



PROGRAMA COMPUTACIONAL ACADÊMICO INTERATIVO PARA ANÁLISE DE CARGAS MÓVEIS NA SUPERESTRUTURA DE PONTES SOBRE DUAS VIGAS

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2024.5141

Autores: MIKAELLY DOS SANTOS CAMPOS, RODRIGO SILVEIRA CAMARGO, MARCOS ANTONIO CAMPOS RODRIGUES

Resumo: Neste trabalho, foi desenvolvido um programa acadêmico para o cálculo e análise de cargas móveis sobre a superestrutura de pontes e viadutos sobre vigas, seguindo as prescrições normativas. O programa gera as linhas de influência de reação, momento fletor e esforço cortante, os trens-tipo máximo e mínimo e os esforços solicitantes nas vigas principais. Para aplicação didática, o programa possui interface gráfica que permite ao usuário realizar alterações e verificar os resultados de forma instantânea. Também é possível realizar movimentos com o mouse na tela e verificar como os esforços se alteram na ponte de maneira interativa. Para a validação dos resultados fornecidos pelo programa desenvolvido, estes foram comparados com exemplos disponíveis na literatura técnica e com programa computacional acadêmico. Os exemplos desenvolvidos claramente evidenciam a eficiência da ferramenta computacional desenvolvida para o cálculo de cargas móveis. Também permitem a comparação entre diferentes procedimentos de cálculo produzidos.

Palavras-chave: Cargas móveis; Linhas de influência; Obras de Arte Especiais; Pontes; Programa Acadêmico.

PROGRAMA COMPUTACIONAL ACADÊMICO INTERATIVO PARA ANÁLISE DE CARGAS MÓVEIS NA SUPERESTRUTURA DE PONTES SOBRE DUAS VIGAS

1 INTRODUÇÃO

As pontes têm importância fundamental para o desenvolvimento social e econômico das cidades, visto que as estradas garantem a circulação de bens, de insumos para produção e a disposição dos produtos gerados, bem como a livre circulação de pessoas (MILANI; KRIPKA, 2012).

Em relação aos projetos de pontes, segundo El Debs e Takeya (2007), uma das particularidades existentes quando comparados aos projetos de edificações se refere às ações consideradas, pois, devido ao caráter da carga de utilização das pontes, motivam a necessidade de considerar o efeito dinâmico das cargas, bem como determinar a envoltória dos esforços solicitantes e possibilidade de fadiga dos materiais.

Quanto aos programas computacionais específicos para o cálculo, modelagem e projeto de pontes, pode-se mencionar o SAP2000, RISA 3D, MIDAS Civil, ANSYS e Abaqus FEA (ABRUSHAMI, 2017 *apud* MASCARENHAS *et al.*, 2020) como os mais empregados. No entanto, são todos de acesso não gratuito e que requerem conhecimentos mais aprofundados para se utilizá-los (MASCARENHAS *et al.*, 2020). O que mostra certa carência para o âmbito estudantil ao se tratar de softwares do tema.

Exemplos de trabalhos acadêmicos nessa área foram desenvolvidos por Pereira (2019) e Silva (2018). Entretanto, os programas desenvolvidos não apresentam grande interatividade com o usuário, sendo necessário alterar planilhas ou caixas de texto, sem uma atualização constante dos desenhos e valores dos esforços.

Assim, neste trabalho será descrito um programa computacional acadêmico interativo desenvolvido para a análise das cargas móveis atuantes na superestrutura de pontes em grelha. Com uma interface intuitiva, o programa torna a análise das cargas móveis uma tarefa acessível e compreensível para os usuários. Também permite a inserção de parâmetros da ponte e oferece simulação em tempo real, permitindo que os estudantes explorem e entendam os efeitos e conceitos relacionados à ação das cargas móveis.

2 APLICAÇÃO NO ENSINO

Uma das etapas fundamentais do projeto de pontes está relacionada com os conceitos de linha de influência e obtenção dos trens-tipo máximo e mínimo, que geram as envoltórias dos esforços nas pontes.

Esses esforços de dimensionamento ao longo da longarina da ponte dependem das características da seção transversal, do vão e do veículo tipo considerado. Assim, a aplicação desenvolvida permite uma visualização gráfica e interativa de como os esforços se alteram variando-se as características da ponte.

O programa foi, inicialmente, desenvolvido para estudo da distribuição dos esforços ao longo das longarinas de pontes, considerando apenas o veículo tipo indicado pela NBR 7188:2024. No entanto, também é possível alterar as dimensões da seção transversal e o

vão da ponte. Com isso, permite-se verificar como essas mudanças de dimensões ou da posição do veículo influenciam os esforços na seção transversal e na longarina.

Futuros desenvolvimentos permitirão a alteração do veículo tipo, para que os estudantes compreendam a influência de diferentes tipos de veículos nos esforços de dimensionamento e a importância de sua correta caracterização.

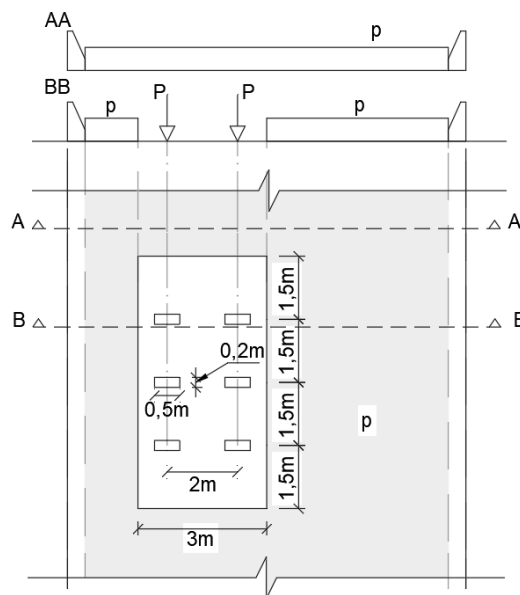
A aplicação será utilizada nas disciplinas de estruturas isostáticas, para ensino de linhas de influência e evidenciar sua importância em projetos reais de Engenharia. Além disso, também será utilizada na disciplina de pontes, para o cálculo automático de tensões e envoltória de esforços em pontes.

