



## **Análise de Elementos Finitos para Validação de Reforços Estruturais em Vigas Longarinas Metálicas de Ponte Mista Ferroviária.**

**Carlos Alberto Medeiros<sup>1</sup>, Hudson Chagas dos Santos<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>FAM / ENGFEA / carlos.medeiros@portalamericas.com.br / carlosmedeiros@engfea.com.br

<sup>2</sup>UFPI / IFPI / PCA ENGENHARIA / hudson@ufpi.edu.br / hudson@ifpi.edu.br / pcaengenharia@ymail.com

### **Resumo**

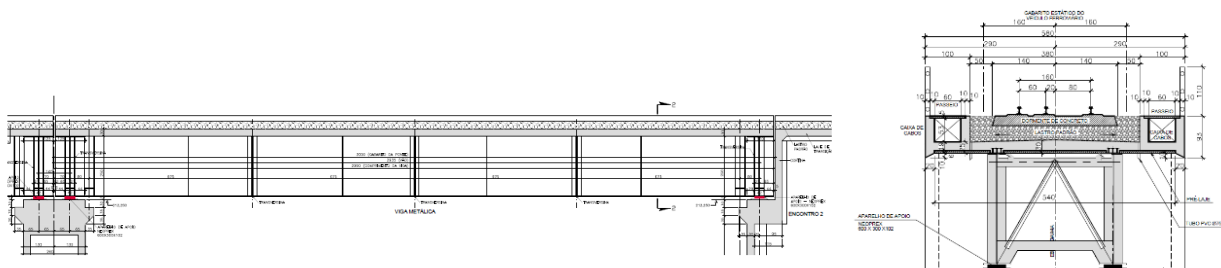
Uma ponte mista ferroviária apresenta uma superestrutura com seção transversal formada por duas vigas longarinas metálicas em perfil I soldado e por uma laje do tabuleiro em concreto armado. Por meio de uma verificação preliminar, constatou-se que o perfil I adotado para as vigas longarinas metálicas da ponte mista ferroviária não atende a requisitos de Estados Limites Últimos de Instabilidade Local da Alma na Flexão (FLA) e de Instabilidade Local por Força Cortante. Logo, reforços longitudinais e transversais foram propostos para a alma do perfil soldado das vigas longarinas metálicas. O presente trabalho apresenta uma análise de elementos finitos com o objetivo de validar reforços estruturais propostos para as vigas longarinas metálicas da superestrutura de uma ponte mista ferroviária de forma a garantir o atendimento aos Estados Limites Últimos associados a Instabilidade Local da Alma na Flexão e de Instabilidade Local por Força Cortante. Inicialmente foi elaborado um modelo de elementos finitos para a superestrutura da ponte mista ferroviária. O modelo de elementos finitos da superestrutura da ponte mista ferroviária foi analisado para um caso de carregamento estabelecido a partir da envoltória de combinações de ações normais últimas de ações permanentes de peso próprio dos elementos estruturais e não estruturais, de ações variáveis de carga móvel ferroviária e de vento lateral. Então, uma análise de elementos finitos de flambagem foi processada para o modelo da superestrutura da ponte mista ferroviária na condição de projeto e apresentou o resultado do primeiro autovalor igual a 0,36 e com o respectivo modo de flambagem acontecendo na alma do perfil das vigas longarinas metálicas e próximo a região dos apoios da viga. Constatou-se assim, a necessidade de reforçar a alma do perfil soldado das vigas longarinas metálicas. Dessa forma, o modelo de elementos finitos da superestrutura da ponte mista ferroviária foi atualizado para incluir reforços longitudinais e transversais para a alma do perfil soldado das vigas longarinas metálicas. Novamente foi processada uma análise de flambagem e que teve como resultado do primeiro autovalor igual a 2,39. No final foram processadas análises não lineares de elementos finitos para a superestrutura da ponte mista ferroviária considerando a condição de projeto e a condição de vigas longarinas reforçadas. A partir da avaliação dos resultados de deslocamentos laterais obtidos pelas análises não lineares, concluiu-se que apenas a condição de vigas longarinas reforçadas atende aos requisitos de Estados Limites Últimos de Instabilidade Local da Alma na Flexão.

