



## **Análise Dinâmica da Ponte Honestino Guimarães (Brasília/DF): Arcos de Concreto e Vão Central Metálico**

**Ana Carolina Esteves Corrêa<sup>1</sup>, Ronaldo Oliveira de Almeida<sup>2</sup>, Guilherme Santana Alencar<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> UnB / Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil / [anaesteves17@gmail.com](mailto:anaesteves17@gmail.com)

<sup>2</sup> UnB / Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil / [eng.ronaldo.almeida@gmail.com](mailto:eng.ronaldo.almeida@gmail.com)

<sup>3</sup> UnB / Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / [guilherme.alencar@unb.br](mailto:guilherme.alencar@unb.br)

### **Resumo**

A ponte Honestino Guimarães, localizada em Brasília/DF, foi a primeira e única ponte projetada pelo arquiteto Oscar Niemeyer, intitulada por ele de “Ponte Monumental”. Construída com o intuito de interligar o Lago Sul (bairro nobre de Brasília) ao Plano Piloto (região central da cidade), o projeto inicial contava com uma tipologia estrutural em arcos de concreto com dente Gerber central. Após um acidente e consequente redimensionamento da estrutura, sua tipologia foi alterada para ponte com viga Gerber central, com dois arcos em concreto, de aproximadamente 191 metros cada, e um vão central metálico, de 58 metros, apoiado nos arcos de concreto por meio de dentes Gerber. A ponte tem extrema importância para a cidade, tanto por ser a única projetada por Niemeyer, mas também por sua localização privilegiada, com isso, é necessário manter a estrutura em pleno funcionamento, garantindo a segurança e o conforto dos utilizadores. Para isso, modelos numéricos em elementos finitos são amplamente utilizados para simular o comportamento da estrutura real e poder prever possíveis reforços e melhorias na ponte. O presente trabalho apresenta uma dissertação de mestrado em desenvolvimento no Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília. Será desenvolvido um modelo em vigas de Euler-Bernoulli abrangendo a totalidade da ponte Honestino Guimarães, tanto os arcos de concreto quanto o vão central metálico, visando obter um modelo completo da estrutura. Serão realizadas análises modais, de vibração livre, e dinâmicas com carga móvel, feitas a partir da linguagem *ANSYS Parametric Design Language* (APDL) no software Ansys v. 17.2, com auxílio do software Stabil, uma ferramenta que auxilia análises estruturais no MATLAB. Com o método dos elementos finitos, espera-se obter um modelo que se assemelhe a ponte, obtendo resultados muito aproximados ao comportamento real da ponte.

### **Palavras-chave**

Ponte Honestino Guimarães; Método dos Elementos Finitos; Análise Dinâmica; Modelagem numérica.

### **Introdução**

As pontes começaram a ser pensadas e projetadas ainda no início da formação das cidades, construídas principalmente em pedra e madeira, materiais disponíveis facilmente e em grande quantidade na época, sendo, hoje em dia, o concreto o material predominante para esse tipo de construção no Brasil (Santos et al., 2022). Outra forma de construir muito utilizada é com a junção do concreto com estruturas de aço, formando as estruturas mistas, pontes que possuem uma laje de concreto sobre uma estrutura de aço trabalhando de maneira conjunta para superar os esforços internos da estrutura (Fabeane, 2015).

A Ponte Honestino Guimarães (denominação atual), originalmente intitulada Ponte Monumental pelo autor do projeto, e inaugurada como “Ponte Costa e Silva”, foi a primeira e única ponte projetada pelo arquiteto Oscar Niemeyer. Inaugurada em 1976, sua obra foi marcada por vários problemas estruturais e mudanças no projeto, como alteração dos vãos e aumento da protensão necessária, causando muitos transtornos e perdas econômicas para a cidade durante sua construção (Fonseca, 2007).



**Figura 1 – Ponte Honestino Guimarães (Breno Fortes/CB/D.A PRESS, 2015)**

Atualmente, um meio muito utilizado para a análise estrutural de pontes e outras obras de arte especiais é a modelagem numérica da estrutura, comumente realizada em elementos finitos. O método dos elementos finitos é muito utilizado atualmente graças a evolução da tecnologia e a utilização de computadores mais avançados na área de engenharia. Esse método é usado para resolver problemas variados, desde análises estáticas e dinâmicas, até análises complexas, como fratura e fadiga, consistindo em uma divisão da estrutura em elementos menores, assumidos como modelos matemáticos que, quando calculados separadamente e depois de maneira conjunta, resolvem o problema sugerido (Okumoto et al., 2009).

Mesmo com a simplificação da obtenção de resultados dinâmicos graças ao método dos elementos finitos, a análise dinâmica de estruturas não é muito utilizada para o dimensionamento e verificação de estruturas no Brasil. Esse tipo de estudo é importante pois pode prevenir o colapso progressivo de estruturas por vibrações excessivas e garantir o conforto dos utilizadores. Além disso, a consideração apropriada dos carregamentos dinâmicos é de suma importância para investigação do fenômeno da fadiga e da deterioração dos materiais.

Pontes rodoviárias são estruturas sujeitas a diferentes tipos de carregamento, inclusive carregamentos dinâmicos com intensidades variáveis, sendo o tráfego de veículos o mais comum entre eles. Além do carregamento dinâmico, também é importante considerar o comportamento dinâmico da ponte, ou seja, os modos e as frequências de vibração da estrutura e a resposta dinâmica transiente sob o efeito do tráfego de veículos atuando sobre um pavimento com danos e irregularidades. Durante as etapas de análise e dimensionamento de estruturas de pontes, objetiva-se a redução das vibrações (Calçada, 2001).

