

Tema: Estruturas Metálicas para Pontes e Viadutos Rodoviários

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO NUMÉRICO EM ELEMENTOS FINITOS PARA O VÃO  
CENTRAL EM ESTRUTURA METÁLICA DA PONTE HONESTINO GUIMARÃES**

Georgia Brunelli Bofill<sup>1</sup>

Ronaldo Oliveira de Almeida<sup>2</sup>

Guilherme Santana Alencar<sup>3</sup>

**Resumo**

A Ponte Honestino Guimarães, ou Ponte Monumental como o próprio Oscar Niemeyer a nomeou, é a única Obra de Arte Especial (OAE) do renomado arquiteto projetada e executada, tendo sido construída entre 1969 e 1976. Até a sua conclusão, essa OAE passou por alterações em seu sistema construtivo, uma vez que o projeto original considerava a ponte construída integralmente em balanços progressivos de concreto protendido, tanto os vãos laterais (110 m), como o central (220 m). Após um incidente com os cabos de protensão ocorrido em 1971, foi realizada uma adaptação ao projeto inicial, substituindo-se um trecho central de 58 metros de comprimento por uma estrutura metálica de tabuleiro ortotrópico de aço do tipo Corten. Diante desse contexto, considerando-se a utilização desse equipamento público e os efeitos do tempo, que podem interferir no comportamento dinâmico das estruturas, este artigo apresenta o desenvolvimento de um modelo numérico em elementos finitos por meio do software ANSYS para o vão central em estrutura metálica. Esse vão central apoia-se sobre as extremidades dos arcos de concreto que, neste artigo, tiveram a rigidez dos apoios elásticos estimada. O objetivo da construção do modelo numérico é a posterior avaliação à fadiga das ligações soldadas por meio de abordagem S-N considerando o tráfego passado e futuro. Uma análise modal foi realizada sobre o modelo numérico, demonstrando a sua utilidade para fins do estudo do comportamento dinâmico.

**Palavras-chave:** Pontes e Viadutos em Estrutura Metálica; Análise Dinâmica; Elementos finitos.

**DEVELOPMENT OF A FINITE ELEMENT MODEL FOR THE STEEL BOX GIRDER STRUCTURE OF  
THE CENTRAL SPAN OF HONESTINO GUIMARÃES BRIDGE**

**Abstract**

Honestino Guimarães Bridge, or Monumental Bridge, as Oscar Niemeyer named it, is the acclaimed architecture's only bridge projected and executed, built between 1969 and 1976. Before conclusion, its constructive system has been altered, once the original design planned building this bridge by successive balances in prestressed concrete along its laterals spans (110m) and the central span (220m). After an incident occurred with some of its tendons, in 1971, the original project was adapted and a part of 58 meters of the central span was substituted by an orthotropic corten steel deck structure. In this framework, considering the utilisation of this public equipment and the effects of time, which may interfere in the dynamic behaviour of structures, this article presents the development of a finite element model via ANSYS for the central span steel structure. This central span is supported by two concrete arches, which, in this article, had its elastic support stiffness estimated. The purpose of designing a discrete element model is a posterior evaluation of fatigue of welded connections



via S-N approach, considering past and future traffic. It was made a modal analysis over the numerical model, demonstrating its usefulness for studying dynamic behaviour.

**Keywords:** Steel Bridges and Viaducts; Dynamic Analysis; Finite Element modelling.

<sup>1</sup> Graduanda em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Civil, Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil - NOVACAP, Brasília, Distrito Federal e Brasil.

<sup>3</sup> Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Destinada a conectar, de forma mais rápida, o Lago Sul à área central de Brasília, a Ponte Honestino Guimarães foi projetada em 1967 pelo arquiteto Oscar Niemeyer. Segundo Fonseca [1], a concepção arquitetônica inicial era inédita, com 200 metros de vão livre no arco central e dois arcos laterais de 100 metros cada, utilizando-se de concreto protendido para vencer esses vãos, além de seção transversal constituída de um caixão tricelular. Entretanto, esse comprimento inicial ainda precisou ser aumentado para que os blocos de ancoragem se apoiassem em um solo mais firme, resultando em 110 metros de vãos laterais e 220 metros de vão central. Para executar a obra, o processo construtivo escolhido foi o de balanços progressivos, realizados de forma simétrica a partir dos pilares internos da estrutura.