3 ANÁLISE DE CARGAS MÓVEIS EM PONTES

Para o cálculo de superestruturas de pontes, adota-se um carregamento normal sobre a ponte composto por um veículo e carga de multidão distribuída ao seu redor. Esse carregamento é distribuído em quinhões de carga para as seções transversal e longitudinal.

A ABNT NBR 7188:2024 define a carga móvel rodoviária padrão TB-450 como um veículo tipo de 450 kN , com seis rodas (cada uma com $P = 75\text{ kN}$), três eixos de carga afastados entre si em $1,5\text{ m}$, com área de ocupação de $18,0\text{ m}^2$, circundada por uma carga uniformemente distribuída constante $p = 5\text{ kN/m}^2$, conforme a Figura 1. Os carregamentos P e p ainda devem ser ponderados pelos coeficientes normativos de impacto vertical (CIV), impacto adicional (CIA) e número de faixas (CNF) reunidos pela variável ϕ neste trabalho.

Figura 1 – TB-450.

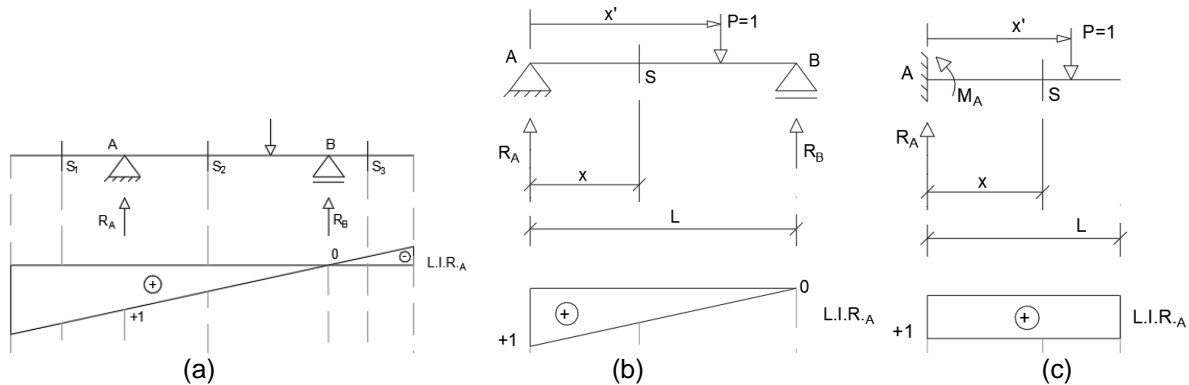


Fonte: Autores (2024).

Definido o carregamento, os diagramas de momento fletor e cortante bastam quando os carregamentos são fixos. No entanto, segundo Sussekind (1991), isso não ocorre para as cargas móveis, pois as posições que ocupam na estrutura variam conforme a passagem dos veículos. O autor explica que expressar os diagramas de momento fletor e cortante para essa situação seria inviável e impraticável, já que seria necessário fazê-los para cada uma das infinitas posições que a carga pode ocupar. Desse modo, a solução para determinar a variação desses esforços é descrevê-los por uma linha de influência.

Uma linha de influência representa a variação de reação, esforço cortante, momento fletor e deflexão em uma seção específica durante a movimentação de uma carga ao longo do elemento estrutural. Isso permite identificar visualmente a posição da carga que gera a maior influência na seção escolhida. Numericamente, a magnitude do esforço associado é obtida multiplicando o valor da força móvel aplicada pela ordenada correspondente a ela na linha de influência. As linhas de influência para vigas isostáticas considerando uma seção no primeiro apoio são descritas pela Figura 2.

Figura 2 – Linhas de influência de (a) viga biapoiada com balanços; (b) viga biapoiada; (c) viga em balanço.



Fonte: Autores (2024).

Obtidas as linhas de influência, deve-se buscar os trens-tipo máximo e mínimo atuantes na estrutura. De início, na vista transversal, posiciona-se o veículo tipo nas posições mais desfavorável e mais favorável à longarina analisada, respectivamente. Em seguida, utilizando-se a linha de influência, calculam-se os esforços máximos e mínimos, que serão transferidos para a vista longitudinal da ponte, obtendo-se, assim, os trens-tipo da ponte.

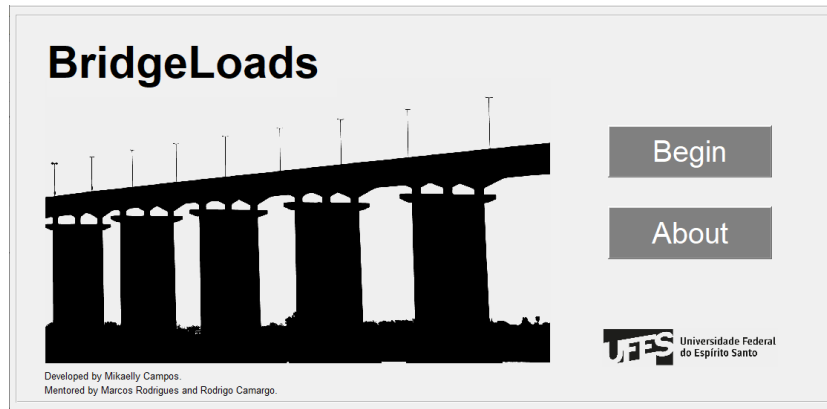
A conclusão dessa análise de cargas ocorre com a obtenção do momento fletor e esforço cortante máximos da ponte. Estes, podem ser utilizados para o dimensionamento da estrutura, processo não abordado neste trabalho.