Em muitos trabalhos de avaliação dinâmica de pontes, os efeitos dos veículos são considerados como cargas móveis transientes, porém Carbonari *et al.* (2024) dizem em seu trabalho que quando caminhões ou outros veículos estão passando sobre um viaduto ou sobre uma ponte, os dois sistemas (ponte e veículo) não são independentes no que diz respeito à resposta dinâmica, havendo a necessidade de avaliar a modelagem numérica integrada ponte-veículo.

### **Método dos Elementos Finitos**

O método dos elementos finitos pode ser usado para modelar, em geral, qualquer problema que possa ser resolvido por meio de equações diferenciais parciais. Na análise estrutural, em uma das formas mais difundidas, pode ser formulado a partir do Princípio dos Trabalhos Virtuais e busca os deslocamentos da estrutura como ponto de partida. Parte-se do princípio que, conhecendo-se a rigidez do sistema e as forças atuantes, é possível determinar os deslocamentos nos pontos desejados, obtendo-se assim os resultados almejados para a estrutura (Bathe, 1996).

Avelino Alves Filho (Filho, 2000), em seu livro sobre o MEF, descreve o passo a passo para se analisar uma estrutura pelo Método dos Elementos Finitos, seguindo 5 etapas para qualquer tipo de elemento finito. O passo 1 é a definição do modelo estrutural, ou seja, a discretização da estrutura em elementos menores, que serão calculados como sistemas matemáticos independentes e devem ser condizentes com a estrutura real. Essa discretização pode ser feita em elementos de mola, treliça, viga ou ainda elementos bi e tridimensionais como elementos de placa, de casca e sólidos. Os tipos de elementos finitos citados apresentam formulações matemáticas distintas, e distinguem-se também pela quantidade de graus de liberdade presentes em cada ponto.

O segundo passo é a montagem da matriz de rigidez do elemento no sistema de coordenadas global da estrutura, respeitando também a numeração global dos nós. O passo número 3 é a “assemblagem” das matrizes de rigidez dos elementos, juntando-as em uma única matriz de rigidez global. O quarto passo consiste em

montar o sistema de equações seguindo a Equação (1). Por último, resolve-se o sistema de equações, encontrando-se os deslocamentos nos graus livres e as reações de apoio nos graus restringidos.

$$P = KU \quad (1)$$

Em que:

$P$  é o vetor de carregamentos externos nos nós da estrutura;

$K$  é a matriz de rigidez do modelo da estrutura;

$U$  é o vetor de deslocamentos e rotações nos nós do modelo.

### Carregamentos Normativos

Para o dimensionamento e análise de pontes, existem diferentes normas que auxiliam no passo a passo para se chegar a um resultado desejável de projeto seguro e econômico. Um dos pontos abordados nessas normas é o tipo de carregamento aplicado na rodovia, variando entre os tipos de caminhões, número de eixos, espaçamento entre rodas, carga em cada um dos eixos, entre outros. Ao redor do mundo, vários países apresentam códigos diferentes e procedimentos diferentes de cálculo, cada um mais aproximado à realidade e à cultura prática de engenharia da região. No caso de pontes rodoviárias, alguns desses códigos são a norma da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO LRFD, 2014) e a Norma Brasileira ABNT NBR 7188 (2024).

Para a AASHTO LRFD (2014), o carregamento mais utilizado é o HL-93, um trem-tipo utilizado principalmente nos Estados Unidos. Esse caminhão possui 3 eixos, o dianteiro com 35 kN e os traseiros com 145 kN, distância entre os eixos dianteiro e traseiro de 4,30 metros e entre eixos traseiros variando entre 4,30 e 9,00 metros e distância entre as rodas de 1,80 metros. A Figura 2 apresenta um esquema representando todas as distâncias e carregamentos de cada um dos eixos. Esse carregamento será utilizado para a obtenção de resultados no presente artigo.

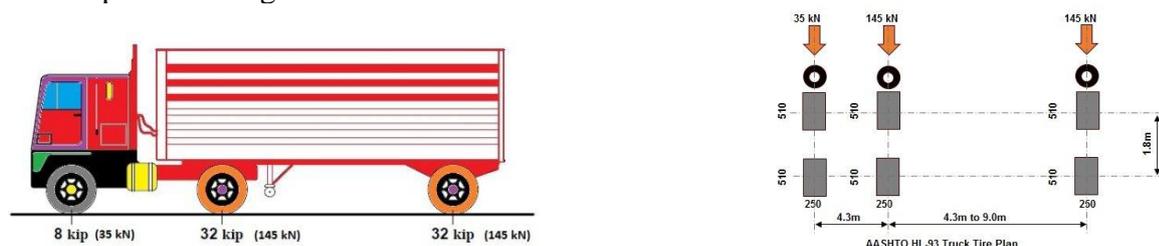


Figura 2 – Modelo do Trem-Tipo HL-93 (AASHTO LRFD, 2014)

Já no Brasil, a norma brasileira NBR 7188 de 2024 (2024) é utilizada. De acordo com o tópico 5 (Ações em pontes e viadutos) dessa norma, a carga móvel rodoviária padrão a ser utilizada em projetos é o TB-450, um veículo-tipo com 450 kN de peso total, seis rodas (cada uma com 75 kN), três eixos com distância 1,5 metros entre eles e área de ocupação de 18 m<sup>2</sup>, além de uma sobrecarga de multidão de 5,0 kN/m<sup>2</sup> distribuída em toda a extensão restante da ponte.