### **Palavras-chave**

Ponte mista ferroviária; Reforços estruturais; Análise de elementos finitos; Instabilidade local na flexão.

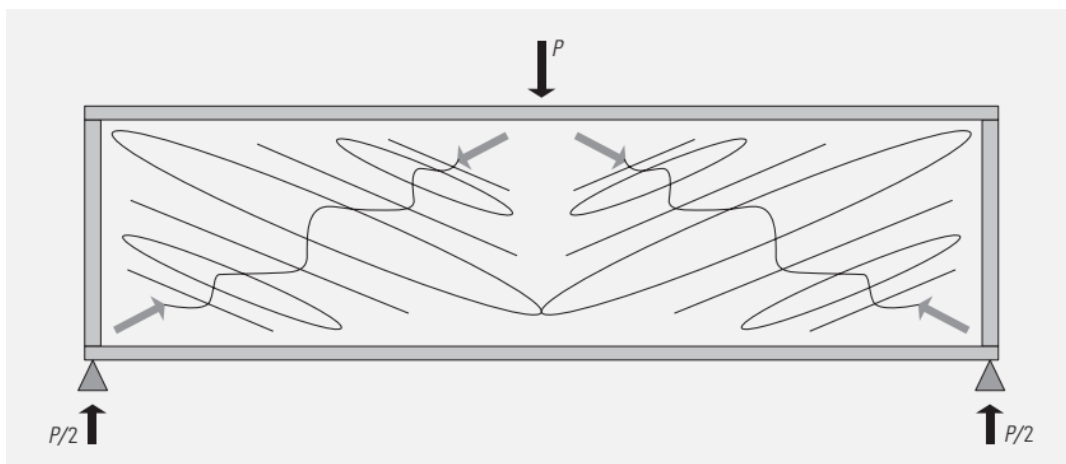
## Introdução

Uma ponte mista ferroviária de 30 m de vão e com superestrutura formada por duas vigas longarinas metálicas em perfil I soldado e por uma laje do tabuleiro em concreto armado, como ilustrada na Figura 1, foi projetada para uma malha ferroviária da região nordeste do Brasil.



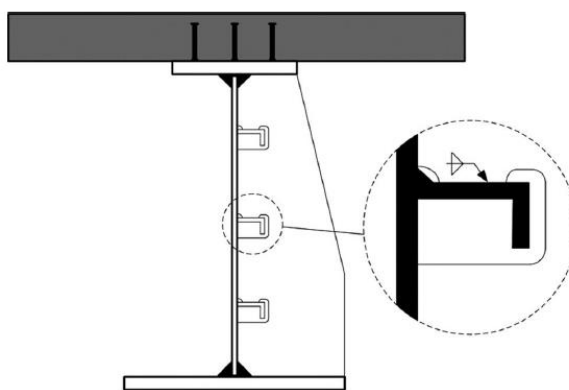
**Figura 1 – Ponte mista ferroviária.**

Numa avaliação preliminar de estabilidade estrutural para o perfil soldado das vigas longarinas metálicas foi constatado que a alma do perfil soldado é esbelta e não atende a requisitos da norma ABNT NBR 8800:2008 referentes a Estados Limites Últimos de Instabilidade Local da Alma na Flexão (FLA) e de Instabilidade Local por Força Cortante FAKURY et al (2016), este sendo ilustrado na Figura 2.



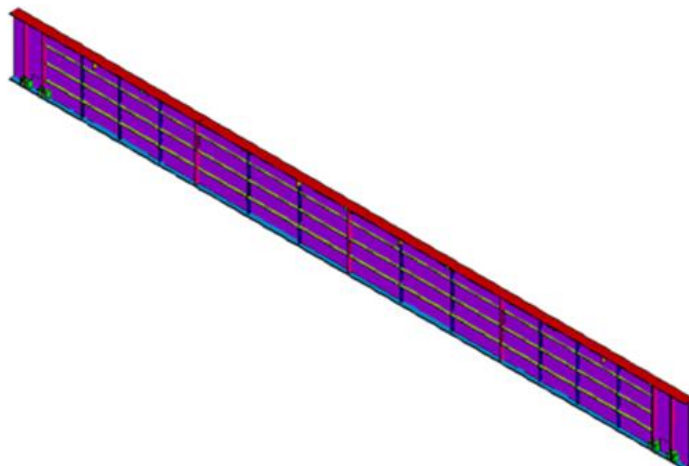
**Figura 2 – Instabilidade Local por Força Cortante.**

Segundo VAYAS (2017), uma solução eficiente para aumentar a rigidez de chapa em alma de perfis metálicos consiste na adoção de reforços longitudinais e transversais como mostrados na Figura 3.



