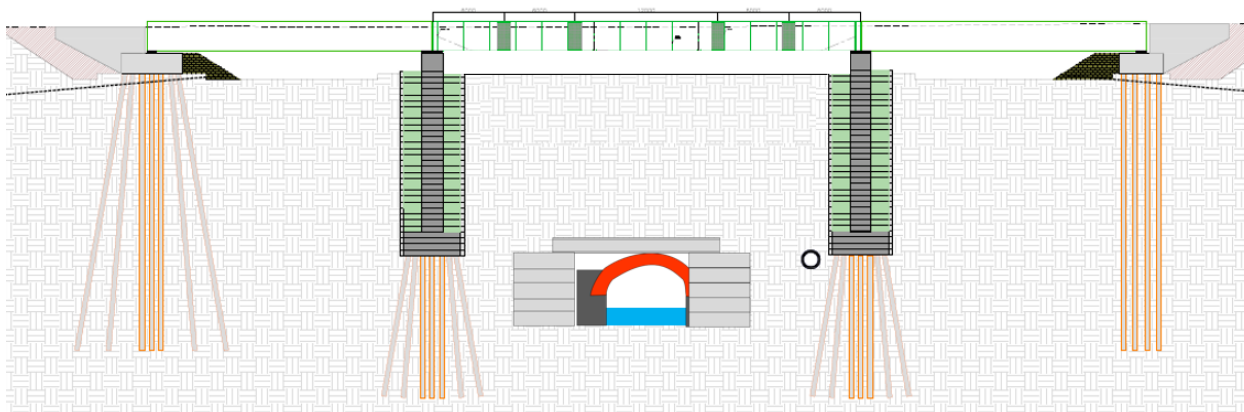


Figura 4 - Seção Transversal da ponte metálica

Com os carregamentos aplicados, o vão central de 36 metros passou a não atender os requisitos de esbeltez da alma da viga principal e de deformação. Dada as restrições impostas, não havia possibilidade de reduzir o vão central, com a dificuldade de içamento de peças, não era possível obter outras configurações de viga com maior altura. Outra restrição observada foi a matéria prima disponível para execução dentro do prazo emergencial. Devido a estes cenários foi avaliado um reforço no vão central.

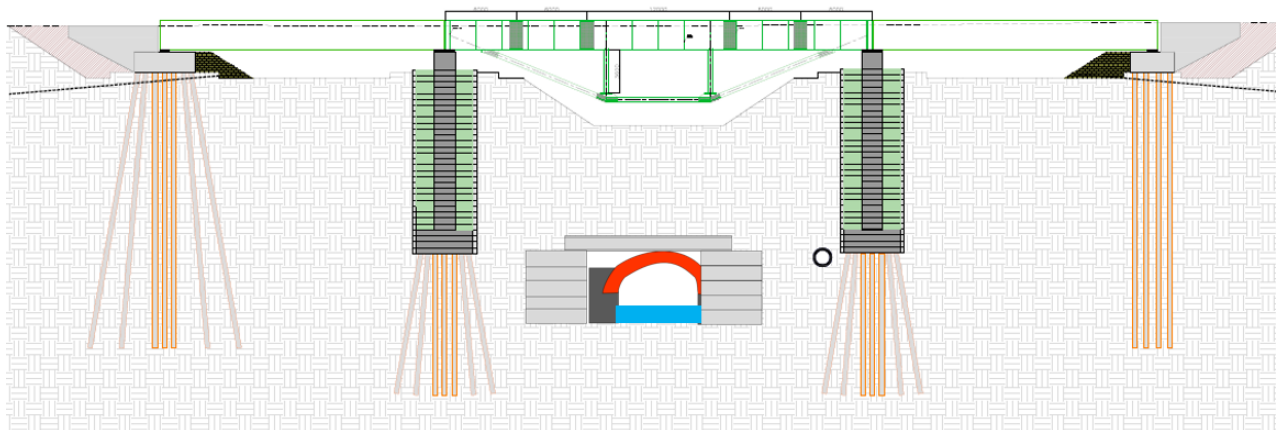
O refoço precisava ter alta eficiência estrutural, minimizando o peso próprio adicionado na estrutura. Dessa forma, foram estudadas configurações em vigas armadas, que consistem no implemento de elementos treliçados com intuito de aumentar a rigidez global da viga principal, reduzindo por sua vez as deformações totais e permitindo atender o critério de esbeltez não cumpridos anteriormente.

