



Avaliação da Resposta Dinâmica de Uma Ponte Sob Massas Móveis

Rafael Costa da Hora¹, Silvio de Souza Lima², Sérgio Hampshire de Carvalho Santos³

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro / Departamento de Estruturas / rafaelcostadahora@poli.ufrj.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro / Departamento de Estruturas / silvio@poli.ufrj.br

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro / Departamento de Estruturas / sergiohampshire@poli.ufrj.br

Resumo

O crescente avanço tecnológico permite a concepção de estruturas cada vez mais sofisticadas e esbeltas. No caso de pontes, uma análise mais robusta se faz necessária tendo em vista a complexidade dos carregamentos de natureza dinâmica atuantes. A NBR-7187 de 2003, referente a projeto de pontes, trata o efeito da carga móvel na estrutura de maneira relativamente simples. O efeito dinâmico é levado em consideração através de um coeficiente de impacto ou fator de amplificação dinâmica para a majoração dos efeitos estáticos. Esta abordagem na maioria das vezes leva a resultados a favor da segurança. Há casos em que as forças de inércia causadas pelas acelerações das massas dos veículos e da própria estrutura não podem ser negligenciadas. Com o aumento da velocidade dos veículos junto com o aumento da relação massa do veículo/massa da ponte aquelas forças podem atingir valores não mais desprezíveis. Este problema é relevante em sistemas de trens de alta velocidade. Uma análise mais avançada do problema deve tomar em conta a interação veículo-estrutura. O presente trabalho visa avaliar, através do programa LOADYN, ferramenta computacional desenvolvida pelos autores, o comportamento dinâmico de uma ponte submetida a massas móveis. Existem diferentes abordagens para a análise deste tipo de problema. A ferramenta numérica em questão leva em consideração a atualização da matriz de massa do sistema a cada intervalo de integração em função da posição das massas dos veículos ao longo do domínio da estrutura. Com os resultados obtidos, é possível comparar a solução do histórico no tempo da resposta da estrutura para os problemas de massas e cargas móveis em termos de deslocamentos, velocidades e acelerações e obter os esforços e identificar trechos ressonantes no histórico da resposta.

Palavras-chave

Análise dinâmica; Massas móveis; Interação veículo-estrutura; LOADYN.

Introdução

Nos dias de hoje, a existência de trens de alta velocidade para transporte humano, por exemplo, requer um nível mais avançado de segurança, não apenas do veículo em si, mas também da estrutura que o suporta. Tal necessidade se faz presente principalmente em pontes, tendo em vista a complexidade estrutural e a natureza dinâmica dos carregamentos atuantes. Consequentemente, torna-se necessária uma análise mais avançada e sofisticada das estruturas em questão. Na NBR 7187 (2003), referente a projeto de pontes, o efeito dinâmico é levado em consideração através de um coeficiente de impacto ou fator de amplificação dinâmica para a majoração dos efeitos estáticos. Esta abordagem do problema leva a resultados favoráveis à segurança. Uma análise mais específica do problema deve tomar em conta a interação veículo-estrutura (LIMA, SORIANO e REIS, 2002).

A norma brasileira preconiza as seguintes equações para obtenção do coeficiente de impacto ϕ para pontes rodoviárias e ferroviárias, respectivamente.

$$\varphi = 1.4 - 0.007 \cdot L \quad (1)$$

$$\varphi = 0.001(1600 - 60\sqrt{L} + 2.225 \cdot L) \quad (2)$$

Observa-se nas expressões anteriores que o coeficiente de impacto é função apenas do comprimento L do vão. Não levam em consideração outros fatores influentes como o sistema estrutural, características dinâmicas do sistema como frequências e modos naturais de vibração e amortecimento, velocidade e massa do veículo. Em casos específicos, como em pontes para trens de alta velocidade, não se pode apenas considerar esforços de natureza dinâmica como a simples variação de posição de cargas estáticas pontuais ou distribuídas ao longo da estrutura. Ao fazê-lo, negligenciam-se as forças de inércia causadas pela vibração das massas do veículo e da estrutura. Com o aumento da velocidade dos veículos junto com o aumento da relação massa do veículo/massa da ponte aquelas forças podem atingir valores não mais desprezíveis.