**Figura 3 – Reforços longitudinais e transversais para aumento de rigidez de chapa em perfis metálicos.**

Dessa forma, reforços longitudinais e transversais foram propostos para a alma do perfil soldado das vigas longarinas da superestrutura da ponte mista ferroviária, como apresentados na Figura 4.

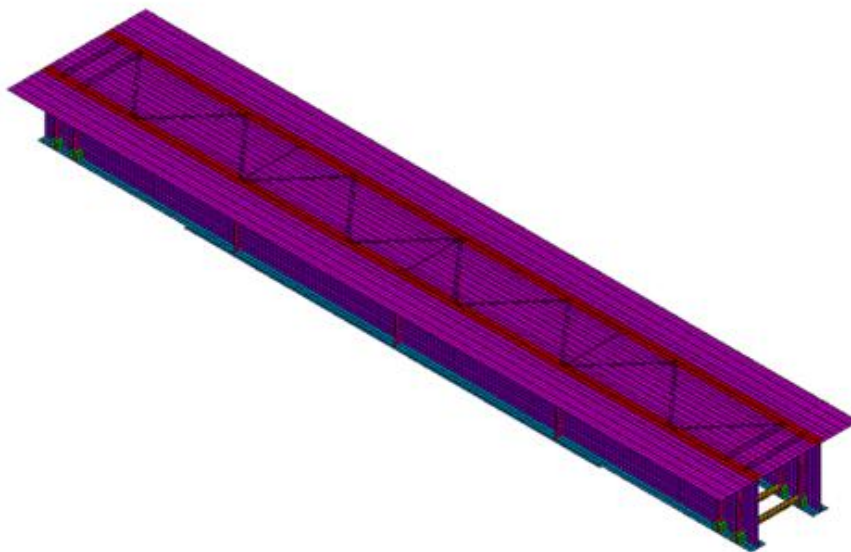


**Figura 4 – Reforços longitudinais e transversais propostos para a alma do perfil soldado das vigas longarinas.**

O presente trabalho apresenta uma análise de elementos finitos com o objetivo de validar reforços estruturais propostos para a alma do perfil soldado das vigas longarinas metálicas da superestrutura de uma ponte mista ferroviária de forma a garantir o atendimento aos estados limites últimos associados a Instabilidade Local da Alma na Flexão e de Instabilidade Local por Força Cortante.

#### **Modelo Computacional de Elementos Finitos da Superestrutura da Ponte Mista Ferroviária**

Um modelo computacional de elementos finitos, mostrado na Figura 5, foi elaborado para a superestrutura da ponte mista ferroviária. Na modelagem da superestrutura da ponte foram empregados elementos finitos de casca para modelar a laje do tabuleiro e o perfil soldado das vigas longarinas bem como os reforços longitudinais e transversais propostos para a alma do perfil soldado. Enquanto para os travamentos transversais das vigas longarinas foram empregados elementos finitos de viga tridimensional.