4 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

No presente trabalho foi desenvolvido o programa de computador “BridgeLoads”, utilizando a linguagem de programação *Matlab*. O “BridgeLoads” analisa os esforços na superestrutura de pontes e viadutos gerados pelas ações móveis sobre o tabuleiro. Os resultados gerados incluem o traçado de linhas de influência de reação em estruturas sobre duas vigas e sobre múltiplas vigas, linhas de influência de momento fletor e esforço cortante de estruturas em duas vigas, além da obtenção de esforços solicitantes.

A interface inicial do programa, apresentada na Figura 3, apresenta as opções de iniciar ou de obter informações sobre o programa.

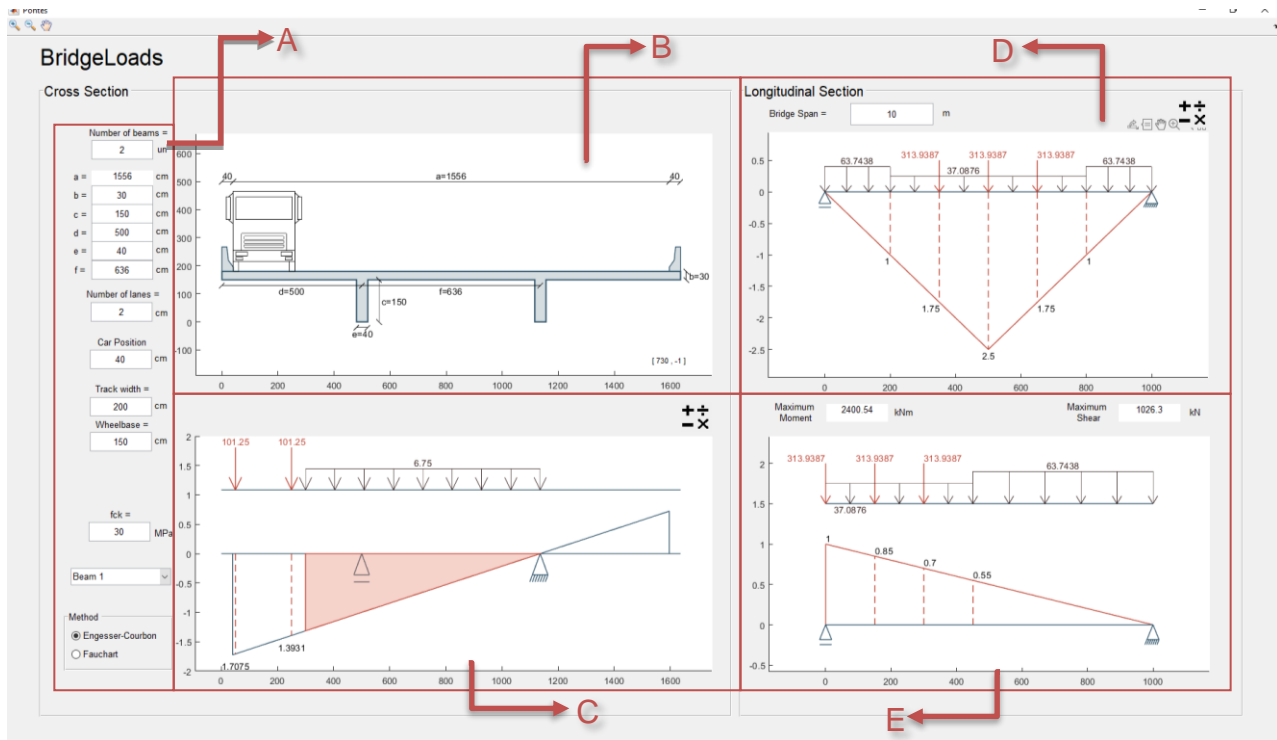
Figura 3 – Interface inicial do BridgeLoads.



Fonte: Autores (2024).

Ao clicar em “Begin”, o usuário ingressa na tela única do programa. Esta pode ser resumida nos seguintes campos também destacados na Figura 4: Entrada de dados (A); Exibição da seção transversal e do veículo tipo (B); Exibição do carregamento na seção transversal e linha de influência (C); Exibição da seção longitudinal e linha de influência de momento fletor para o pior caso (D); e Exibição da seção longitudinal e linha de influência de esforço cortante para o pior caso (E).

Figura 4 – Interface principal do programa.



Fonte: Autores (2024).

Na inserção dos dados, o usuário inicia informando o número de longarinas da ponte, podendo ser um valor inteiro entre 2 e 5. Em seguida, são solicitadas as dimensões da seção transversal, que são identificadas no desenho do tabuleiro para que o usuário associe a medida à caixa de entrada correspondente. A próxima informação a ser fornecida é o número de faixas consideradas, o que afeta o coeficiente de número de faixas (CNF).

Após esses dados, pede-se a posição do veículo sobre a seção transversal. Essa escolha pode ser feita de forma precisa digitando o valor na caixa de texto, como também pode ser feita de forma interativa ao clicar sobre o carro e arrastá-lo para o ponto desejado.