### Análise Dinâmica

Para a análise dinâmica de estruturas, podem ser realizadas muitas análises diferentes, porém algumas das mais utilizadas são a análise modal linear-dinâmica e uma análise linear-dinâmica forçada. A primeira análise corresponde à análise modal linear-dinâmica sem amortecimento, ou seja, deseja-se obter as frequências naturais e os modos de vibração que dependem apenas dos parâmetros da estrutura (sua rigidez e sua massa), sem considerar as forças internas ou o sistema dissipativo das vibrações (amortecimento), e ainda sem considerar os carregamentos externos. Para encontrar esses resultados desejados, é solucionado um problema de autovalores e autovetores (Clough & Penzien, 2003).

A segunda análise dinâmica consiste em encontrar os deslocamentos da estrutura a partir dos carregamentos externos aplicados, utilizando, por exemplo, o método de Newmark, também chamado Beta-Newmark (Newmark, 1959), proposto pelo engenheiro e professor Nathan Newmark. O método de Newmark consiste em resolver por integração direta a equação matricial apresentada pela Equação (2), que traduz o equilíbrio dinâmico do sistema ponte-veículo ou apenas do sistema ponte com o veículo sendo representado por forças externas transientes. Para esse método, encontra-se um sistema de equações para aceleração, velocidade e deslocamento que é resolvido por processos iterativos, considerando uma variação no tempo, conhecendo-se as matrizes de massa, amortecimento e rigidez da estrutura.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P \quad (2)$$

Em que:

$M$  é a matriz de massa da estrutura;

$C$  é a matriz de amortecimento da estrutura;

$u$  é o vetor de deslocamentos e rotações nos nós do modelo da estrutura.

$\dot{u}$  é o vetor de velocidades lineares e angulares nos nós do modelo da estrutura.

$\ddot{u}$  é o vetor de acelerações lineares e angulares nos nós do modelo da estrutura.

### Ponte Honestino Guimarães

Uma construção a frente do seu tempo, a ponte Honestino Guimarães foi projetada pelo arquiteto Oscar Niemeyer em 1969 para ligar a região administrativa do Lago Sul com a Asa Sul, parte central da cidade de Brasília. Com uma arquitetura diferente do habitual, o arquiteto expôs a seguinte ideia em uma frase anotada em um esboço: “A ponte deve apenas pousar na superfície como uma andorinha tocando a água”, devendo os blocos de fundação estar escondidos para essa concepção estrutural seja mantida (Fonseca, 2007).

Além da fundação escondida dos observadores, a ponte, à época, foi projetada vencendo o maior vão para estruturas desse tipo, contando com um vão central de 200 metros e dois vãos laterais de 100 metros, totalizando uma extensão total de 400 metros. Após algumas alterações realizadas no projeto, por conta de uma baixa resistência do solo que impossibilitou os blocos de fundação idealizados no projeto inicial, a estrutura foi remodelada para um vão central de 220 metros e dois vãos laterais de 110 metros, chegando a um comprimento total de 440 metros (Fonseca, 2007).

Após mais de 1 ano de obra, foi necessário paralisá-la, visto que foi constatado que o dimensionamento realizado para as protensões da estrutura era insuficiente para garantir a segurança da mesma (Bofill et al., 2023). Com isso, para evitar mais problemas na estrutura, foram realizadas mudanças no projeto do vão central de forma a diminuir os esforços no centro do vão e garantir a estabilidade da ponte. Essa redução se deu pela alteração de 58 metros do centro da ponte para uma estrutura em caixão metálico, construída como uma viga Gerber, causando uma diminuição para 1/3 do peso próprio original da estrutura neste trecho central. O vão central metálico pode ser visualizado na Figura 3.

A seção transversal da superestrutura contém 3 faixas de rolamento, cada uma com 3,5 metros, além de duas faixas de passeio, cada uma com 1,5 metros, totalizando uma seção transversal total com 13,5 metros. A seção transversal da ponte é variável, tanto na parte dos arcos de concreto quanto na parte metálica. Para os arcos de concreto, a altura máxima apresentada é de 12 metros na região dos apoios e 2,1 metros no meio do vão. Enquanto isso, o vão central varia de 2,4 metros a 2,1 metros, aproximadamente.



**Figura 3 – Vão Central Metálico**

### Modelagem Numérica – Ansys

Para a análise linear dinâmica com cargas móveis, será utilizado um código em MATLAB concebido inicialmente por Ribeiro (2012) e atualizado por Silva *et al.* (2023). Através deste código, a análise dinâmica da estrutura é realizada através do método da superposição modal. Para que o código seja utilizado com êxito, é necessário um código de interface para o software Ansys na linguagem *ANSYS Parametric Design Language* (APDL). Para iniciar, foram definidos os diferentes tipos de elementos que serão utilizados. O primeiro elemento utilizado foi a viga BEAM4 (viga de Euler-Bernoulli clássica tridimensional), que possui 6 graus de liberdade (deslocamento e rotação nos eixos x, y e z) e cujas informações de entrada necessárias para esse modelo foram área, momento de inércia de área em torno de um eixo local z, momento de inércia de área em torno de um eixo local y e momento de inércia de área torcional (em x). O segundo elemento foi o elemento MPC184, definido como uma viga rígida e usado principalmente para restrição de graus de liberdade. As

informações de entrada desse elemento são a definição da forma do tipo de elemento de restrição que se deseja utilizar e a especificação do método de imposição dessa restrição (ANSYS, 2017).

Também foi utilizado o elemento COMBIN14, um elemento de mola com até três graus de liberdade em cada nó. Suas informações de entrada são os coeficientes de mola adotados para cada uma das direções, que visam representar a interação solo-estrutura. Por último, foi adotado um elemento de viga BEAM188, uma viga baseada na teoria de Timoshenko (ANSYS, 2017). Este elemento será utilizado para transferir as cargas do pneu para o elemento de viga principal, que utilizará BEAM4.