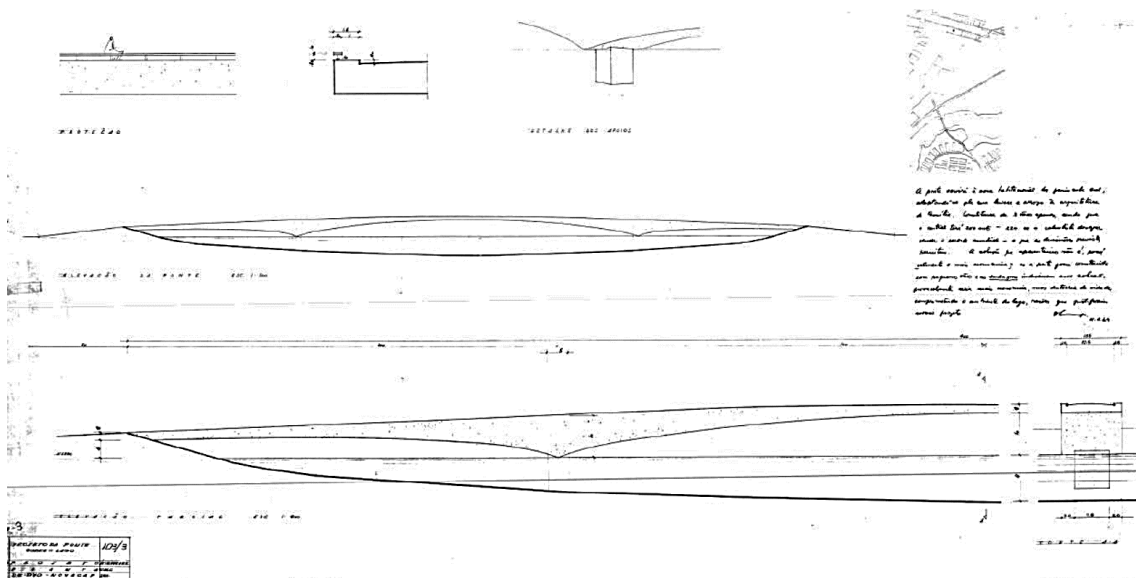


Figura 1 - Projeto original da Ponte de Oscar Niemeyer. [2]

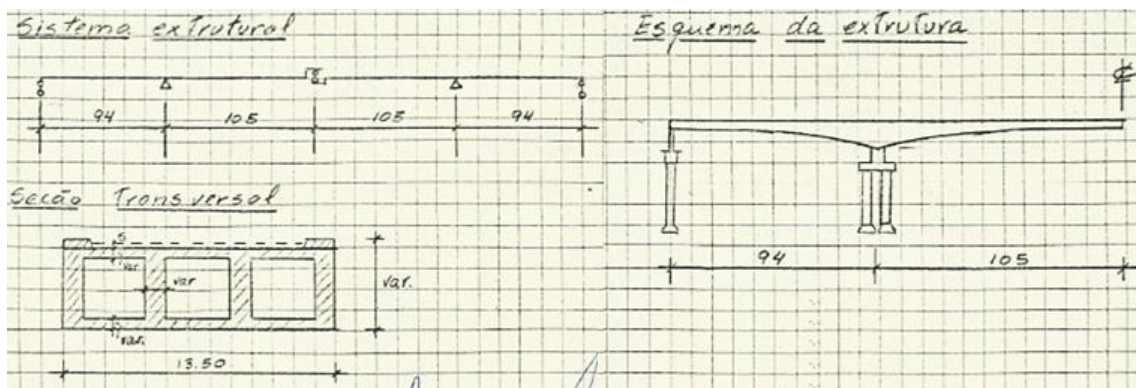


Figura 2 - Concepção estrutural inicial (adaptado). [2]

De acordo com Fonseca [1], após 1 ano e 6 meses do início da construção, a obra foi paralisada devido a acidentes ocorridos com os cabos de protensão e por fiscais da NOVACAP constatarem que a quantidade desses cabos prevista em projeto era insuficiente. Dessa forma,

o projeto inicial foi recalculado e foi prevista a substituição de 58 metros do vão central em concreto protendido por uma estrutura em aço anticorrosivo, apoiada sobre os arcos de concreto, o que reduziu o peso próprio do trecho em aproximadamente 1/3. Também foram realizados outros reforços estruturais na estrutura, como inserção de cabos de reforço e preenchimento de fissuras. A ponte foi finalmente inaugurada em 1976.



*Figura 3 - Implantação do tabuleiro metálico. [3]*



*Figura 4 - Inauguração da ponte em 1976. [3]*

Em março de 2021, iniciou-se uma obra de reforço e recuperação estrutural na ponte, após serem identificadas deflexões excessivas nas pontas dos balanços onde se apoia a estrutura metálica. Almeida [4] reforça que essa deformação indica possível perda de protensão dos cabos, causada por corrosão ou perdas diferidas no tempo.

Nesse contexto, percebe-se a necessidade de um estudo avançado do comportamento dessa ponte. O objetivo do presente artigo é o desenvolvimento inicial de um modelo numérico em

elementos finitos para o vão central metálico da Ponte Honestino Guimarães. Desse modelo, será realizada uma análise linear dinâmica modal, a ser comparada e calibrada, em um trabalho futuro, com os dados experimentais obtidos por Almeida [4] no sistema de aquisição para monitoração remota da ponte.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a elaboração do modelo da ponte, foi utilizado o *software* ANSYS v. 17.2, sendo desenvolvido um código na linguagem de apoio do ANSYS, o *ANSYS Parametric Design Language* (APDL) para a leitura pelo programa. O ANSYS é um *software* que realiza modelos e análises em elementos finitos, permitindo, dentre outras funcionalidades, a análise linear estática e a análise linear dinâmica modal, segundo o próprio ANSYS [5].

### 2.1 Estrutura geral da ponte

As informações de geometria da ponte foram obtidas por meio de levantamento *as built* da estrutura, produzido por Almeida *et al.* [6] para a NOVACAP e por meio de inspeções próprias realizadas pelos autores deste trabalho na estrutura. As imagens a seguir representam fotografias realizadas no local, planta e cortes da estrutura, retiradas do levantamento *as built*.



Figura 5 - Fotografia no interior do caixão na região do apoio. Fonte: Autores.