Interação veículo-estrutura

Alguns dos problemas de origem dinâmica encontrados em pontes destinadas a veículos de alta velocidade são o impacto e vibração causados pela passagem dos trens. Estes diferem dos problemas encontrados em pontes rodoviárias convencionais pelas seguintes razões. Primeiro, as cargas dinâmicas induzidas pela passagem de um trem são de natureza repetitiva e caracterizadas pela forma sequencial das cargas das rodas e distância entre eixos, o que implica na imposição de determinadas frequências excitadoras à estrutura durante sua passagem. Por outro lado, as cargas impostas por tráfego rodoviário são de natureza randômica ou arbitrária ao se levar em consideração a carga das rodas e distância entre eixos dos veículos (YANG, YAU e WU, 2004). Segundo, trens de alta velocidade possuem grandes comprimentos e se movem a elevadas velocidades de até 600 km/h, o que possibilita que as frequências externas geradas pela passagem do veículo se aproximem das frequências naturais da estrutura, resultando no fenômeno de ressonância. Uma vez atingida a ressonância, a resposta da estrutura é amplificada continuamente à medida que mais cargas solicitam a estrutura de forma dinâmica ao passar sobre a mesma. Terceiro, a razão entre a massa do veículo e a da estrutura que suporta a estrada de ferro de um trem de alta velocidade é relativamente alta, o que faz com que a interação veículo-estrutura seja mais evidente e relevante em comparação às pontes rodoviárias.

O problema de interação veículo-estrutura não é tratado de forma direta, tendo em vista a existência de dois subsistemas dinâmicos; o veículo em movimento e a ponte. A interação entre os dois sistemas se dá através de forças de contato, o que em essência, trata-se de um problema tempo-dependente acoplado dinâmico (já que as magnitudes das forças de contato não permanecem constantes devido ao movimento dos sistemas). Pode-se dividir a abordagem da interação veículo-estrutura em duas partes, problema de cargas móveis e a interação das mesmas com a estrutura. Tais abordagens se diferem também pelo fato de que a primeira pode ser resolvida de forma analítica e possui solução fechada possível, enquanto a segunda requer solução numérica.

Como mencionado anteriormente, quando a relação entre a massa do veículo e da estrutura é pequena, ou a velocidade do veículo é baixa, desprezam-se os efeitos de inércia e efeitos elásticos gerados pelo veículo em movimento devidos à oscilação da estrutura. Ou seja, considera-se apenas a estrutura como um sistema dinâmico e simplifica-se a existência do corpo em movimento a uma carga pontual. Tal simplificação é conhecida como modelo da carga móvel.

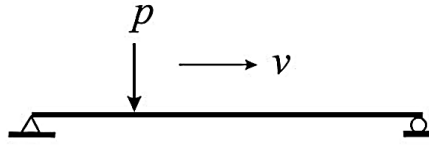


Figura 1 – Modelo simplificado da carga móvel.

Modelos desse tipo são comumente usados quando se tem interesse na resposta da estrutura e não no veículo. A equação 3 apresenta o modelo matemático analítico de Euler-Bernoulli que descreve o problema simplificado da carga móvel para uma viga isostática simplesmente apoiada de seção transversal constante cuja solução analítica é possível.

$$m_b \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} = f(x, t) \quad (3)$$

Onde m_b é massa linear, c o coeficiente de amortecimento viscoso, EI a rigidez flexional da viga, $f(x, t)$ e $w(x, t)$ a força por unidade de comprimento e a deflexão na coordenada x e instante t , respectivamente.

Quando a consideração dos efeitos inerciais causados pelo veículo na estrutura não podem ser negligenciados, adota-se o modelo da massa móvel. Este novo modelo consiste na representação dos veículos em movimento através de massas que se deslocam com uma determinada velocidade ao longo da estrutura como mostrado na Figura 2.

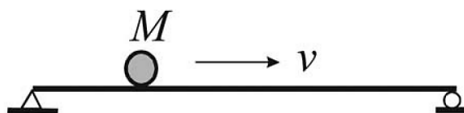


Figura 2 – Modelo da massa móvel.

Ambos os tipos de análises mencionados podem ser estendidos a modelos estruturais mais complexos com múltiplas cargas ou massas móveis, sendo necessária uma abordagem computacional.

Montagem das matrizes do sistema

As forças de contato do sistema variam tanto no tempo quanto no espaço, logo, as matrizes do sistema, as quais são função das forças de contato, devem ser atualizadas e remontadas a cada instante de tempo. A figura 3 representa a identificação dos elementos de contato para um sistema genérico qualquer.