Após definidos os elementos a serem utilizados, deu-se início a modelagem da ponte. Por ter seção variável, foi necessário discretizar a estrutura com diferentes propriedades geométricas para que o modelo numérico correspondesse o mais próximo possível a estrutura real. Para os arcos de concreto foram definidas 21 seções diferentes, considerando ainda que a ponte é simétrica e ambos os lados apresentam as mesmas características. Para essas 21 seções foram definidos os momentos de inércia de área em torno do eixo z (eixo horizontal perpendicular ao eixo principal da ponte), em torno do eixo y (eixo vertical) e em torno do eixo x (eixo paralelo ao eixo principal da ponte), além da área das seções transversais.

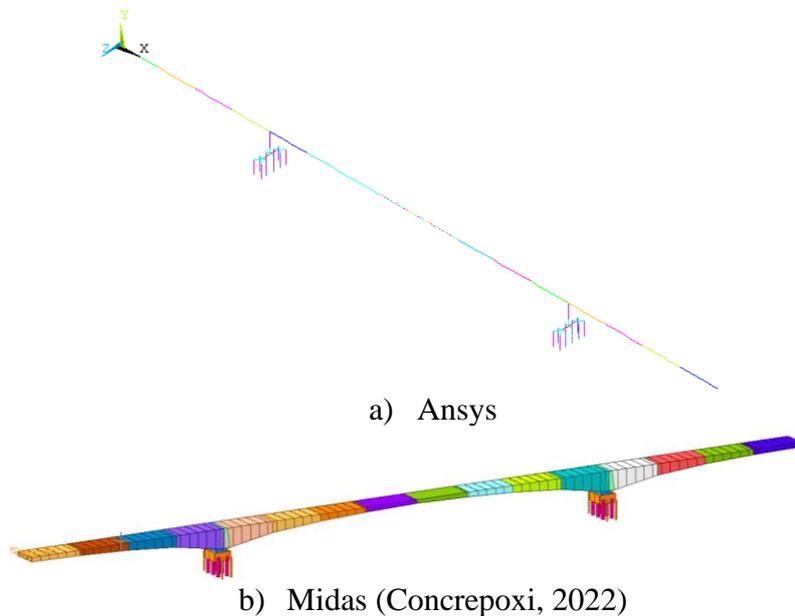
Com os elementos e as seções definidas, é necessário definir os materiais a serem utilizados para a parte de concreto da ponte. Foram definidos dois concretos diferentes, o primeiro utilizado para a superestrutura, com um coeficiente de Poisson de 0,2 e uma densidade de 2400 kg/m<sup>3</sup>. Já o segundo concreto foi definido para ser utilizado nas fundações da ponte (blocos e estacas), com um coeficiente de Poisson de 0,2 e uma densidade de 2400 kg/m<sup>3</sup>. Os módulos de elasticidades de ambos os materiais foram definidos como aproximadamente 24 GPa. As resistências desses materiais foram definidas conforme estudo realizado pela empresa ConcrEpoxi (2022), previamente à modelagem numérica para verificação estrutural da ponte.

Após definidas todas as características necessárias, são definidos os nós, espaçados a cada 5 m, respeitando a dimensão máxima da ponte, variando de 0 a 440 m no eixo x, de 0 a -24,65 m para o eixo y (correspondente à altura máxima das estacas) e de -9 a 9 no eixo z (correspondente às dimensões dos blocos). Com os nós definidos, é necessário indicar os elementos, ligando os nós corretamente e com as seleções adequadas das informações de tipo de elemento, seção transversal, material e nós. O elemento escolhido para a superestrutura e para as estacas foi o elemento BEAM4. Para unir as cabeças das estacas à extremidade do bloco foi utilizado o elemento MPC184 (viga rígida), transferindo os esforços do bloco para as estacas.

A parte de concreto foi finalizada após esse passo a passo, sendo necessário então discretizar as estacas conforme o coeficiente de mola adotado para o solo específico. Foram definidos pontos em x e z com uma distância de 0,5 m para os pontos originais da estaca, ligando-os com o elemento COMBIN14. O coeficiente de mola adotado foi de 5 MN/m para os pontos intermediários da estaca e de 10 MN/m para os pontos de extremidade da estaca. É importante destacar que os pontos criados para a ligação das molas foram travados para os graus de liberdade de translação nos três eixos, além dos nós de extremidade das estacas e os pontos inicial e final da superestrutura (respectivamente correspondentes a 0 e 440 metros).

Um ponto de atenção para a modelagem numérica da ponte Honestino Guimarães é a criação da rótula do dente Gerber. Para simular essa rótula, foi criado um elemento *dummy*, ou seja, um elemento BEAM4, com uma inércia relativamente baixa de modo que os esforços de flexão em torno do eixo z não sejam transferidos. Esse elemento liga o último nó dos arcos de concreto ao nó criado para a rótula e o nó criado para a rótula até o primeiro nó do vão central metálico.