Figura 6 - Fotografia no interior do caixão ao longo da direção longitudinal. Fonte: Autores

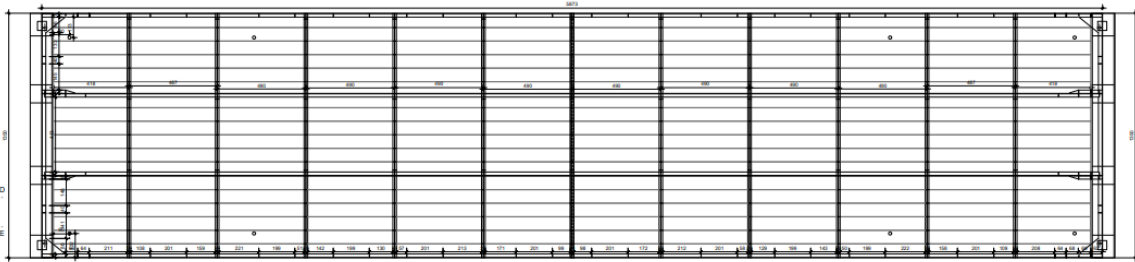


Figura 7 - Tabuleiro metálico em planta. [6]

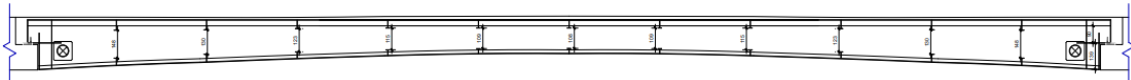


Figura 8 - Corte longitudinal do tabuleiro metálico. [6]

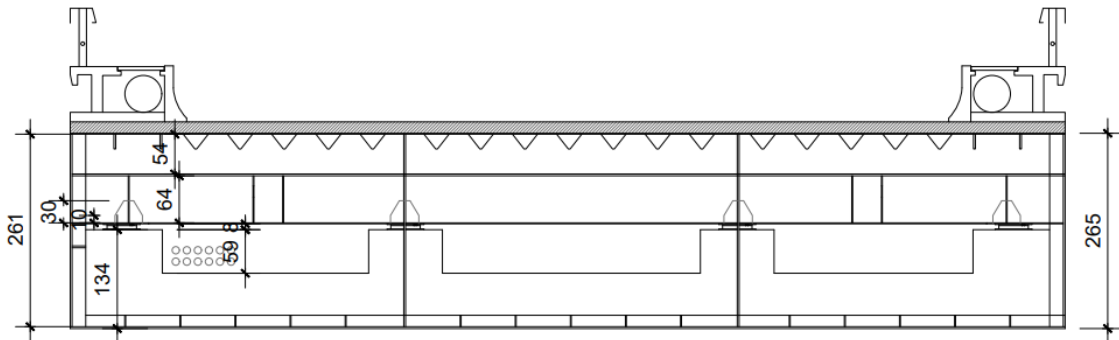


Figura 9 - Corte transversal do tabuleiro metálico. Fonte: Almeida et al. [6]

Destaca-se que, no modelo *as built*, não é indicado o caimento transversal da pista nas extremidades, que foram identificadas *in loco* e existem para garantir o escoamento de água pluvial. No modelo, foi feita a modelagem desse caimento na própria estrutura do caixão, como identificado pelo levantamento realizado.

## 2.2 Geometria das seções

A estrutura metálica é composta por diversos enrijecedores ao longo de sua geometria, tanto nas mesas superior e inferior quanto nas paredes (internas e externas), configurando um tabuleiro do tipo ortotrópico. A estrutura conta com esses elementos dispostos

transversalmente e longitudinalmente ao longo de sua estrutura. A tabela a seguir representa as dimensões dos perfis metálicos presentes no tabuleiro, que foram obtidas *in loco*.

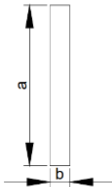


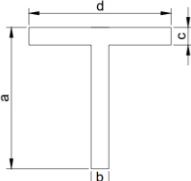
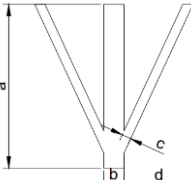
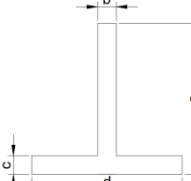
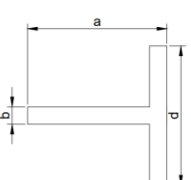
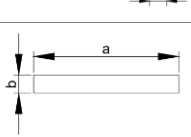
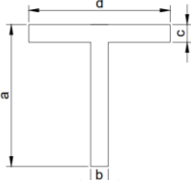
Figura 10 – Detalhe do encontro entre perfil I transversal e nervura longitudinal da mesa superior. Fonte: Autores.



Figura 11 – Detalhe contraventamento, perfil T transversal da mesa inferior, enrijecedores longitudinais e perfil T das paredes. Fonte: Autores.

Tabela 1 – Perfis metálicos (dimensões em mm). Fonte: Autores.

Nº	Nome	Perfil	Seção	a	b	c	d
1	Enrijecedor longitudinal da face inferior do caixão	Retangular		170	13	-	-

2	Perfil T transversal soldado na mesa inferior	T		400	10	10	200
3	Nervura da mesa superior	Retangular enrijecido		320	27,5	10	130
4	Perfil T transversal soldado na mesa superior	T		530	10	10	200
5	Perfil T soldado nas paredes	T		300	10	10	200
6	Enrijecedor longitudinal das paredes do caixão	Retangular		175	14	-	-
7	Contraventamento	T		200	10	10	200

### 2.3 Dados dos materiais

A inserção de dados dos materiais do modelo foi realizada levando-se em consideração o tabuleiro metálico em si e os elementos localizados sobre esse tabuleiro. Nesse caso, há o vão central em aço, uma laje de concreto sobre o vão e os elementos sobre a laje. Para os elementos sobre a laje, foi considerado apenas o revestimento asfáltico, sem influência na rigidez global, já que esse material adiciona apenas peso próprio sem função estrutural para a superestrutura. Para uma análise linear estática, é imprescindível considerar o restante dos carregamentos atuantes sobre a estrutura, como veículos, adutoras de água, barreiras de concreto, etc., já que o peso próprio desses elementos age de modo a aumentar os esforços solicitantes atuantes na estrutura. Foi utilizada a premissa de que todos os materiais estruturais (aço e concreto) são lineares, homogêneos, elásticos e isotrópicos. Como o concreto da década de 1970 apresentava  $f_{ck}$  da ordem de 15 a 20 MPa, foi realizada uma

estimativa inicial do módulo de elasticidade do concreto de 20 Gpa, que poderá ser alterada em trabalhos futuros.