Pelo fato de a estrutura ser montada em cima do aterro ao lado da linha operacional, os tirantes só poderiam ser aplicados após as frentes de escavação sob a ponte avançarem. Isso implicou em uma condição provisória da estrutura. Para atender os critérios de engenharia durante a fase provisória, a operação teve sua velocidade de circulação restringida, atenuando o impacto vertical e os esforços de força centrífuga sobre a ponte.



*Figura 5 - Condição provisória da superestrutura*

Com a disponibilidade de gabarito vertical do aterro, os elementos da viga armada foram instalados na ponte. Nessa condição, o reforço passava a absorver somente a sobrecarga ferroviária, uma vez que a estrutura na condição provisória já estava posicionada e em operação.



*Figura 6 - Condição definitiva da superestrutura*

Devido a complexidade da estrutura e das ligações realizadas, estudos aprofundados foram realizados para verificar a condição de trabalho da estrutura na condição provisória e definitiva. Foram realizadas instrumentações e simulações numéricas pelo método dos elementos finitos.

Avaliações Numéricas

Foi realizada a modelagem global simplificada para capturar o comportamento estrutural, obtendo respostas lineares para geometria e material, não linearidade de contatos foram capturadas através de modelos locais.

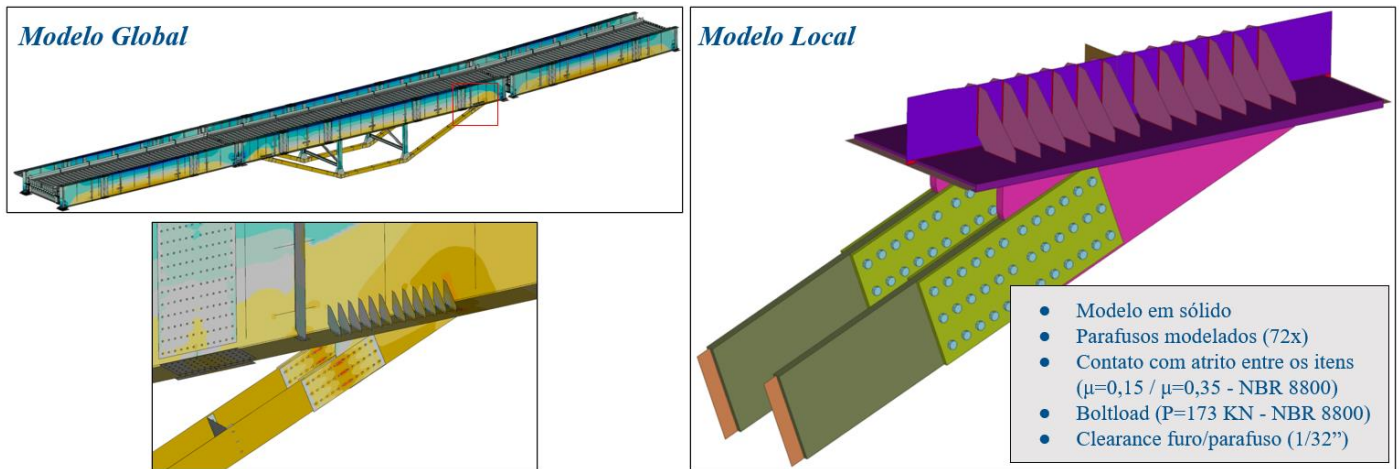


Figura 7 - Modelagem Numérica da Ponte

Após a realização da modelagem numérica, o plano de trabalho seguiu conforme ilustrado na figura 8.



Figura 8 - Plano de trabalho

Instrumentação condição provisória

Os sinais observados apresentaram uma boa correlação com o modelo numérico elaborado, demonstrando que o FEA foi capaz de reproduzir os principais picos, conforme demosntrado na figura 9.