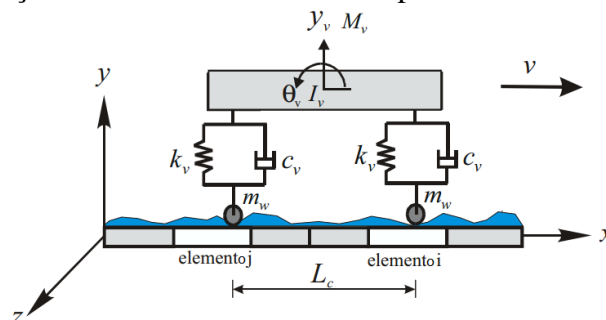


Figura 3 – Elementos de contato da estrutura, adaptado de (YANG, YAU e WU, 2004)

A Figura 3 ilustra os elementos da estrutura que estão sob os pontos de contato do veículo em um determinado instante de tempo, os quais são chamados elementos VBI ou elementos de contato. A cada determinado instante de tempo o sistema estrutural é configurado por elementos de contato diferentes. Isto se deve à natureza dinâmica do problema, ou seja, a passagem do veículo e conseqüentemente a variação da posição dos pontos de contato ao longo de toda a estrutura. Os demais elementos da estrutura no determinado instante de tempo se comportam como elementos de pórtico espacial comuns. As matrizes que constituem o veículo e as respectivas forças de contato estão acopladas na formação matricial do elemento VBI, que por sua vez faz parte da matriz global do sistema. A cada instante um elemento do sistema estrutural pode ser ou não um elemento VBI dependendo da posição do veículo. Isso explica porque as matrizes globais do sistema $[M]$ e $[K]$ devem ser atualizadas a cada incremento de tempo.

A abordagem através de forças dinâmicas de contato mostrou-se como a mais indicada, apesar de não trivial, já que permite a resolução de sistemas dinâmicos acoplados independentemente de sua complexidade. Como descrito, a complexidade do sistema dinâmico que representa o veículo não possui grande relevância na resposta da estrutura. Torna-se importante quando se tem como objetivo a resposta do veículo em uma análise de conforto para usuários, por exemplo.

Estudo de caso

Apresenta-se o programa LOADYN através de um estudo de caso. Analisa-se a estrutura de uma ponte com vãos contínuos submetida a diferentes carregamentos móveis. Avaliam-se os resultados obtidos de maneira a comparar a influência dos tipos de carregamentos considerados no comportamento da estrutura. O esquema longitudinal do modelo estrutural analisado, assim como as seções transversais dos seus elementos estruturais são apresentados nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