Tabela 2 – Materiais utilizados no modelo. Fonte: Autores

Material	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (Gpa)	Coefficiente de Poisson
Aço	7850	200	0.3
Concreto	2500	20	0.2
Revestimento Asfáltico	2200	-	-

## 2.4 Elaboração do modelo

A partir dessas informações, foi construído o código em APDL, sendo que as instruções de programação são lidas pelo programa para construção e respectiva visualização gráfica do modelo. As mesas superior e inferior do tabuleiro, as paredes laterais e internas e as vigas das regiões de apoio foram modeladas como elementos *shell181*, com 10 mm de espessura, exceto as vigas dos apoios, que possuem 13,5 mm. Esses elementos são elementos de placa com 4 nós e 6 graus de liberdade em cada nó, de acordo com ANSYS [5], recomendado para cascas esbeltas.

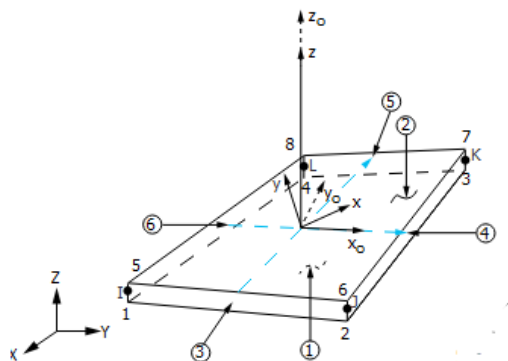


Figura 12 – Representação do elemento shell181. [5]

As vigas internas à estrutura foram modeladas como elementos de *beam188* embebidos nos elementos de placa, tendo suas seções definidas conforme descrito anteriormente. Esse tipo no elemento no ANSYS [5] é caracterizado por ser linear com 6 graus de liberdade em cada nó. Os elementos de viga sofreram *offset* em relação ao seu centroide para se acomodarem apropriadamente na estrutura. As imagens a seguir ilustram o modelo desenvolvido.

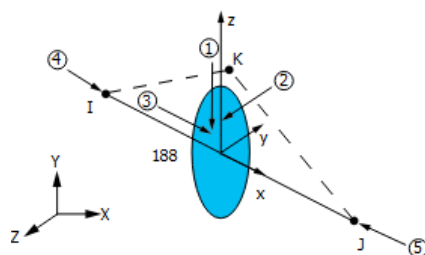


Figura 13 – Representação do elemento beam188. [5]

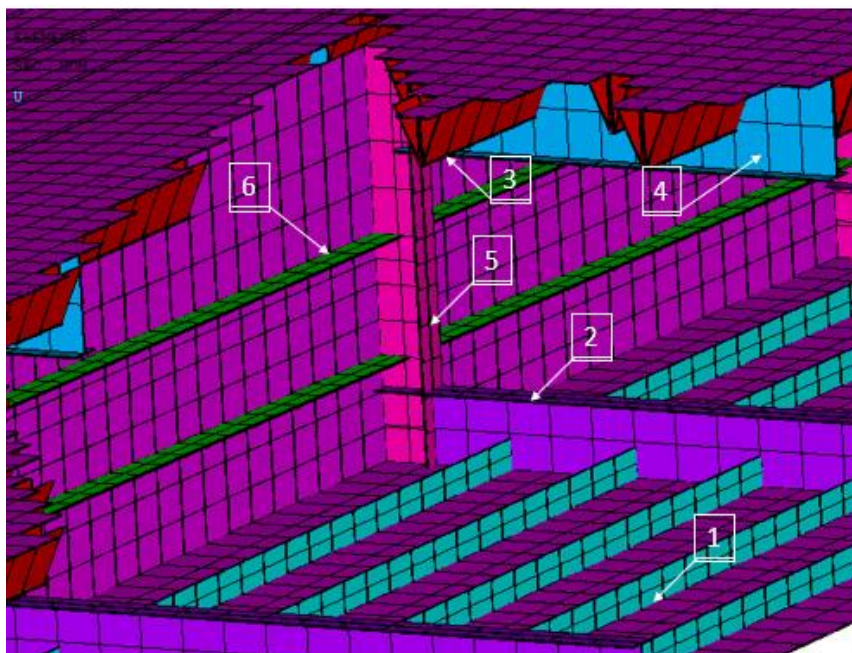


Figura 14 – Detalhe interno do modelo, com as seções especificadas no item 2.2.