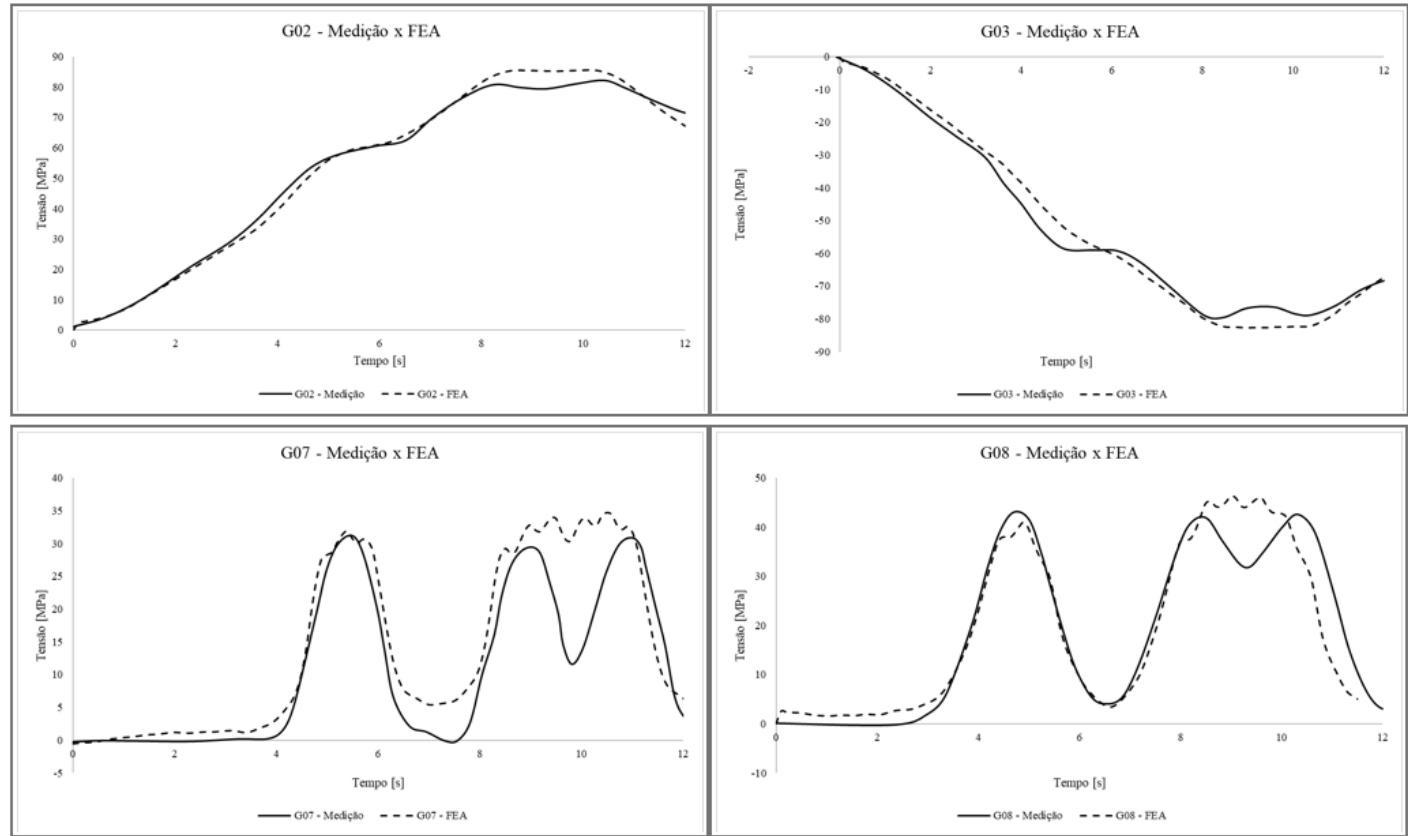


Figura 9 Comparação Instrumentação x Modelagem numérica

Instrumentação condição definitiva

Quando instrumentada na condição definitiva, a análise das acelerações permitiu identificar uma mudança no primeiro modo de ressonância do acelerômetro posicionado no meio do vão de 36 metros, o que confirma a hipótese de aumento de rigidez pela aplicação dos tirantes na viga principal, conforme observado na figura 10.