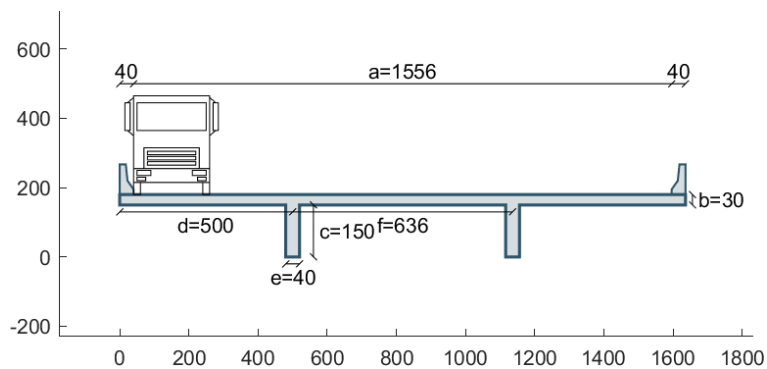
Em seguida, são pedidas informações relativas ao carro, inicialmente configurado como TB-450. A primeira delas é a largura entre os centros das rodas e a segunda é a largura entre os eixos das rodas. O usuário também informa a resistência característica do concreto armado, que afeta um dos processos futuros que ainda está sendo implementado, como o de Fauchart.

Para analisar a linha de influência, é necessário selecionar uma das vigas principais como seção de referência. As opções variam da longarina 1 até o número de longarinas informado no início. Para os casos de pontes sobre múltiplas vigas, o usuário futuramente poderá escolher entre os processos de Engesser-Courbon e de Fauchart.

A cada atualização dos dados de entrada o programa recalcula e gera novamente os recursos visuais, fornecendo interatividade com as ações do usuário.

O segundo campo do programa, onde são mostradas as dimensões da seção e localização do carro está destacado pela Figura 5.

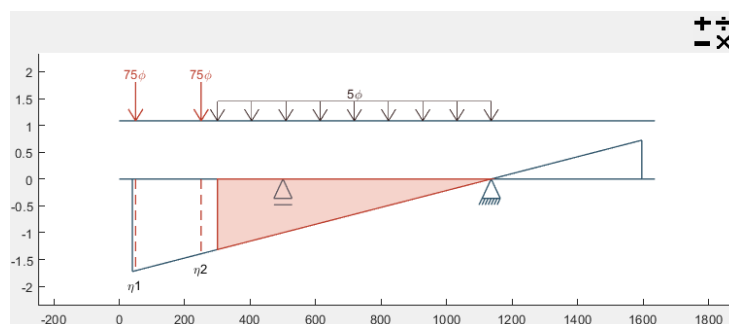
Figura 5 – Seção transversal e localização do veículo.



Fonte: Autores (2024).

No terceiro campo, visualiza-se a seção transversal simplificada. Acima dela são aplicados os carregamentos do veículo tipo normativo: cargas concentradas causadas pelas rodas do veículo com o valor ponderado de $P = 75\phi$ e carga distribuída de multidão sobre a região desfavorável à longarina selecionada, com o valor ponderado de $p = 5\phi$. Além disso, é desenhada a linha de influência para a viga escolhida, com as ordenadas correspondentes às cargas concentradas e a representação da carga de multidão com um preenchimento sólido. Esse campo está destacado na Figura 6.

Figura 6 - Seção transversal simplificada com carregamentos e linha de influência.

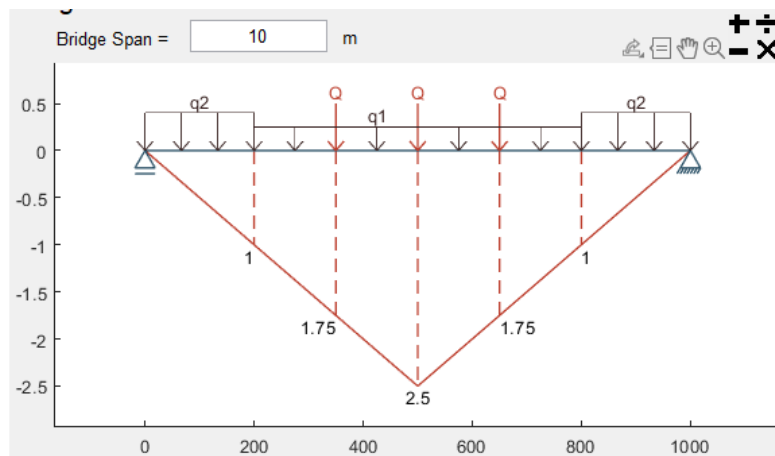


Fonte: Autores (2024).

No quarto campo, exibido pela Figura 7, o usuário analisa a vista longitudinal da ponte. A viga biapoiada mostrada é a longarina que foi escolhida na entrada de dados. Nesse quadro, o usuário analisa o momento fletor solicitante, portanto, a linha de influência desenhada é a linha de influência de momento fletor para vigas biapoiadas.

O carregamento sobre a longarina resulta da influência das cargas que ela sofre na análise da seção transversal. Com esses dados, determina-se o máximo momento fletor solicitante que será utilizado para o dimensionamento e projeto do elemento estrutural.

Figura 7 – Vista longitudinal da longarina e linha de influência de momento fletor no pior caso.



Fonte: Autores (2024).