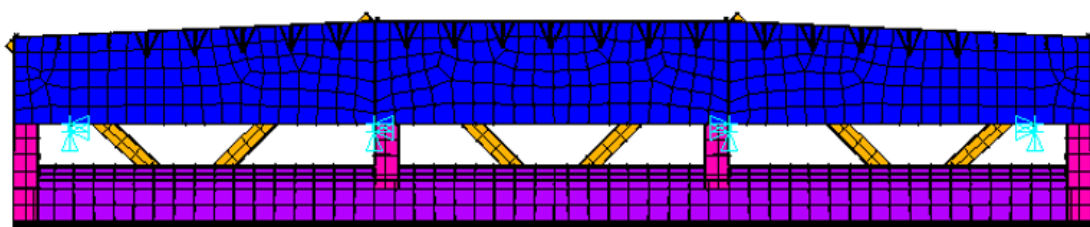


Figura 15 – Seção transversal do modelo

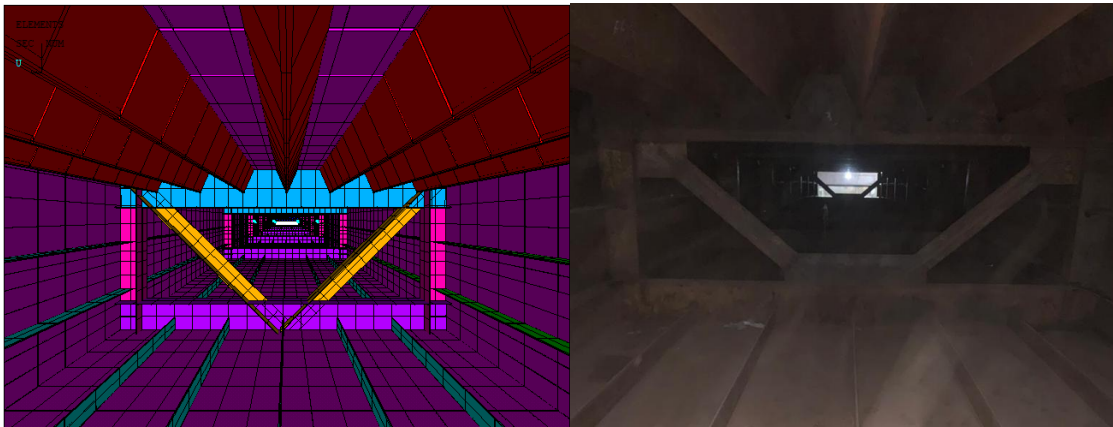


Figura 16 – Comparação entre um dos caixões do modelo e da estrutura real

Para a inserção da laje de concreto, foi replicada a mesma disposição dos elementos *shells* da mesa superior do tabuleiro e inseriu-se o material de concreto. A espessura de laje considerada foi de 20 cm, portanto, os elementos foram copiados a uma distância  $dy = 10$  cm.

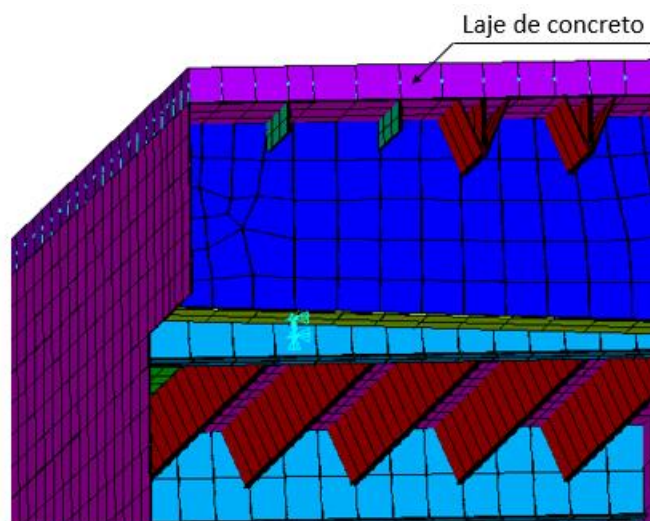


Figura 17 – Detalhe da laje de concreto

Após a inserção da laje de concreto sobre a estrutura do tabuleiro, foi necessária a realização da conexão entre esses elementos para que eles trabalhem em conjunto na estrutura (interação total – hipótese ainda a ser confirmada experimentalmente). Para isso, foram adicionados *links* rígidos, elementos do tipo MPC184, para conectar cada nó dos *shells* da estrutura metálica à laje de concreto. Esses elementos não existem na estrutura real, mas são usados como artifício para reproduzir o comportamento estrutural da ponte. Portanto, são elementos com massa nula.