**Figura 5 – Modelo de elementos finitos para a Ponte Mista Ferroviária.**

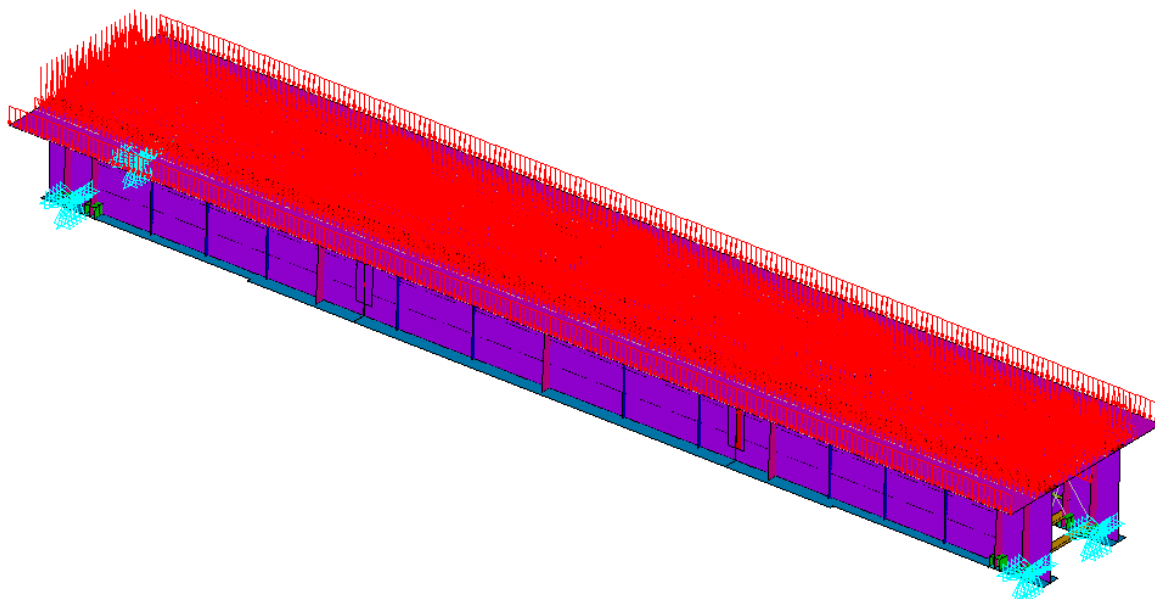
Ressalta-se que foram elaborados dois modelos de elementos finitos, sendo um modelo para a condição de projeto e um outro modelo para a condição de vigas longarinas metálicas reforçadas.

## Ações Permanentes e Variáveis

As seguintes ações permanentes e variáveis foram consideradas para a análise de elementos finitos da superestrutura da ponte mista ferroviária:

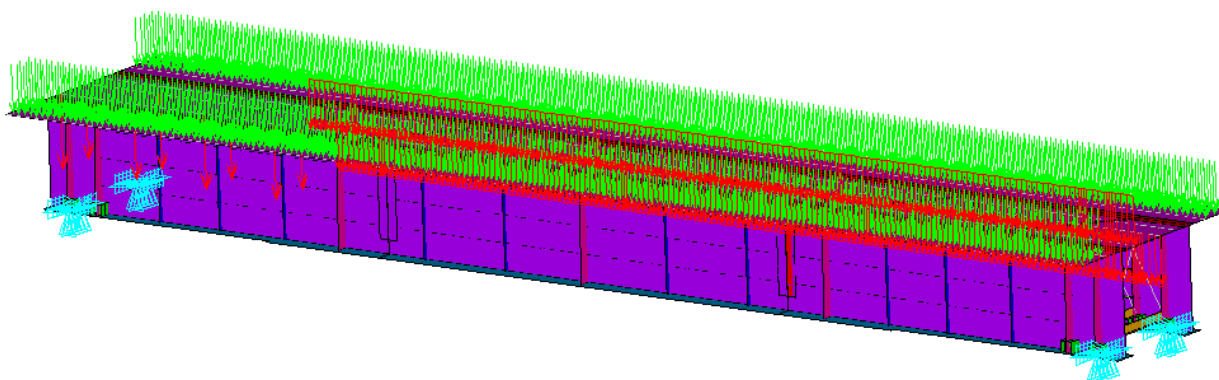
- Ações permanentes de peso próprio dos elementos estruturais e não estruturais.
- Ação variável de carga móvel ferroviária.
- Ação variável de multidão no passeio.
- Ação variável de vento lateral.

Figura 6 mostra as ações permanentes de peso próprio de elementos estruturais (laje de concreto e estruturas metálicas) e de elementos não estruturais (lastro, dormentes, trilhos e guarda corpo) definidas conforme a norma ABNT NBR 16694:2020 e aplicadas no modelo de elementos finitos da superestrutura da ponte mista ferroviária.