Para o detalhamento do vão metálico, foi seguido o mesmo passo a passo realizado para os arcos de concreto, porém com materiais diferentes e com um espaçamento entre nós de 1 metro, gerando 29 seções diferentes, considerando ainda que o vão central metálico, de 58 m, é simétrico. O material adotado para a seção metálica foi um aço de módulo de elasticidade de 199,95 GPa, coeficiente de Poisson de 0,3 e densidade de 7850 kg/m<sup>3</sup>. Após a realização de todos esses passos, o modelo numérico estrutural da ponte Honestino Guimarães está completo e pronto para simular as análises desejadas.



a) Ansys  
b) Midas (Concrepxi, 2022)  
**Figura 4 – Modelo Numérico Ansys**

Para a utilização do código de Ribeiro (2012) e atualizado por Silva *et al.* (2023) em MATLAB, o carregamento adotado no *software* deve ser aplicado sobre um elemento do tipo BEAM188. Com isso, foi criado um tabuleiro apenas para a passagem do trem tipo, de forma que os efeitos causados pelo veículo passassem para a estrutura sem perdas. Para isso, foram definidos nós a uma altura de 0,1 m da estrutura original, com o elemento BEAM188, e dimensões 0,5 m de base e 0,1 m de altura. Também foram considerados elementos verticais ligando os nós originais do tabuleiro aos novos nós, no eixo y, de forma a conectar os elementos. O modelo final está apresentado na Figura 4, já finalizado e pronto para as análises lineares dinâmicas com cargas móveis. Na figura, cada cor apresentada representa uma seção diferente adotada para a ponte. Na mesma figura, também foi inserido o modelo numérico realizado pela empresa ConcrEpxi (2022) para o reforço estrutura da estrutura. O modelo foi utilizado apenas para a renderização da estrutura e para possibilitar a comparação.

### **Análise Linear Dinâmica com Cargas Móveis**

Para a análise linear dinâmica com cargas móveis, foi utilizado o código criado por Ribeiro (2012) e atualizado por Silva *et al.* (2023). O código, a partir da entrada de alguns dados como nós iniciais e finais da estrutura, taxas de amortecimento da estrutura para cada modo de vibração, intervalo de integração (s), constantes  $\beta$  e  $\gamma$  de Newmark e do próprio código feito em linguagem APDL, é possível a realização de análises dinâmicas (com ou sem interação veículo-pavimento-estrutura). É possível obter frequências naturais, deslocamentos, acelerações, tensões, deformações, esforços, entre outros considerando a qualidade do pavimento, a passagem do tempo e a consequente deterioração desse pavimento, para diferentes velocidades dos veículos e diferentes trens-tipo.

Já iniciando a inserção dos parâmetros necessários, foram considerados 5 pontos diferentes. O primeiro foi o nó central no vão central metálico (correspondente a 120 m), o segundo um nó a 100 m do início da ponte e o terceiro a 50 m do início da ponte, ambos antes do pilar de apoio da estrutura. O quarto nó selecionado está localizado a 150 m do início da ponte e o quinto a 190 m, ambos após o pilar, porém ainda nos arcos de concreto, antes do início do vão central metálico.

Foram realizadas 12 análises diferentes com velocidades do veículo HL-93 diferentes, iniciando de 10 km/h até 120 km/h, em intervalos de 10 km/h. É importante ressaltar que foram escolhidos diferentes intervalos de integração para as análises. Para as velocidades de 10 a 70 km/h, foi utilizado um intervalo de integração de 0,01 s, considerando que essas velocidades são baixas. Já para as velocidades de 80 a 120 km/h, o intervalo de integração escolhido foi de 0,005s, considerando que, pelo fato dessas velocidades serem altas, o intervalo necessita ser menor para identificar melhor as vibrações e as variações de deslocamentos nos nós da estrutura.

Na ausência de informação melhor, foi estabelecido um amortecimento conforme a norma europeia EN 1991-2 (2003), tabela 6.6. A norma define que, para pontes de concreto protendido com vão superior a 20 metros,

o valor de amortecimento a ser utilizado é de 1%, portanto esse valor foi inserido no código para a análise para todos os modos de vibração.

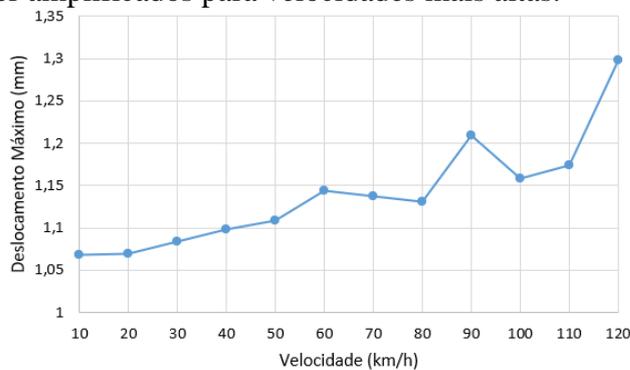
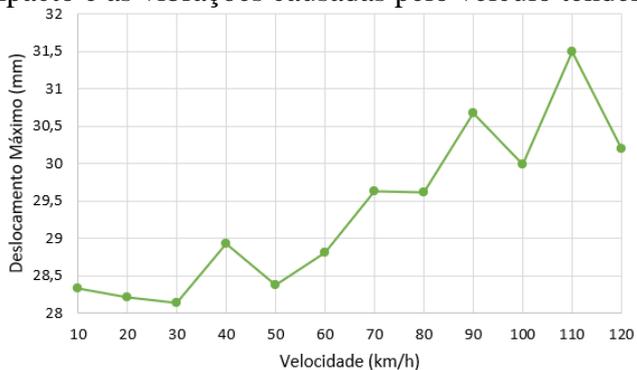
### Resultados e Conclusões

Primeiramente, a partir do código de Ribeiro (2012) e atualizado por Silva *et al.* (2023), encontraram-se as frequências naturais da estrutura, tendo sido comparadas com as frequências já conhecidas pelo Ansys. Com isso, os valores da Tabela 1 foram obtidos. Na última coluna da Tabela 1 encontram-se as diferenças entre as frequências encontradas pelos dois programas. Como os resultados foram muito próximos, entende-se que o código desenvolvido no Matlab está adequado e pode ser utilizado para as demais análises.