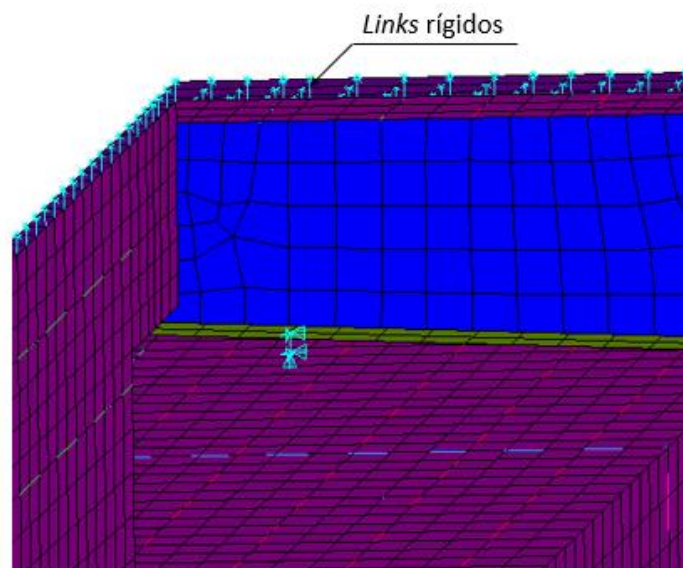
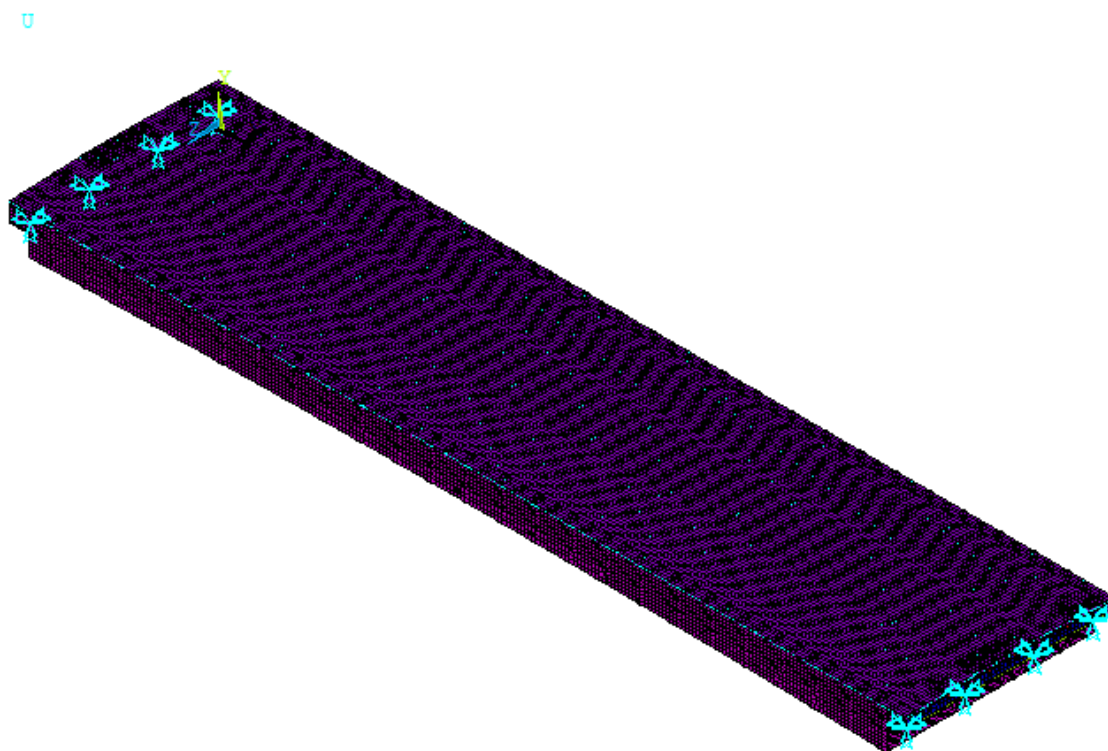


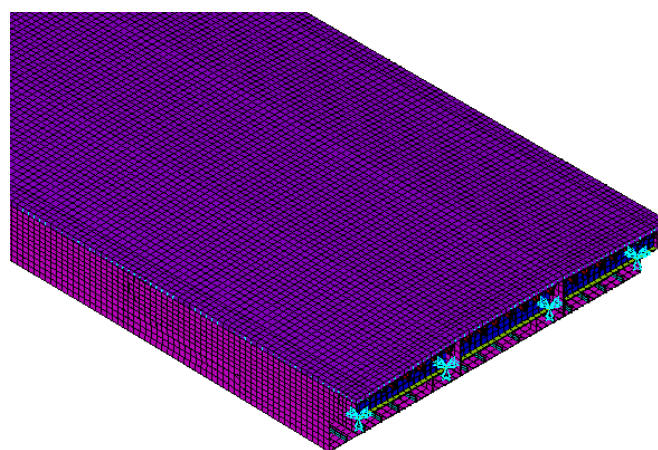
Figura 18 – Detalhe das conexões entre a mesa superior metálica e a laje de concreto

Ainda, após a inserção da laje de concreto, foi inserido o revestimento asfáltico como elemento do tipo *mass21*. Esse é um elemento pontual com 6 graus de liberdade, de acordo com ANSYS [3], apesar de apenas um grau de liberdade ser usado, que corresponde às forças inerciais verticais devido à gravidade e à massa do revestimento asfáltico. Foi estimada uma espessura de 5 cm de pavimento. Em uma área de  $\frac{1}{4}$  da laje de concreto, de dimensões 9 m x 29 m, há 5612 nós. Considerando o peso específico citado anteriormente de  $2200 \text{ kg/m}^3$ , há um total de 28.710 kg sobre todos os nós. Ou seja, cada nó recebe aproximadamente uma massa de 5,11 kg. Esse é o peso próprio de cada elemento *mass21* que representa o pavimento asfáltico. Em trabalhos futuros de atualização do modelo, uma estimativa mais exata dos elementos não estruturais será realizado, levando-se em consideração o guarda-corpo metálico, os guarda-rodas em concreto e as adutoras.

A discretização da malha dos elementos é realizada pelo próprio ANSYS, por meio do comando *mesh*. Nesse caso, buscou-se criar elementos de dimensões aproximadas de 25 cm. Com isso, obteve-se um total de 84.331 elementos e 57.005 nós no modelo, conforme figura a seguir. Nos apoios, o vão central metálico possui uma transversina em seção T invertida para transmissão dos esforços cortantes para o arco de concreto sobre o qual se apoia em 4 pontos (4 aparelhos de apoio esféricos em cada extremidade), como será explicado na seção seguinte.