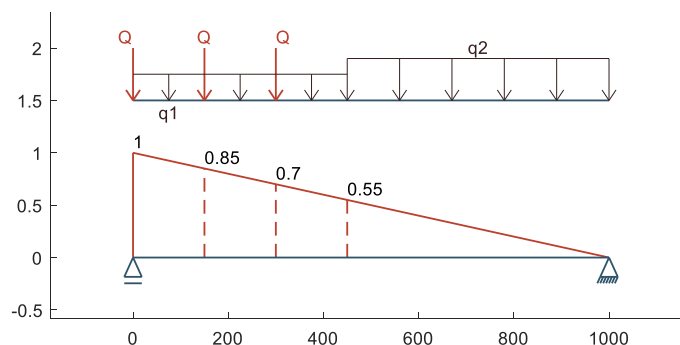
Destaca-se a última caixa de entrada de dados, localizada no campo superior esquerdo da Figura 7, que permite a escolha do vão longitudinal da ponte.

O botão representado por símbolos matemáticos no canto superior direito da Figura 6 e da Figura 7 permite que o usuário troque as variáveis literais para os valores numéricos correspondentes já calculados.

No último campo, também se analisa a vista longitudinal da ponte, porém com foco no estudo do esforço cortante. Nesse caso, o pior cenário é quando o veículo está mais próximo de algum apoio, resultando no mesmo carregamento aplicado, porém posicionado no canto esquerdo da estrutura, conforme detalhado na Figura 8.

A linha de influência desenhada corresponde a uma linha de influência de esforço cortante para vigas biapoiadas. Com esses dados, determina-se o máximo esforço cortante solicitante que será utilizado para o dimensionamento e projeto do elemento estrutural.

Figura 8 – Vista longitudinal da longarina e linha de influência de esforço cortante no pior caso.



Fonte: Autores (2024).

Os valores máximos calculados dos esforços são vistos nas caixas de texto localizadas entre os campos D e E indicados na Figura 4, além de serem destacados na Figura 9.

Figura 9 – Máximos esforços solicitantes calculados.

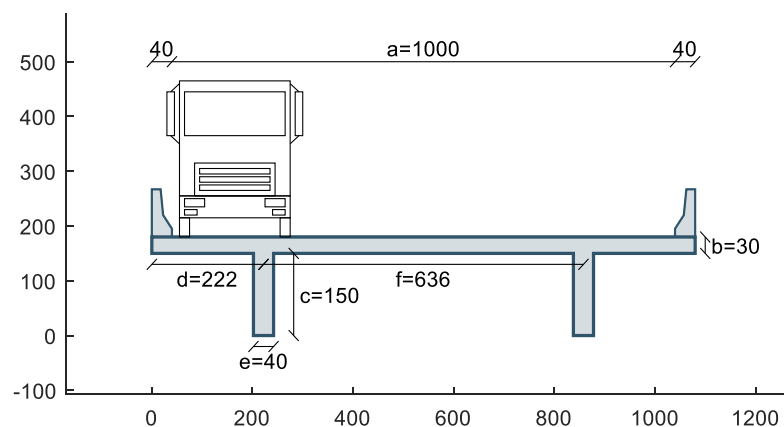
| | | | | | |
|----------------|---------|-----|---------------|--------|----|
| Maximum Moment | 1998.17 | kNm | Maximum Shear | 858.31 | kN |
|----------------|---------|-----|---------------|--------|----|

Fonte: Autores (2024).

5 VERIFICAÇÃO DE RESULTADOS

O projeto de uma ponte sobre vigas deve incluir o estudo da seção transversal, a construção do trem-tipo e a análise longitudinal das vigas. Embora possua solução analítica, este processo é extenso e sujeito a erros. Assim, para a validação do programa desenvolvido, ele foi utilizado para calcular os esforços de uma ponte resolvida analiticamente por Luchi (2020). O exemplo abordado corresponde a uma ponte sobre duas vigas. Na Figura 10, mostra-se o lançamento da geometria da ponte e o posicionamento do veículo no programa para o pior caso da primeira longarina.

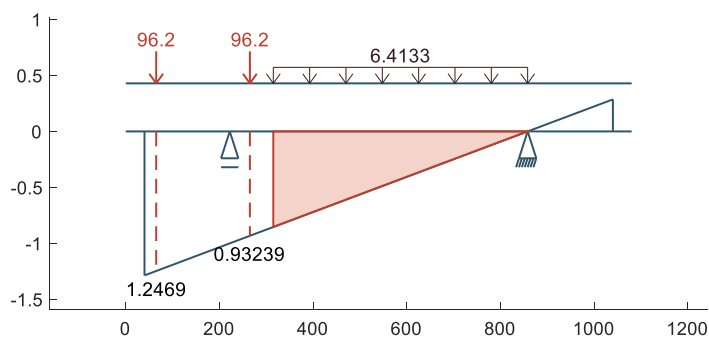
Figura 10 – Dados de geometria lançados.



Fonte: Autores (2024).

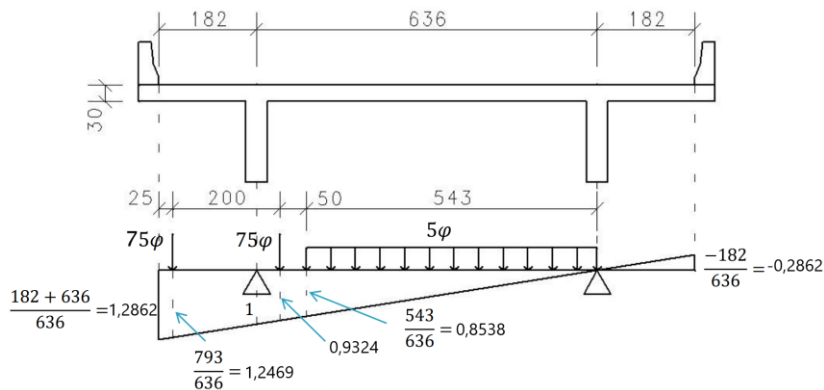
A Figura 11 mostra os resultados relacionados ao carregamento na seção transversal e a linha de influência de reação no BridgeLoads, enquanto que a Figura 12 mostra os resultados obtidos por Luchi.