Sentido de passagem

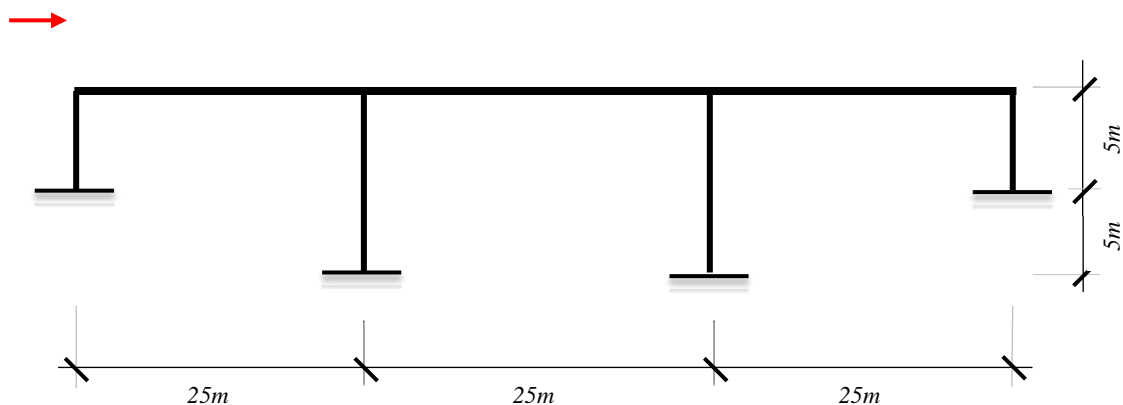


Figura 3 – Esquema do modelo estrutural



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

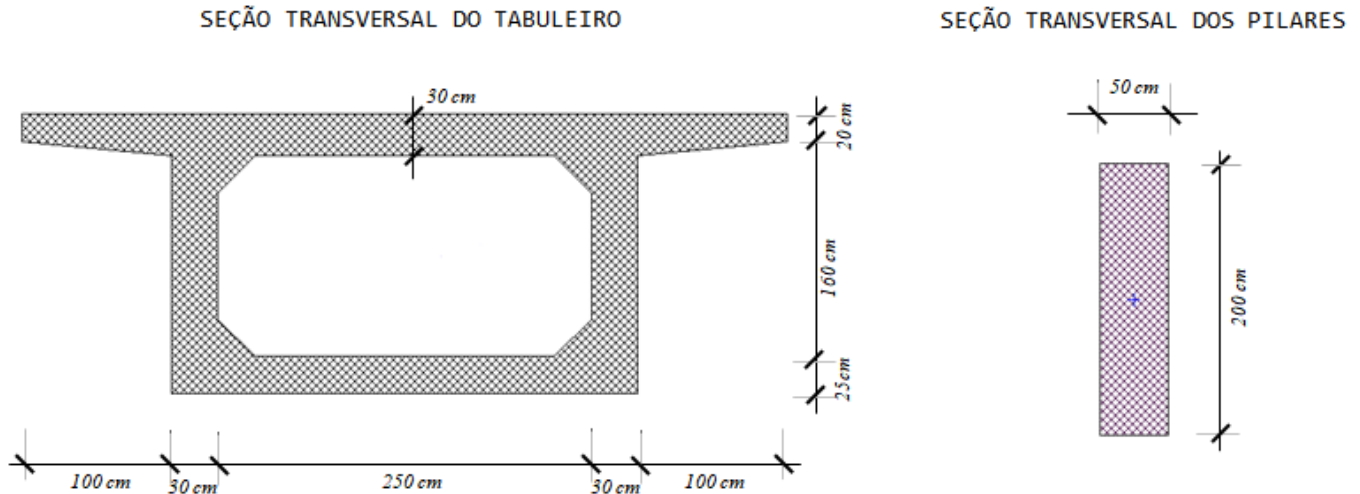


Figura 3 – Seções transversais dos elementos estruturais

Os dados mecânicos e geométricos da estrutura (em kN e m) utilizados como dados de entrada no programa são apresentados na Figura 4 e apresenta-se o modelo pré-processado na Figura 5.

```

MATERIAL PROPERTIES
Num      E      Poisson      Alpha      Gamma
1      28E+06      0.2      1E-05      25.0
0

SECTION PROPERTIES
Num      Ax      Ay      Az      Ix      Iy      Iz
1      3.1      0      0      2.96      5.16      1.51
2      1      0      0      0.07      0.333      0.021
0
  
```

Figura 4 – Propriedades mecânicas e geométricas do modelo

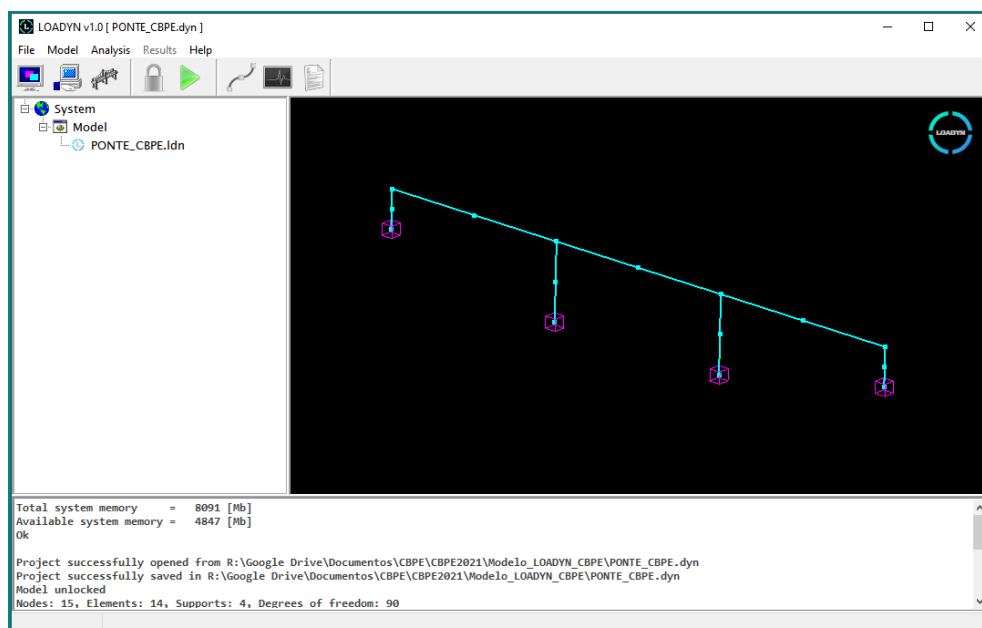


Figura 5 – Modelo estrutural



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Efetua-se uma análise modal para obtenção das frequências naturais relevantes da estrutura usadas como dado de entrada para o cálculo do amortecimento de Rayleigh. As formas de alguns dos modos de vibração, em escala amplificada, são mostradas na Figura 6 e 7. Parte do relatório da análise modal é apresentada na Figura 8.