*Figura 19 – Modelo completo do vão central metálico*



*Figura 20 – Detalhe de uma das extremidades do tabuleiro*

## **2.5 Condições de contorno**

Para as condições de contorno do tabuleiro metálico, realizou-se uma estimativa inicial dos coeficientes de mola provenientes dos arcos de concreto. O arco metálico constitui-se de um elemento apoiado nos arcos de concreto, que sofrem deformações; e, portanto, é necessário o conhecimento da constante de mola desse apoio para que seja inserido no modelo do tabuleiro. Como estimativa inicial, utilizou-se um valor de 60.000 kN/m de coeficiente de mola em cada arco de concreto. Como são 4 aparelhos de apoio em cada lado do tabuleiro, foram

inseridas 4 molas em cada lado com o valor de coeficiente de mola de 15.000 kN/m na vertical. Nas direções horizontais, foram inseridas restrições ao deslocamento de modo a tornar a estrutura isostática. Ressalta-se que essas são apenas estimativas iniciais a serem calibradas, futuramente, com dados experimentais obtidos de extensômetros e acelerômetros afixados à ponte (ver Almeida *et al.* [6]). Recentemente (junho de 2023) a ponte passou por troca dos aparelhos de apoio como parte de um processo de revitalização, com a respectiva elevação da superestrutura do vão central metálico (ver Figura 21).



Figura 21 - Detalhe de um dos aparelhos de apoio na ponte. Fonte: Autores.

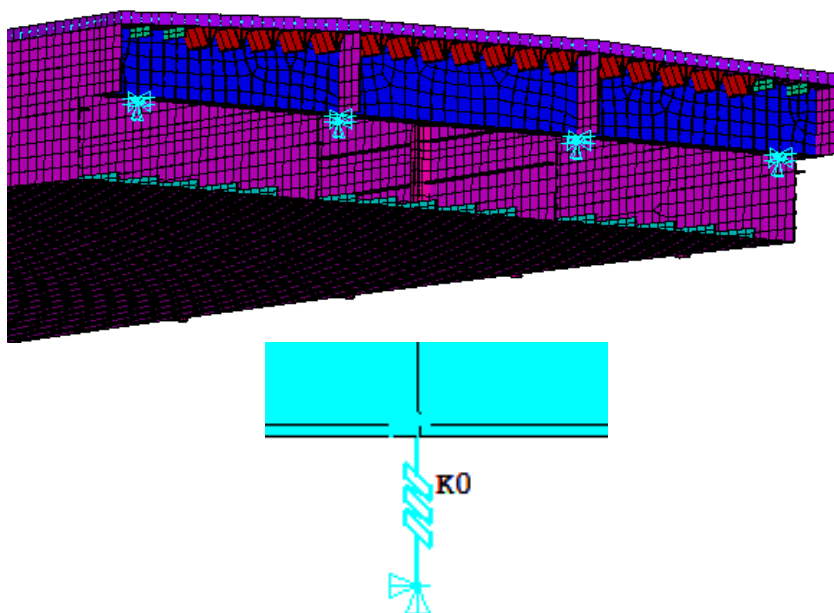


Figura 22 - Detalhes das condições de contorno da estrutura

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Análise linear estática

Conforme explicitado anteriormente, será utilizado apenas o peso próprio dos elementos citados. Portanto, adiciona-se a aceleração da gravidade, de  $9,81 \text{ m/s}^2$ , na direção y, para obter a força exercida pelo peso próprio da estrutura. Para executar a análise estática, foram gastos aproximadamente 7 segundos em um computador Intel(R) Core (TM) i5-1035G1 CPU @ 1.00GHz 1.19 GHz e d RAM 8.0 GB. O resultado dos deslocamentos da estrutura é apresentado a seguir:

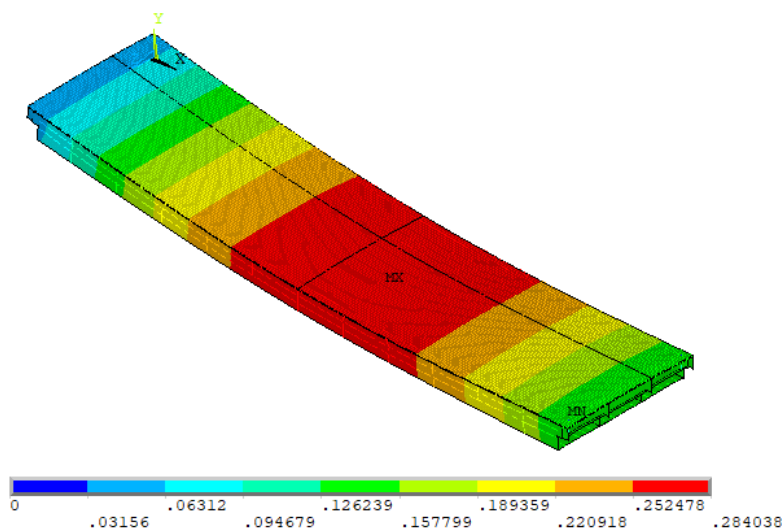


Figura 23 - Deformações na estrutura

A flecha indicada de 28,4 cm é compatível com uma estrutura com as dimensões do vão central dessa ponte, o que é um indicador inicial de que o modelo é apropriado. Em breve, uma prova de carga estática com medição das deformações sob um carregamento móvel de peso conhecido será realizada para posterior atualização do modelo numérico.

### 3.2 Análise linear modal

Após a análise estática, segue-se à análise modal. Nessa etapa, verifica-se que a ponte não se comporta como um elemento de corpo rígido, pois não há frequências naturais de vibração iguais a zero. Isso também indica uma boa integridade do modelo numérico que foi realizado. Entretanto, é possível perceber que, apesar da solução estrutural ser em arco, os principais modos são típicos de ponte em viga reta biapoiada, já que o arco não é tão pronunciado no vão central. As imagens a seguir indicam os modos de vibração do vão central da ponte, calculados pelo ANSYS.