Figura 11 – Linha de influência de reação e quinhão de carga máximo sobre a seção transversal



Fonte: Autores (2024).

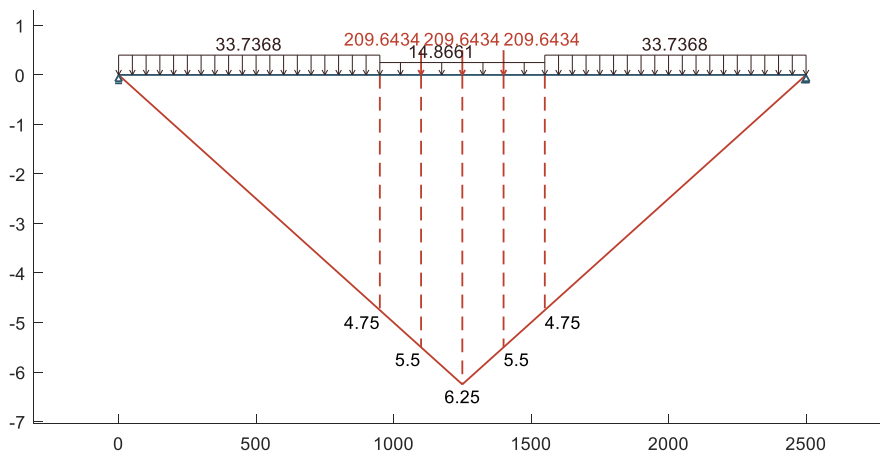
Figura 12 – Carregamento máximo no eixo do veículo.



Fonte: Adaptado de Luchi (2020).

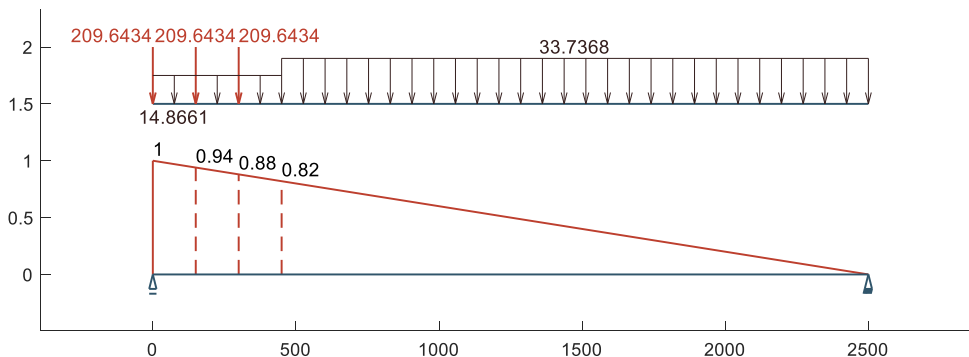
O trem-tipo máximo obtido é exibido pela Figura 13 e pela Figura 14, juntamente às linhas de influência de momento fletor e esforço cortante, respectivamente. O trem-tipo máximo calculado por Luchi é exibido pela Figura 15.

Figura 13 – Linha de influência de momento fletor e trem-tipo máximo na longarina.



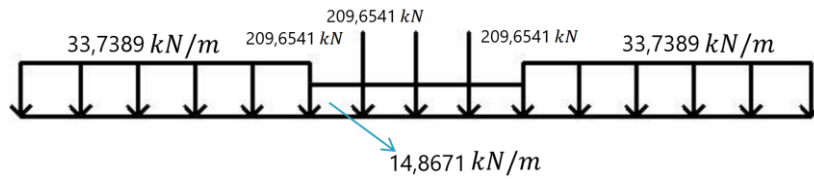
Fonte: Autores (2024).

Figura 14 – Linha de influência de esforço cortante e trem-tipo máximo na longarina.



Fonte: Autores (2024).

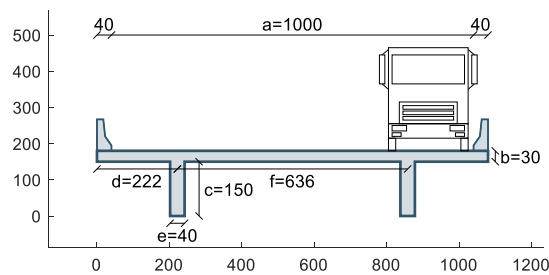
Figura 15 – Trem-tipo máximo.



Fonte: Adaptado de Luchi (2020).

De maneira similar, obtém-se o trem-tipo mínimo posicionando o veículo em posição favorável a longarina analisada, conforme a Figura 16.