**Tabela 1 – Frequências Naturais**

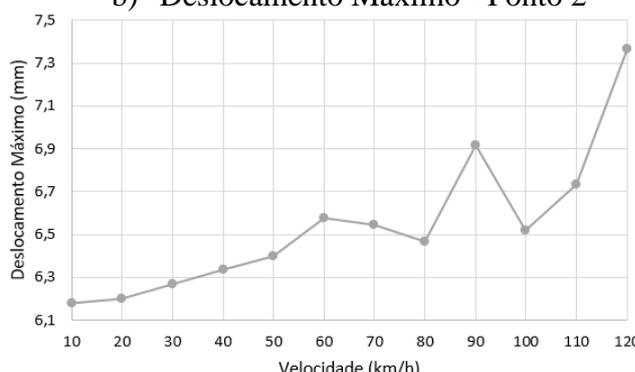
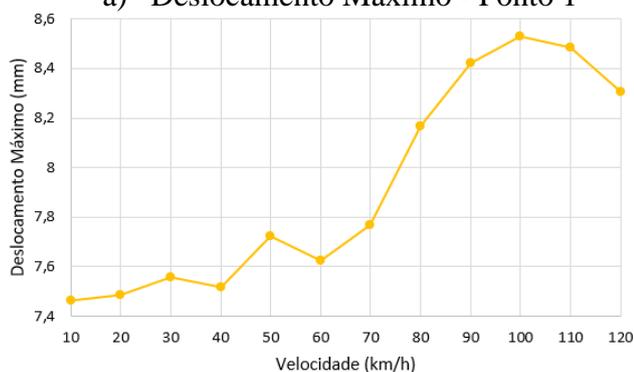
ANSYS (Hz)	Matlab (Hz)	Diferença (%)
0,50765	0,5055	0,42
0,90399	0,8982	0,64
1,0017	1,0015	0,02
1,2537	1,2454	0,66
1,7475	1,7462	0,07

Após a comparação das frequências, avaliou-se o deslocamento máximo e a aceleração máxima para cada um dos pontos nas diferentes velocidades estudadas. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 5 e 6. Percebe-se que quanto maior a velocidade, maior tende a ser a aceleração e o deslocamento. Um dos motivos para esse fenômeno é o fato de, quanto maior a velocidade, mais intensas são as forças dinâmicas, visto que o impacto e as vibrações causadas pelo veículo tendem a ser amplificados para velocidades mais altas.