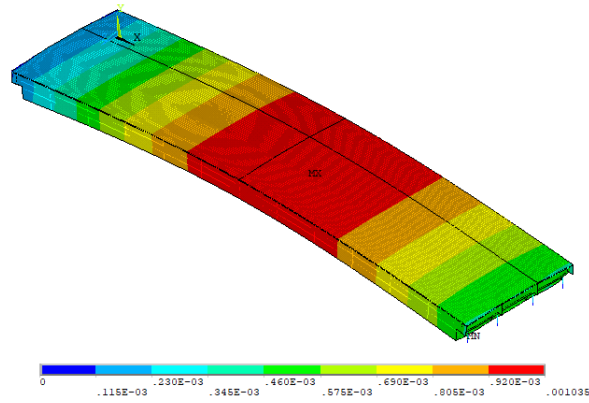


Figura 24 – Modo de vibração: 1º de flexão; freq. = 1.0405 Hz

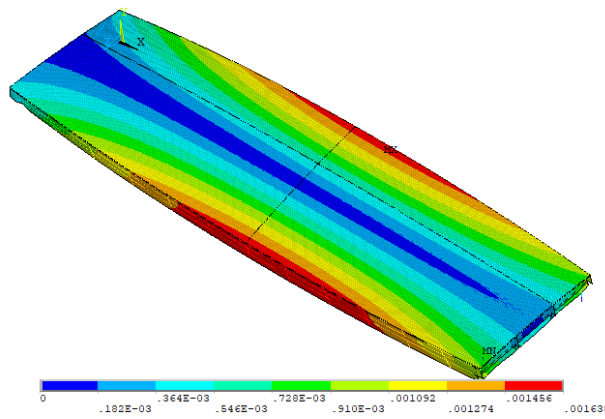


Figura 25 – Modo de vibração (1º de torção); freq = 1.4513 Hz

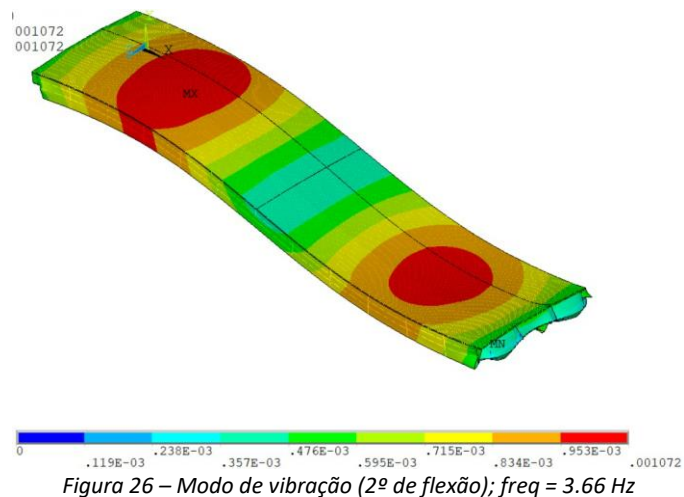


Figura 26 – Modo de vibração (2º de flexão); freq = 3.66 Hz

## V CONCLUSÃO

A partir das análises realizadas no ANSYS, percebe-se que o modelo em elementos finitos da Ponte Honestino Guimarães é satisfatório, devendo agora proceder a uma atualização com base em medições experimentais. Na análise linear estática, o modelo apresenta deformações com o peso próprio coerentes com a ordem de grandeza da estrutura, o que indica uma boa razoabilidade do modelo. Na análise modal, foram indicados modos de vibrações da estrutura possíveis de acontecerem no sistema existente.

A pesquisa continuará a realizar uma comparação dos modos de vibração identificados por Almeida *et al.* [6] por meio do sistema de monitoração com acelerômetro com os modos de vibração calculados de modo numérico pelo modelo, a fim de validar, calibrar e atualizar o modelo (*Operational Modal Analysis*). Além disso, pode-se partir para uma análise linear estática com todos os carregamentos, também comparando com os extensômetros do sistema de aquisição de Almeida *et al.* [6], do mesmo modo, para validar e calibrar o modelo numérico. Pode-se refinar mais o modelo, acrescentando mais detalhes geométricos não incluídos nessa análise e aperfeiçoando certas estimativas realizadas, como a constante de mola dos apoios, além de enrijecedores verticais para enrijecer as almas dos apoios de extremidade.

## REFERÊNCIAS

[1] Fonseca RP. A Ponte de Oscar Niemeyer em Brasília: Construção, Forma e Função Estrutural [Dissertação de Mestrado]. Brasília: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília; 2007.

[2] Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil - NOVACAP. DVO-DE-NOVACAP. Projetos originais da Ponte Costa e Silva. Brasília; 1969-1971.

[3] Arquivo Público do Distrito Federal – ArPDF. Fundo Novacap I. Código Nov. B09. Brasília; 1969- 1971. Proc. 12610/69. Parte I, Caixa 158.

[4] Almeida RO, Alencar GS, Carvalho GND, Veloso LAM, Brito JLV. Monitoração Dinâmica Remota Contínua e Identificação Modal da Ponte Costa e Silva. In: Anais do 14th Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas [Internet]. 2023 May 10-12; Rio de Janeiro, RJ. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pontes e Estruturas; 2023.

[5] ANSYS. Advanced Analysis Techniques Guide. Release 17.2. Documentation for ANSYS. Pensilvânia: ANSYS Inc.; 2009.

[6] Almeida RO. Recuperação, Reforço Estrutural Revitalização da Ponte Costa e Silva (Honestino Guimarães) [Structure's As Built]. Brasília: Governo do Distrito Federal; 2018.