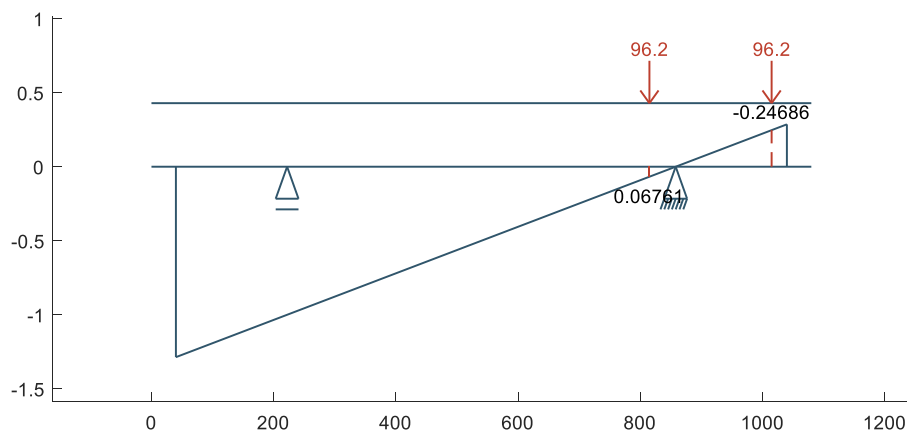
Figura 16 – Veículo em posição favorável à longarina esquerda.



Fonte: Autores (2024).

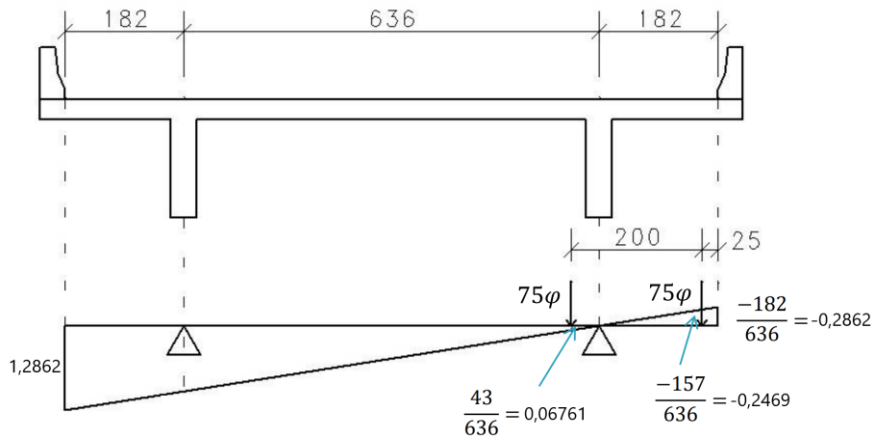
A linha de influência e o carregamento obtidos pelo BridgeLoads para esse caso são mostrados na Figura 17. Já os resultados obtidos por Luchi são mostrados na Figura 18.

Figura 17 – Linha de influência de reação e quinhão de carga mínimo sobre a seção transversal.



Fonte: Autores (2024).

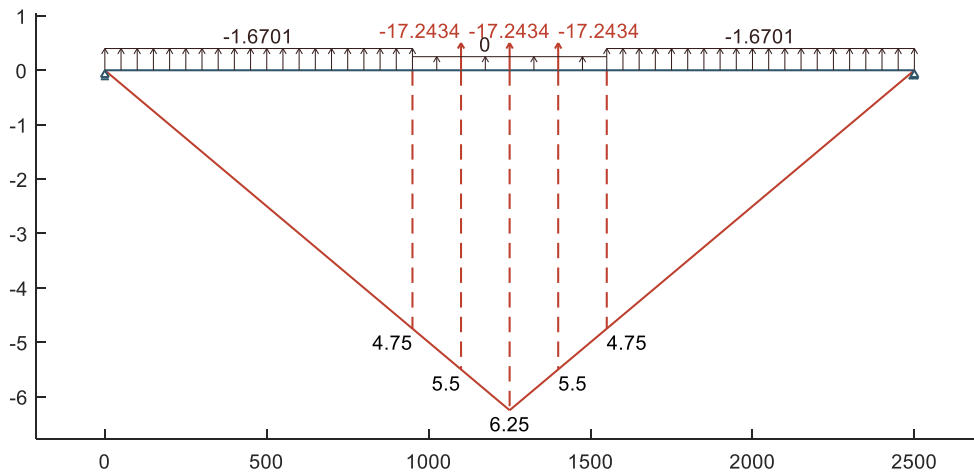
Figura 18 – Carregamento mínimo no eixo do veículo.



Fonte: Adaptado de Luchi (2020).

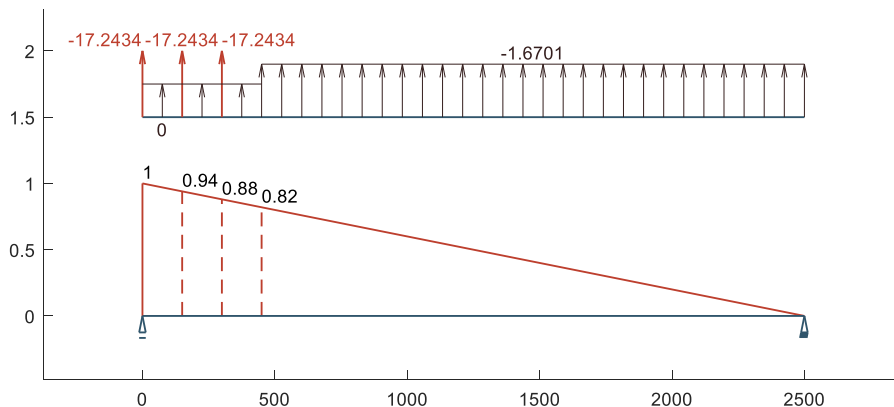
Em seguida, obtém-se o trem-tipo mínimo sobre a longarina, este é exibido pela Figura 19 e pela Figura 20, juntamente às linhas de influência de momento fletor e esforço cortante, respectivamente. A Figura 21 exibe o trem-tipo obtido por Luchi.