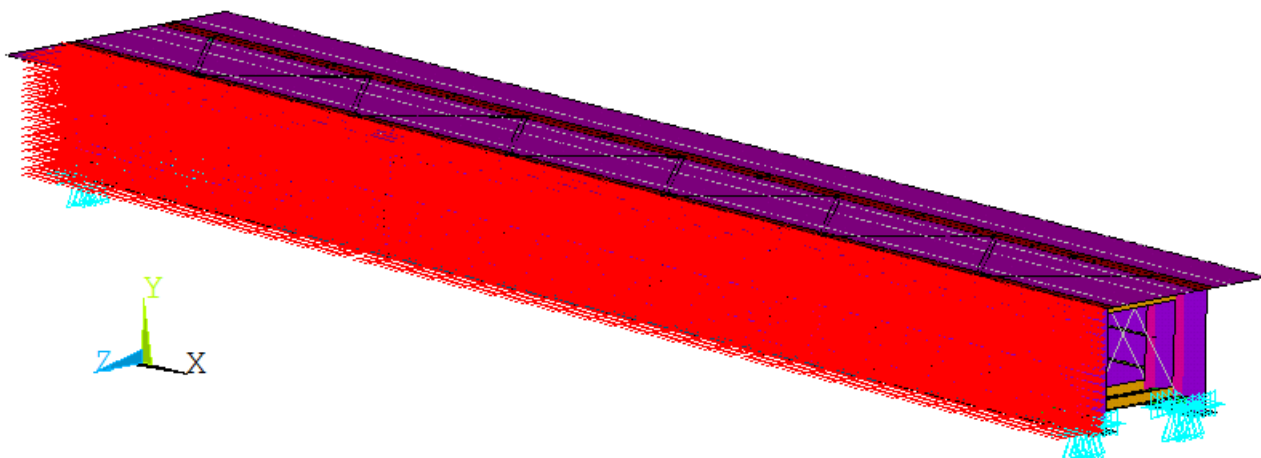
**Figura 6 – Ações permanentes de peso próprio dos elementos estruturais e não estruturais.**

Figura 7 mostra a ação variável de carga móvel de trem-tipo ferroviário e de ação de multidão no passeio que foram aplicadas no modelo de elementos finitos da superestrutura da ponte mista ferroviária. Ressalta-se que foi adotado o trem-tipo ferroviário TB-360 da extinta norma ABNT NBR 7189:2015.



**Figura 7 – Ação variável de carga móvel de trem-tipo ferroviário.**

Figura 8 mostra a ação variável de vento lateral (pressão de 94 kgf/m<sup>2</sup>) definida conforme a norma ABNT NBR 6123:2019 e aplicada no modelo de elementos finitos da superestrutura da ponte mista ferroviária.



**Figura 8 – Ação variável de vento lateral.**

### Caso de Carregamento

O modelo de elementos finitos da superestrutura da ponte mista ferroviária foi processado para apenas um caso de carregamento sendo que este foi estabelecido a partir da envoltória de combinações de ações normais últimas proveniente de ações permanentes de peso próprio dos elementos estruturais e não estruturais, de ações variáveis de carga móvel ferroviária do trem-tipo TB-360 e de vento lateral.

Tabela 1 apresenta o caso de carregamento considerado para o processamento das análises de elementos finitos da superestrutura da ponte mista ferroviária.

**Tabela 1 – Caso de carregamento para processamento das análises de elementos finitos.**

Caso de Carregamento	Ações Permanentes			Ações Variáveis	
ENV COMB ELU	1,25 × Peso próprio da estrutura metálica	1,35 × Peso próprio da estrutura da laje de concreto	1,3 × Peso próprio dos elementos não estruturais	1,875 × Carga Móvel do trem tipo ferroviário TB-360	1,2 × 0,7 × Carga do vento lateral

Ressalta-se que o fator de impacto de 1,25 já se encontra aplicado ao coeficiente de majoração de 1,5 da carga móvel do trem tipo ferroviário TB-360.