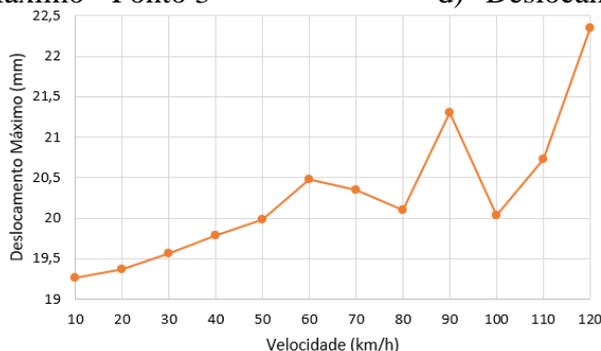
a) Deslocamento Máximo - Ponto 1

b) Deslocamento Máximo - Ponto 2



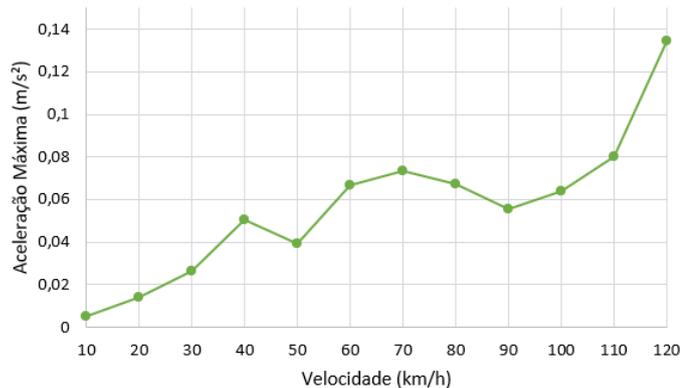
c) Deslocamento Máximo - Ponto 3

d) Deslocamento Máximo - Ponto 4

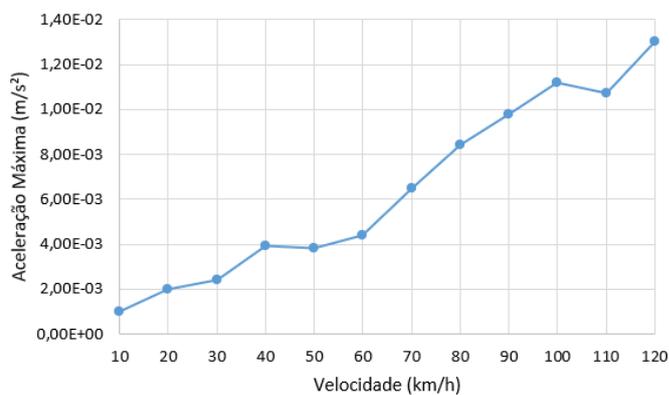


e) Deslocamento Máximo - Ponto 5

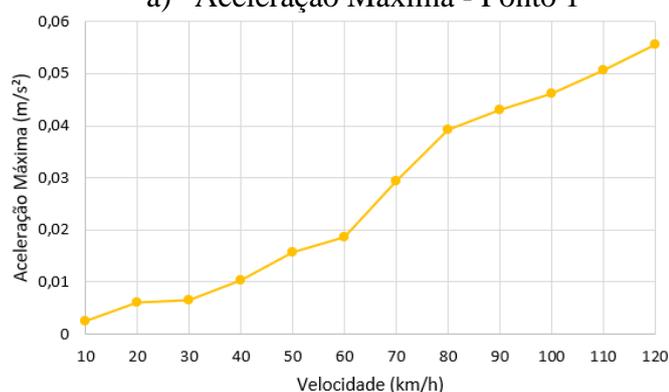
**Figura 5– Deslocamentos Máximos**



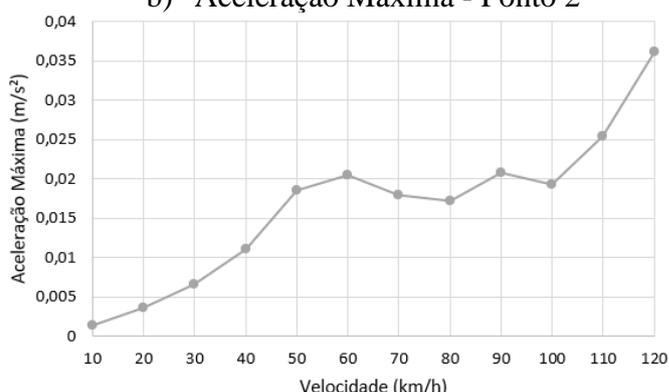
a) Aceleração Máxima - Ponto 1



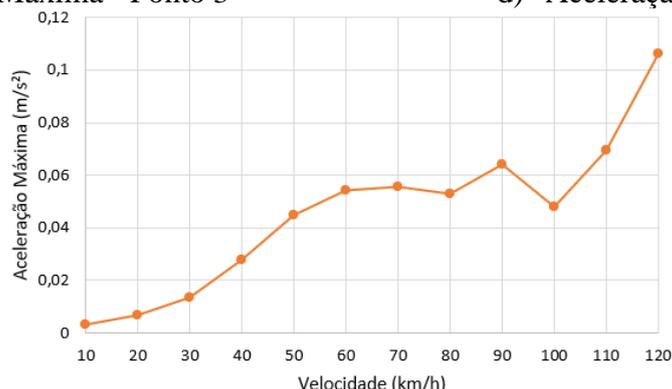
b) Aceleração Máxima - Ponto 2



c) Aceleração Máxima - Ponto 3



d) Aceleração Máxima - Ponto 4

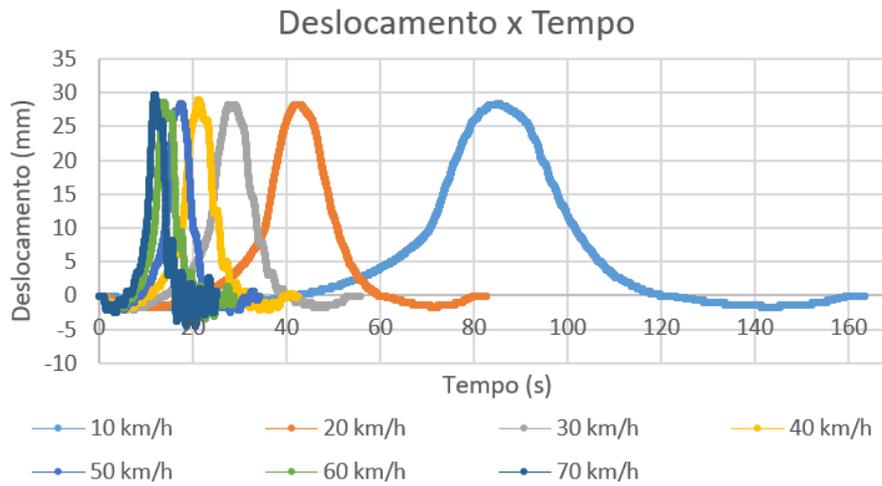


e) Aceleração Máxima - Ponto 3

**Figura 6 – Acelerações Máximas**

Além da análise dos deslocamentos e acelerações máximos obtidos na estrutura, também foi feita uma análise para o ponto central, onde os deslocamento e acelerações são maiores, avaliando como esse deslocamento se dá para as diferentes velocidades durante o trajeto do veículo sobre a ponte. Essa análise foi realizada para velocidades de 10 a 70 km/h, considerando o intervalo de integração de 0,01 s. Os resultados encontram-se na Figura 7. No eixo x está representado o tempo que o veículo demorou para percorrer a ponte inteira, em segundos, enquanto no eixo y está representado o deslocamento, em milímetros.

Com esse gráfico, foi possível observar que, para velocidades maiores, a ponte está realmente vibrando mais, vide a mudança de sinal dos deslocamentos, e os deslocamentos são maiores. Caso se realizasse uma análise com interação veículo-pavimento-estrutura, com consideração das irregularidades do pavimento, visto que, a qualidade do pavimento tem grande influência na resposta dinâmica de pontes rodoviárias, os deslocamentos seriam ainda maiores para pavimentos com mais irregularidades, visto que quanto pior a qualidade do pavimento, maiores os efeitos dinâmicos sofridos pela estrutura (Cardoso et al., 2024).



**Figura 7 – Deslocamentos para o Meio do Vão**

Foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos pelo código no Matlab com análise linear dinâmica com cargas móveis, com o resultado obtido para o Ansys, considerando um carregamento correspondente ao HL-93 parado no meio do vão. Foram consideradas cargas pontuais respeitando os espaçamentos e carregamentos por eixo apresentados na Figura 2, obtendo-se assim o deslocamento máximo em y no meio do vão, a partir de uma análise linear estática realizada pelo código em linguagem APDL.