Figura 19 – Linha de influência de momento fletor e trem-tipo mínimo na longarina.



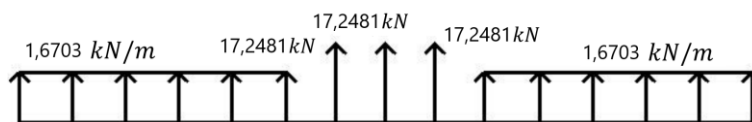
Fonte: Autores (2024).

Figura 20 – Linha de influência de esforço cortante e trem-tipo mínimo na longarina.



Fonte: Autores (2024).

Figura 21 – Trem-tipo mínimo.



Fonte: Adaptado de Luchi (2020).

Por fim, calculam-se os esforços máximos e mínimos pelas linhas de influência da seção longitudinal. Na Tabela 1 é feita a comparação entre os resultados analíticos e os resultados obtidos pelo BridgeLoads.

Tabela 1 – Comparação de resultados do exemplo.

| | Resultado analítico | BridgeLoads | Diferença Relativa |
|-------------------------|---------------------|-------------|--------------------|
| Momento fletor máximo | 5629,6154 | 5629,3 | 0,0056% |
| Momento fletor mínimo | -372,902 | -372,811 | 0,0244% |
| Esforço cortante máximo | 935,6808 | 935,628 | 0,0056% |
| Esforço cortante mínimo | -62,6785 | -62,6635 | 0,0239% |

Fonte: Autores (2024).

A Tabela 1 mostra que os resultados entregues pelo programa correspondem ao desenvolvimento analítico, validando-os. As diferenças encontradas são correspondentes aos truncamentos e arredondamentos do software de implementação em comparação àqueles feitos no exemplo resolvido analiticamente.

O exemplo desenvolvido destaca a eficiência da aplicação para o cálculo de esforços em pontes, uma vez que os estudantes podem obter o resultado preciso e imediato de cálculos extensos e tediosos com simples movimentos de mouse e visualização gráfica, aumentando o interesse pelo estudo do assunto.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um programa acadêmico computacional para o cálculo de cargas móveis sobre a superestrutura de pontes e viadutos, que gerasse as linhas de influência de reações verticais para pontes sobre duas longarinas pelo método de vigas independentes. Também teve como proposta determinar o trem-tipo sobre as vigas principais e obter os esforços máximos solicitantes. Os métodos de cálculo para pontes em grelha pelos processos de Engesser-Courbon e Fauchart estão sendo implementados e verificados.

Os resultados obtidos pelo “BridgeLoads” foram comparados com resultados analíticos e demonstraram consistência, apresentando cálculos precisos e confiáveis de momento fletor e esforço cortante para o dimensionamento estrutural. Dessa forma, ao variar as características da ponte, os cálculos não precisam ser refeitos, e o estudante pode visualizar, de forma gráfica e interativa, como os esforços variam ao longo da estrutura.

O programa se mostra promissor e com possibilidades de novas implementações gráficas e interativas, bem como a inserção de novos cálculos e geometrias de pontes, tornando-o uma ferramenta com potencial para o ensino nos cursos de Engenharia.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas**. Rio de Janeiro, 2024.

EL DEBS, M. K.; TAKEYA, T. **Introdução às pontes de concreto**. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Apostila.

LUCHI, L. A. R. **Notas de aula de Pontes**. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020. Notas de aula.

MARTHA, L. F. **Análise de Estruturas: Conceitos e Métodos Básicos**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022. E-book. ISBN 9788521638216. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521638216/>. Acesso em: 08 dez. 2023.

MASCARENHAS, F. J. R.; CHRISTOFORO, A. L.; CARVALHO, R. C. A utilização de um software livre para determinação dos esforços internos de cargas móveis em vigas de pontes de concreto. **HOLOS**, [S. l.], v. 3, p. 1–18, 2020. DOI: 10.15628/holos.2020.9466. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/9466>. Acesso em: 20 fev. 2023.

MILANI, C. J.; KRIPKA, M. Diagnosis of pathologies in bridges of the road system in Brazil. **Constructii: Journal of Civil Engineering Research**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 26–34, 1 jul. 2012.

PEREIRA, L. S. **Determinação de esforços solicitantes em vigas longarinas biapoiadas de pontes em grelha pelo processo de Fauchart**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

SILVA, L. F. **Cálculo automático de carregamentos e solicitações para projetos de pontes rodoviárias**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2018.

SUSSEKIND, J. C. **Curso de análise estrutural – Volume 1 – Estruturas Isostáticas**. 11. ed. São Paulo: Globo, 1991.

DEVELOPMENT OF AN INTERACTIVE ACADEMIC COMPUTER PROGRAM FOR THE ANALYSIS OF LIVE LOADS ON THE SUPERSTRUCTURE OF GRID BRIDGES

Abstract: *In this work, an academic program was developed for the calculation and analysis of live loads on the superstructure of bridges and viaducts on beams, following normative prescriptions. The program generates the reaction, bending moment and shear force influence lines, the maximum and minimum type trains and the stresses applied to the main beams. For didactic application, the program has a graphical interface that allows the user to make changes and check the results instantly. It is also possible to perform mouse movements on the screen and see how the stresses change on the bridge in an interactive way. To validate the accuracy of the developed program, the obtained results were compared with examples sourced from technical literature. The example developed clearly demonstrate the efficiency of the computational tool developed for calculating live loads.*

Keywords: *Live loads; Influence lines; Special structures; Bridges; Academic software.*