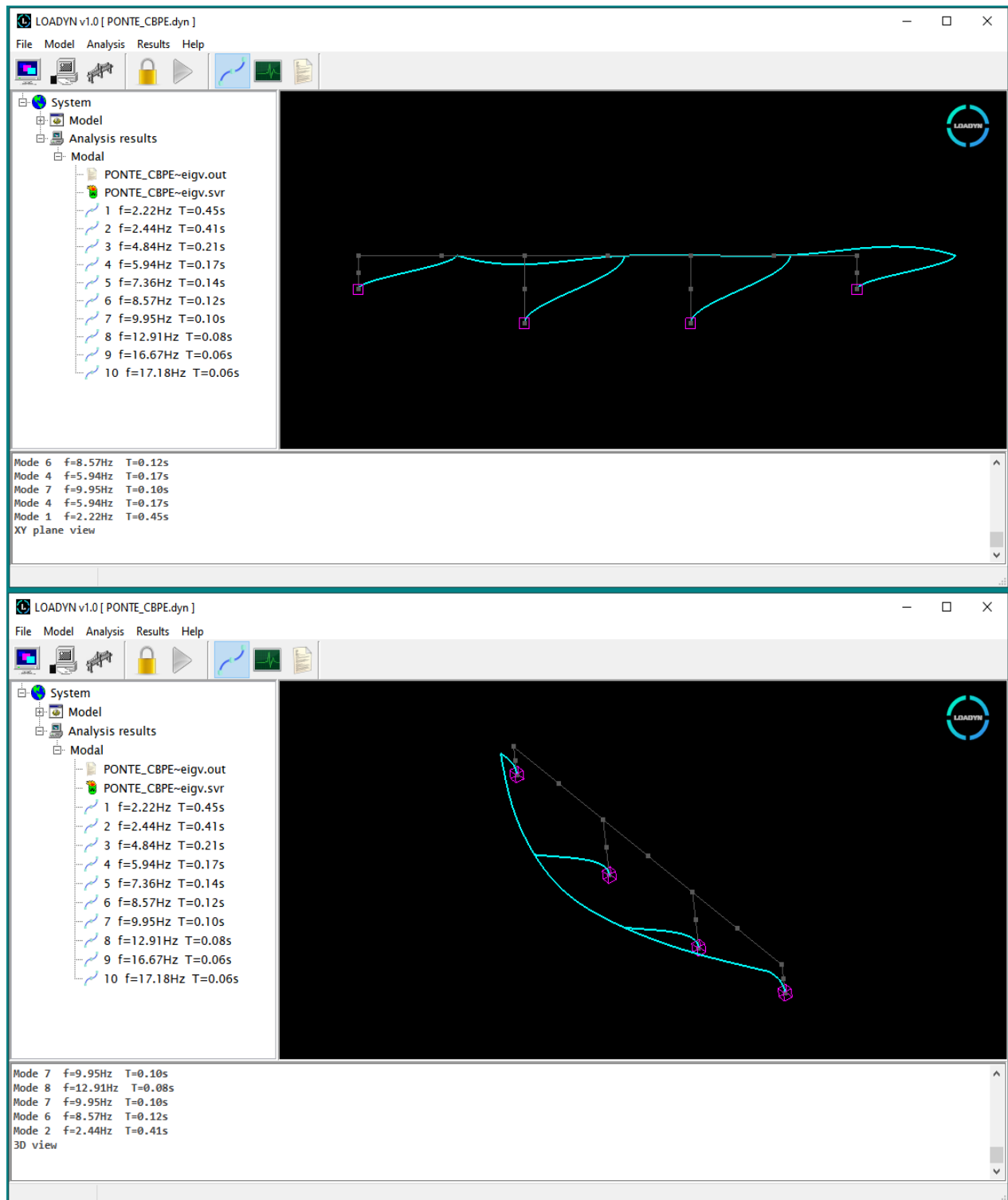


Figura 6 –Primeiro e segundo modos de vibração



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

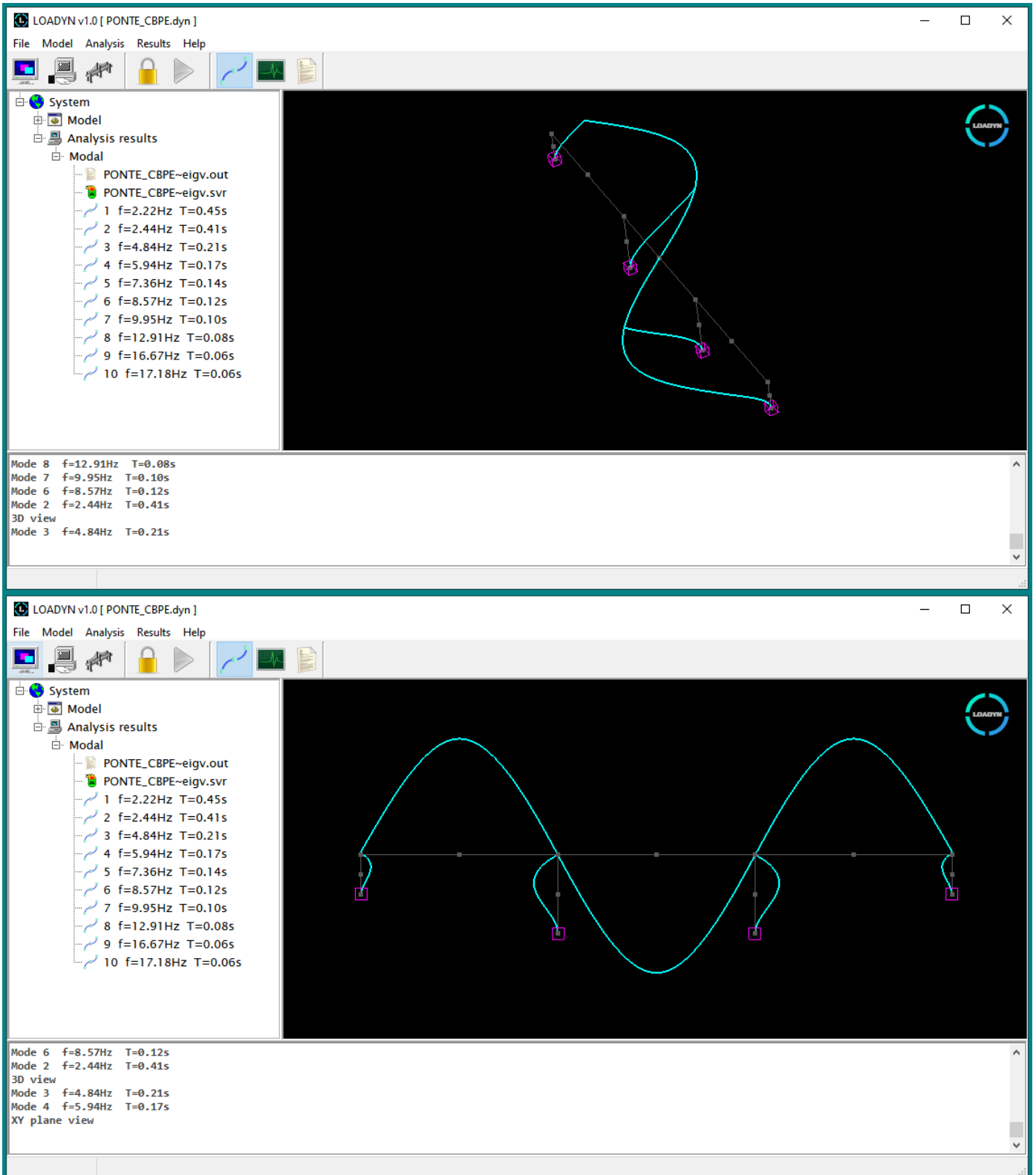


Figura 7 –Terceiro e quarto modos de vibração



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

```

NATURAL FREQUENCIES AND PERIODS

      MODE      EIGENVALUES      OMEGA      FREQUENCY      PERIOD
      -----      (rad2/sec2)      (rad/sec)      (hertz)      (sec)
      -----
1         193.737         13.919         2.215         0.4514
2         234.286         15.306         2.436         0.4105
3         926.230         30.434         4.844         0.2065
4        1393.267         37.326         5.941         0.1683
5        2138.331         46.242         7.360         0.1359
6        2897.843         53.832         8.568         0.1167
7        3912.380         62.549         9.955         0.1005
8        6582.508         81.133        12.913         0.0774
9       10972.705        104.751        16.672         0.0600
10      11653.198        107.950        17.181         0.0582

CONVERGENCE ACHIEVED ON STEP : 9

RIGID BODY MODES FOUND : 0
  
```

Figura 8 –Relatório modal

Assim, pode-se efetuar a análise de massas móveis. Adotou-se um veículo com 6 eixos com espaçamento de 5m entre eixos a uma velocidade de 10 m/s. As propriedades da análise podem ser verificadas a seguir.

```

*****
MOVING MASSES ANALYSIS
*****

RAYLEIGH DAMPING PROPERTIES
Omega i      Omega j      Damp. ratio
  13.9        37.3         0.05
0

TRAFFIC SEQUENCE
Elements
  1 2 3 4 5 6
Entry node
  1 1 1 1 1 1
0

VEHICLE PROPERTIES
Load magnitude      No of loads      Axle dist      Speed      Acceleration
      -100           6                5            10           0
0

MOVING MASSES ANALYSIS DYNAMIC PROPERTIES
Iterations      Delta t      Inertial effect
      1000         0.01         1
0
  
```

Figura 9 –Dados para análise de massas móveis



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

A Figura 10 mostra o histórico no tempo dos deslocamentos verticais dos nós centrais do primeiro (2YD), segundo (4YD) e terceiro vão (6YD).