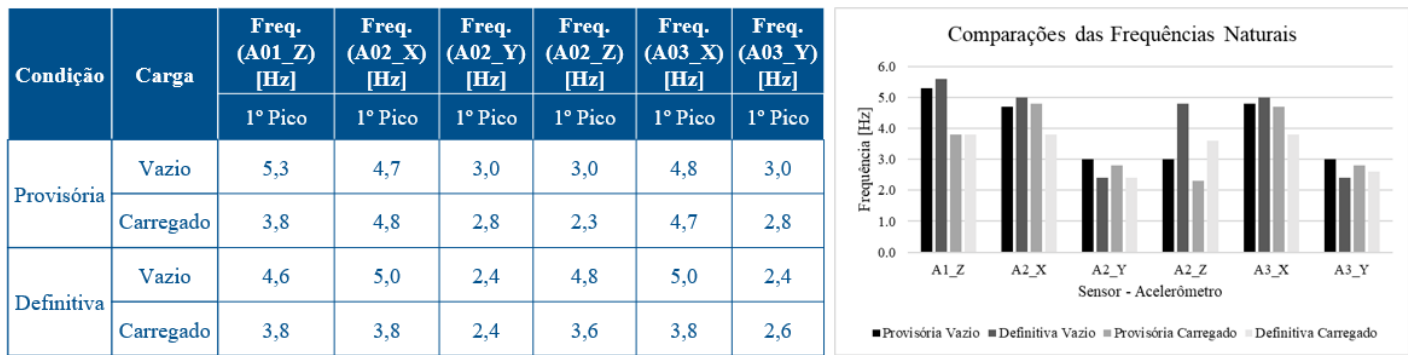


Figura 10 - Comparação das acelerações entre campanhas

Os extensômetros identificaram redução na ordem de 75% nas leituras de tensão nos canais 1, 2, 3 e 4, posicionados também na viga principal. Dessa forma, foi constatado que parte dos carregamentos passaram a ser suportados pelos tirantes, conforme exposto na figura 10.

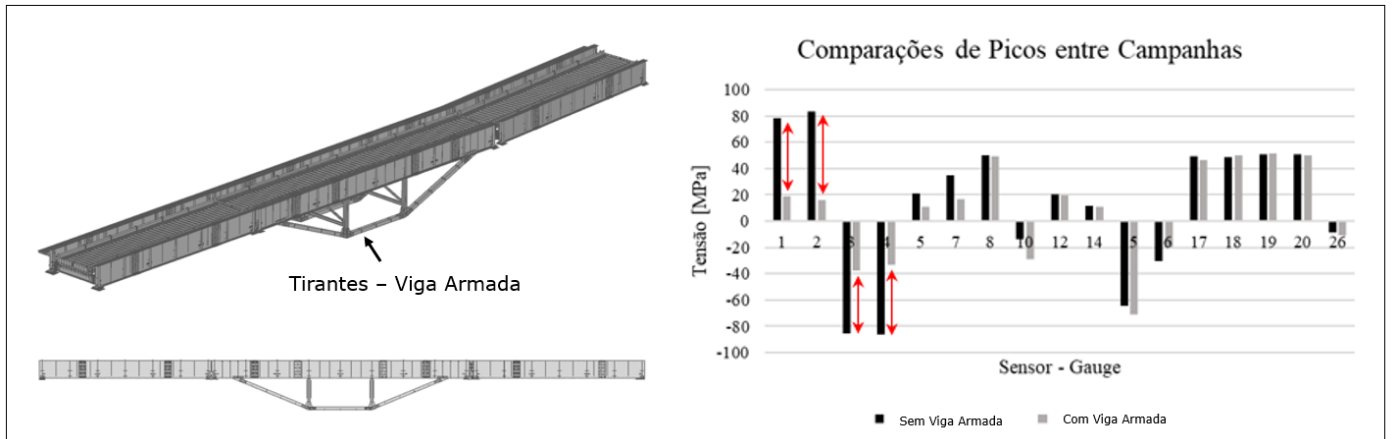


Figura 11 - Comparação dos extensômetros entra campanhas

## Conclusões

Com base nos resultados expostos para os dados de vibração e tensão entre a condição provisória e definitiva, pode-se concluir que a utilização da solução em viga vagonada foi satisfatória. Os tirantes atenderam o critério de reforçar e enrijecer com pouca massa adicionada nas vigas principais, foram obtidas reduções de cerca de 75% na tensão máxima na viga principal, e reduções na ordem de 50% no primeiro modo de vibração no eixo vertical.

Através da aplicação desta solução, foi possível manter a linha de produção padronizada para as estruturas em aço da ponte, ganhando em custo e em prazo, fatores que também eram premissas para o projeto.

Por fim, vale ressaltar que através da calibração do modelo em elementos finitos, foram realizadas projeções de vida útil para a fadiga em uma série de elementos. Os resultados também foram satisfatórios para essas análises.

## Referências

ADELI, H. Historic Bridges: Evaluation, Preservation and Management. CRC Press, 2019.

MAZZILLI, C.E.N; ANDRÉ, J.C.; BUCALEM, M. L.; CIFÚ, S.; Lições em Mecânica das Estruturas: Dinâmica. Blucher, 2016.

ENSHAEIAN, A.; GHahremani, B.; RIZZO, P. Structural health monitoring of a lenticular truss bridge: a comprehensive study. Structural Health Monitoring. 2024;23(6):3615-3639. doi:10.1177/14759217231225925