### Validação dos Reforços Estruturais Propostos para as Vigas Longarinas Metálicas

Os reforços estruturais propostos para as vigas longarinas metálicas da superestrutura da ponte mista ferroviária foram validados por meio de análises de elementos finitos e segundo o procedimento descrito a seguir:

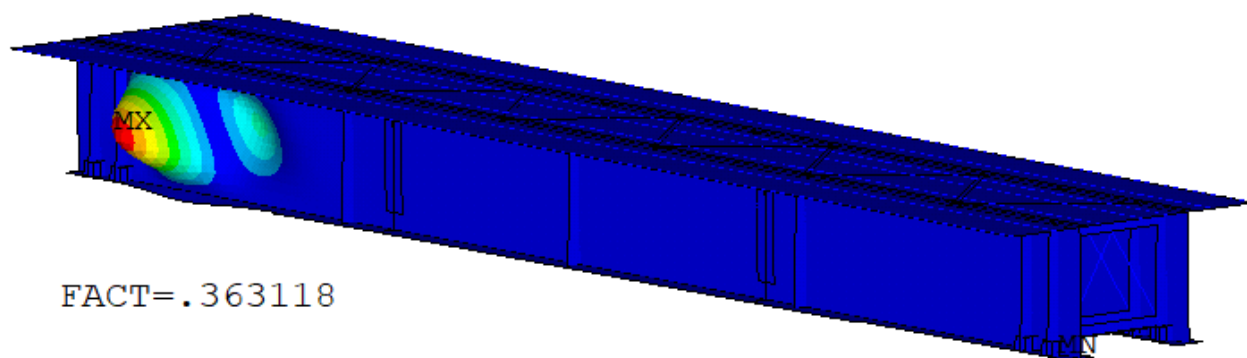
- Inicialmente foi processada uma análise de elementos finitos de flambagem (Linear Buckling) para determinar fatores de flambagem (autovalores) e os correspondentes modos de flambagem (autovetores) para a alma do perfil soldado das vigas longarinas metálicas. E para resultados de fatores de flambagem inferiores a 1 foi estabelecido que o perfil soldado das vigas longarinas

metálicas não atenderia a requisitos de Estados Limites Últimos de Instabilidade Local da Alma na Flexão e de Instabilidade Local por Força Cortante.

- Na sequência foi processada uma análise não-linear geométrica de elementos finitos. E a partir da avaliação de resultados de deslocamentos laterais, pode-se confirmar que os modos de falha associados aos Estados Limites Últimos de Instabilidade Local da Alma na Flexão e de Instabilidade Local por Força Cortante iriam ocorrer para a alma do perfil soldado das vigas longarinas metálicas.

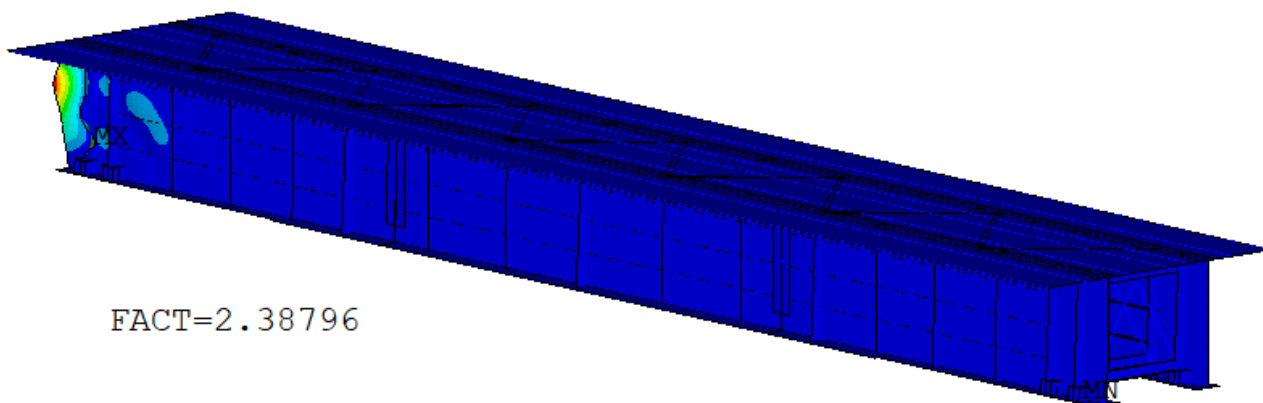
### Discussão dos Resultados das Análises de Elementos Finitos de Flambagem

Figura 9 apresenta o resultado do primeiro fator de flambagem de valor igual a 0.363118 obtido para o modelo de elementos finitos da superestrutura da ponte mista ferroviária na condição de projeto. Observa-se que o respectivo modo de flambagem acontece na alma do perfil soldado da viga longarina e próximo a região de apoio da viga, caracterizando assim uma instabilidade local da alma por cisalhamento.