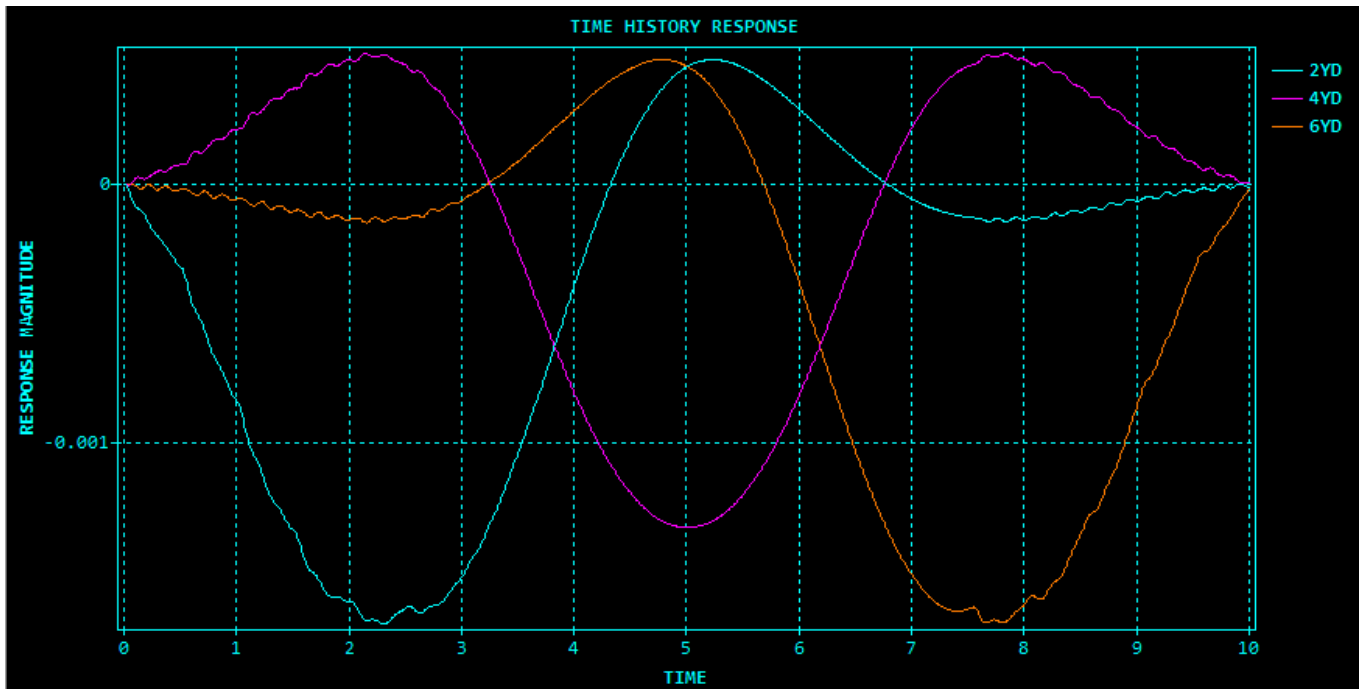


Figura 10 –Histórico no tempo dos deslocamentos

A Figura 11 apresenta o histórico no tempo dos momentos fletores dos nós centrais do primeiro (1JM), segundo (3JM) e terceiro vão (5JM).