Para essa análise obteve-se um deslocamento de 26,058 mm, e considerou-se a média dos deslocamentos máximos para o ponto 1, no meio do vão. Comparando-se essa média (29,365 mm) com o valor de 26,058 obtido para a análise estática, percebe-se que houve uma variação de 11,26%. Porém quando se considera os valores para cada uma das velocidades, essa diferença pode chegar até 17,27%. Com uma análise dinâmica, o deslocamento pode ser amplificado por considerar as ações e a resposta dinâmicas da estrutura, considerada mais desfavorável do que a resposta estática da estrutura. Os resultados comparativos podem ser observados na Tabela 2.

Para a Tabela 2, é importante ressaltar que a velocidade só foi aplicada para o cálculo dos deslocamentos no MatLab, visto que no Ansys foi adotada uma carga pontual aplicada nos pontos desejados, sem considerar a movimentação do veículo na ponte. Além disso, a diferença foi calculada a partir do único valor obtido pelo Ansys e comparado com o valor obtido para cada uma das velocidades no MatLab.

**Tabela 2 – Deslocamentos Máximos – Meio do Vão**

Ansys (mm)	Velocidade (km/h)	MatLab (mm)	Diferença (%)
26,058	10	28,3301	8,02
	20	28,2164	7,65
	30	28,1380	7,39
	40	28,9224	9,90
	50	28,3702	8,15
	60	28,8048	9,54
	70	29,6341	12,07
	80	29,6208	12,03
	90	30,6685	15,03
	100	29,9839	13,09
	110	31,4944	17,27
	120	30,1944	13,70
Média		29,3650	11,26

Isso mostra a importância de considerar o comportamento dinâmico das estruturas para o seu correto dimensionamento e verificação, visto que pode ocorrer uma variação de quase 20% quando se considera apenas a análise estática desse tipo de estrutura.

Além disso, é de extrema importância que a ponte Honestino Guimarães tenha um modelo completo, incluindo os arcos de concreto e o vão central metálico, possibilitando a análise da estrutura como um todo, tanto estática quanto dinâmica. A modelagem computacional dessa estrutura permite que essa obra de arte especial tenha seu monitoramento realizado, prevendo possíveis reparos e reforços e evitando acidentes que possam causar prejuízos econômicos ou de vidas.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à NOVACAP – Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil pelo fornecimento dos projetos para realização dessa pesquisa.

## Referências

- AASHTO LRFD. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 2014.
- ABNT NBR 7188. Ações Devido ao Tráfego de Veículos Rodoviários e de Pedestres em Pontes, Viadutos E Passarelas. 2024.
- ANSYS. ANSYS Theory Reference 17.2. 2017.
- BATHE, K.-J. Finite Element Procedures. In Prentice Hall, 1996.
- BOFILL, G. B.; ALMEIDA, R.; ALENCAR, G. S. Desenvolvimento de um Modelo Numérico em Elementos Finitos para o Vão Central em Estrutura Metálica da Ponte Honestino Guimarães. CONSTRUMETAL 2023 - 9o Congresso de Construção Metálica, 2023.
- CALÇADA, R. A. B. Avaliação Experimental e Numérica de Efeitos Dinâmicos de Cargas de Tráfego em Pontes Rodoviárias. Universidade do Porto, 2001.
- CARBONARI, S.; NICOLETTI, V.; MARTINI, R.; GARA, F. Dynamics of bridges during proof load tests and determination of mass-normalized mode shapes from OMA. *Engineering Structures*, 310, 2024.
- CARDOSO, M. L.; ALENCAR, G.; SANTOS DA SILVA, J. G. Analysis Methodology for Dynamic Structural Behaviour Modelling of Highway Bridges Based on Monte Carlo Simulations (Mcs) Considering Vehicle-Pavement-Bridge Interaction. *International Journal of Structural Integrity*, 2024.
- CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. Dynamics of structures. *Earthquake Engineering Handbook* (3rd ed.), 2003.
- CONCREPOXI. Resultados da verificação estrutural. 2022.
- EN 1991-2. Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads os bridges. 2003.
- FABEANE, R. Pontes Mistas Aço-Concreto: Estudo de Diretrizes para Dimensionamento Otimizado. 2015.
- FILHO, A. A. Elementos Finitos- A Base da Tecnologia CAE. 2000.
- FONSECA, R. P. DA. A Ponte de Oscar Niemeyer em Brasília : Construção, Forma e Função Estrutural. 2007.
- NEWMARK, N.M. A Method of Computation for Structural Dynamics. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 85, No 3, p. 67–94. 1959.
- OKUMOTO, Y.; TAKEDA, Y.; MANO, M.; OKADA, T. Design of Ship Hull Structures: a Practical Guide for Engineers. 2009.
- RIBEIRO, D. R. F. Dynamic Effects Induced by Traffic in Railway Bridges: Numerical Modeling, Calibration and Experimental Validation. 2012.
- SANTOS, A. F.; BONATTE, M. S.; SOUSA, H. S.; BITTENCOURT, T. N.; MATOS, J. C. Improvement of the Inspection Interval of Highway Bridges through Predictive Models of Deterioration. *Buildings*, Vol. 12, No 2, p. 1-22, 2022.
- SILVA, A. C. S.; ALENCAR, G. S.; SILVA, J. G. S. Advances in Methodology for Fatigue Assessment of Composite Steel–Concrete Highway Bridges Based on the Vehicle–Bridge Dynamic Interaction and Pavement Deterioration Model. *Metal*, Vol. 13, No 8, 2023.