**Figura 9 – Resultado do primeiro fator de flambagem - Condição de projeto.**

Figura 10 apresenta o resultado do décimo primeiro fator de flambagem de valor igual a 2.38796 obtido para o modelo de elementos finitos da superestrutura da ponte mista ferroviária na condição de vigas longarinas reforçadas. Consta-se que a alma do perfil soldado da viga longarina apresenta estabilidade local da alma na flexão.

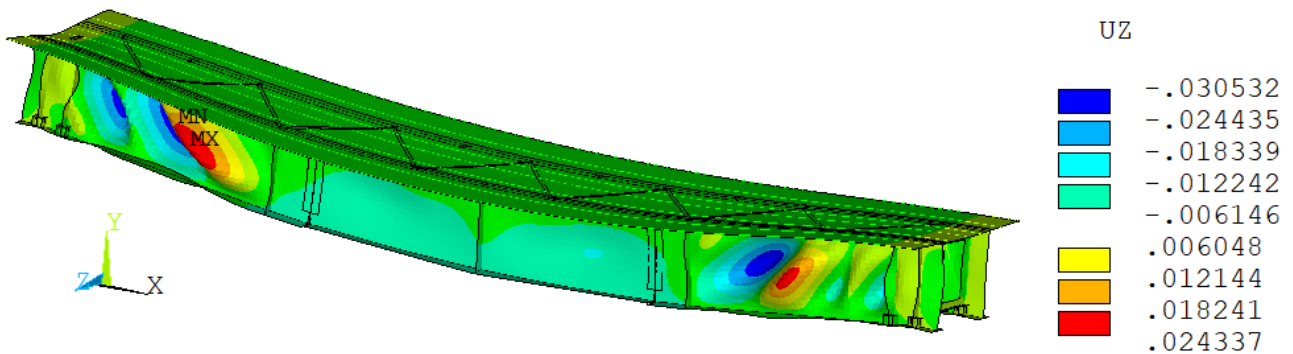


**Figura 10 – Resultado do fator de flambagem - Condição de vigas longarinas reforçadas.**



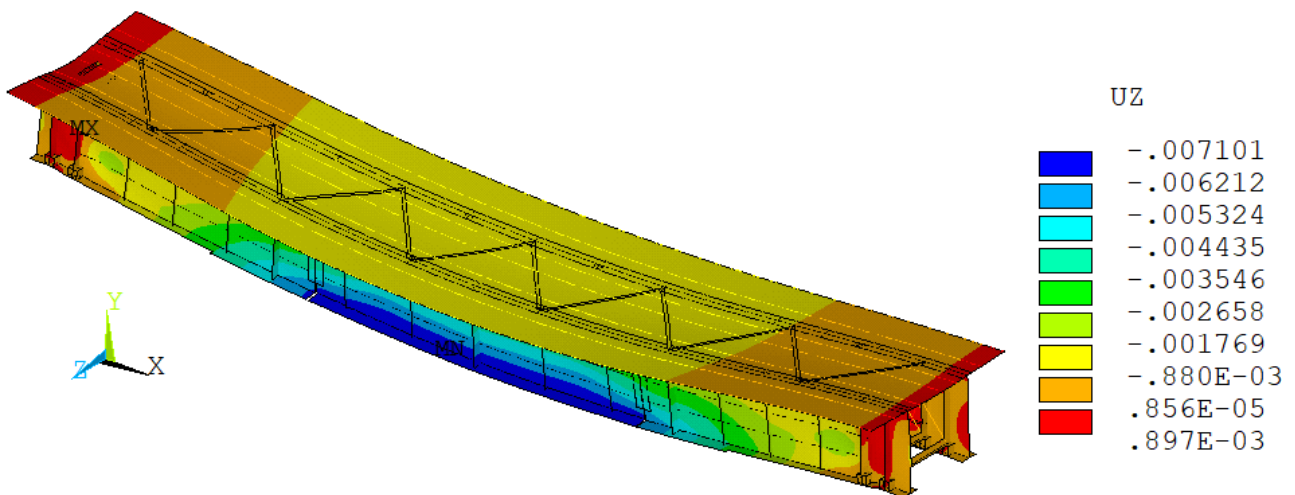
## Discussão dos Resultados das Análises não Lineares de Elementos Finitos