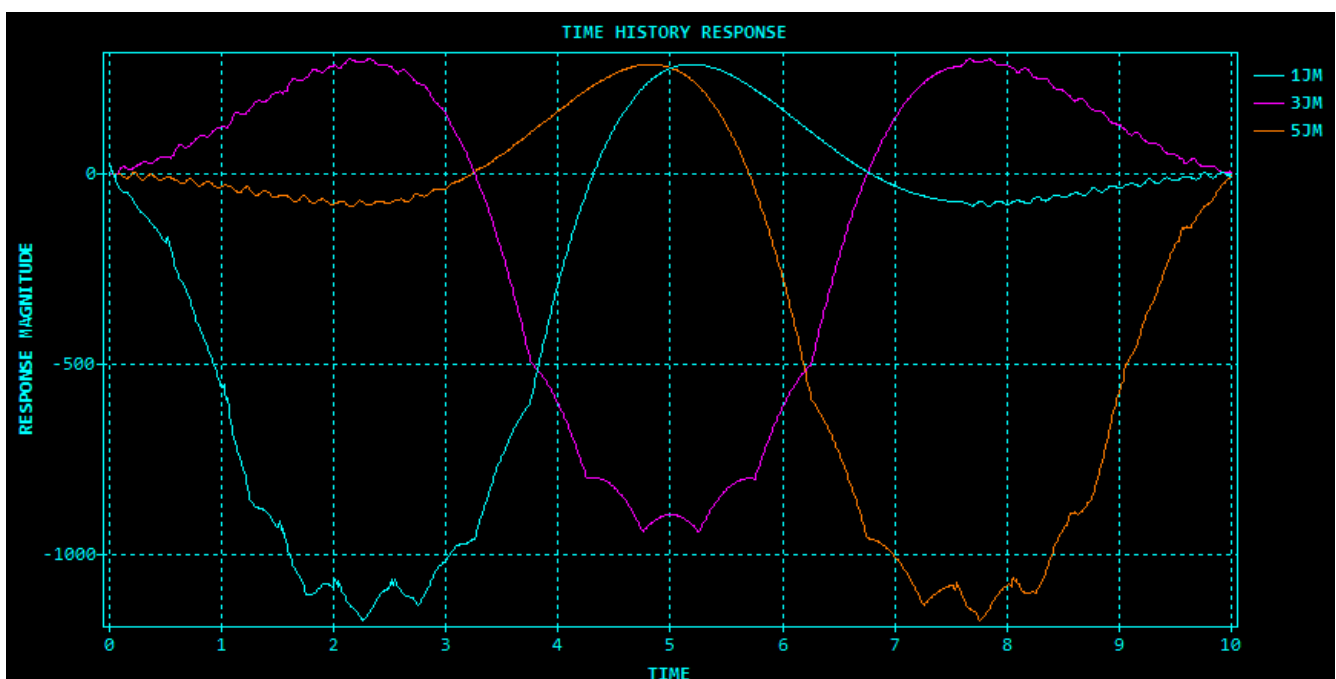


Figura 11 –Histórico no tempo dos momentos fletores



Conclusões

A necessidade de análises específicas vem crescendo de forma concomitante à tecnologia. O problema dinâmico em pontes induzido pelo movimento de veículos é estudado desde os primórdios da engenharia. É comum que se utilizem artifícios capazes de simular de forma simplificada o problema pelo projetista, o que leva a resultados mais próximos à segurança. Uma possibilidade é levar em consideração as forças de inércia geradas pelo veículo na estrutura através das forças de contato, o que proporciona não só esforços e deslocamentos mais realistas, mas também projetos mais econômicos.

Foi desenvolvida uma ferramenta computacional, validada com modelos simples, capaz de solucionar o problema das massas móveis através de forças de contato e do acoplamento da matriz de massa do veículo à da estrutura.

A análise computacional gerou resultados compatíveis com a teoria do problema de viga sob carga/massa móvel. Calcularam-se os históricos no tempo dos deslocamentos, velocidades e acelerações e seus valores máximos absolutos. Também foram obtidos os históricos no tempo dos esforços nos elementos e seus valores máximos. Não se identificou condição de ressonância na estrutura para essas condições de carregamento e velocidade de passagem. A determinação da velocidade crítica de ressonância pode ser feita pelo programa através da opção *critical speed analysis*.

Referências

- BATHE, K.-J. **Finite Element Procedures**. [S.l.]: Prentice-Hall, 1996.
- CHOPRA, A. K. **Dynamics of structures. Theory and application to earthquake engineering**. 4^a. ed. [S.l.]: Prentice-Hall.
- FELIPPA, C. A. **Introduction to finite element methods**. Department of Aerospace Engineering Sciences and Center for Aerospace Structures. Boulder, Colorado, p. 612. 2004.
- FRYBA, L. **Vibration of Solids and Structures under Moving Loads**. Noordhoff International Publishing, Groningen. The Netherlands. 1972.
- FRYBA, L. **Dynamics of Railway Bridges**. Academia Praha. República Tcheca, p. 332. 1966.
- GUPTA, R. K. **Dynamic loading of highway bridges**. ASCE. [S.l.], p. 337–393. 1980.
- LIMA, S. S. **Análise de Estruturas com Computadores**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2017.
- LIMA, S. S.; SANTOS, S. H. C. **Análise dinâmica das estruturas**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, v. 1, 2008.
- LIMA, S. S.; SORIANO, H. L.; REIS, F. J. C. **Considerações Quanto à Determinação do Coeficiente de Impacto em Pontes**. V Congresso de Engenharia Civil. Juiz de Fora, p. 7. 2002.
- MARTHA, L. F. **Análise Matricial de Estruturas com Orientação a Objetos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7187. 2003.
- PRZEMIENIECKI, J. S. **Theory of matrix structural analysis**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1968.
- SORIANO, H. L. **Elementos finitos**. Ciência Moderna. Rio de Janeiro, p. 411. 2009.
- YANG, Y. B.; YAU, J. D.; WU, Y. S. **Vehicle-Bridge Interaction Dynamics: With Applications to High-Speed Railways**. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004.