Figura 11 apresenta os resultados de deslocamentos laterais obtidos para o modelo de elementos finitos da superestrutura da ponte mista ferroviária na condição de projeto. Observa-se que o resultado do máximo deslocamento lateral ( $U_z$ ) foi de 2,4 cm e que a alma do perfil soldado da viga longarina falha por instabilidade local da alma por cisalhamento.



**Figura 11 – Resultados de deslocamentos laterais - Condição de projeto.**

Figura 12 apresenta os resultados de deslocamentos laterais obtidos para o modelo de elementos finitos da superestrutura da ponte mista ferroviária na condição de vigas longarinas reforçadas. Observa-se que o resultado do máximo deslocamento lateral ( $U_z$ ) foi de 0,7 cm e que a alma do perfil soldado da viga longarina é estável.



**Figura 12 – Resultados de deslocamentos laterais - Condição de vigas longarinas reforçadas.**

## Conclusões

Análises de elementos finitos de flambagem e análises não-lineares geométricas de elementos finitos foram realizadas para validar reforços estruturais propostos para as vigas longarinas metálicas da superestrutura de uma ponte mista ferroviária.

Para a superestrutura de uma ponte mista ferroviária foram elaborados dois modelos de elementos finitos, sendo um modelo para a condição de projeto e um outro modelo para a condição de vigas longarinas metálicas reforçadas.

A análise de elementos finitos de flambagem com o modelo da superestrutura da ponte mista ferroviária na condição de projeto apresentou o resultado do primeiro fator de flambagem igual a 0,363118 e com o respectivo modo de flambagem acontecendo na alma do perfil das vigas longarinas metálicas e próximo a região dos apoios da viga, caracterizando assim uma falha por instabilidade local da alma por cisalhamento. Enquanto para o modelo da superestrutura na condição de vigas longarinas reforçadas, o fator de flambagem foi de 2.38796, indicando que as vigas longarinas metálicas são estáveis.

A análise não linear geométrica de elementos finitos com o modelo da superestrutura da ponte mista ferroviária na condição de projeto apresentou o resultado do máximo deslocamento lateral igual a 2,4 cm e mostrou que a alma do perfil soldado da viga longarina falha por instabilidade local da alma por cisalhamento. Enquanto para o modelo da superestrutura na condição de vigas longarinas reforçadas, o resultado do máximo deslocamento lateral foi de 0,7 cm e a alma do perfil soldado da viga longarina é estável.

Portanto, concluiu-se que apenas o modelo da superestrutura da ponte mista ferroviária na condição de vigas longarinas reforçadas atende aos requisitos de Estados Limites Últimos de Instabilidade Local da Alma na Flexão e de Instabilidade Local por Força Cortante.

## **Referências**

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6123: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, ABNT, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR16694: Projeto de pontes rodoviárias de aço e mistas de aço e concreto. Rio de Janeiro, ABNT, 2020.
- BEG, D. Plated and box girder stiffener design in view of Eurocode 3 - Part 1.5. In: Sixth National Conference on Metal Structures, Ioannina, Greece, 2008.
- EN 1993-1-5, CEN (European Committee for Standardization): Design of steel structures, Part 1–5: Plated structural elements, 2006.
- EN 1993-2, CEN (European Committee for Standardization): Design of steel structures—Part 2: Steel Bridges, 2006.
- FAKURY, R. H., CASTRO, A. L. R., SILVA, R. B. C. Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.
- FU, C. C., WANG, S. Computational Analysis and Design of Bridge Structures. Taylor & Francis Group, CRC Press, New York, 2017.
- KINDMANN, R., KRAUS, M. Steel Structures Design Using FEM. Ernest & Sohn. Berlin, Germany, 2011.
- VAYAS, I. e ILIOPOULOS, A., Design of steel-concrete composite bridges to Eurocodes. Taylor & Francis Group, CRC Press, New York, 2017.