

DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO PARA OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE VIGAS LONGARINAS DE PONTES DE CONCRETO ARMADO

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR OPTIMIZATION OF SIZING OF LONGITUDINAL BEAMS OF REINFORCED CONCRETE BRIDGES

Heverton Tarcisio Santos da Silva ¹

Vivian Siffert Wildner ²

Alexandre Maines ³

RESUMO: Algoritmos de otimização aplicados na engenharia civil tem se mostrado uma ferramenta poderosa para o desenvolvimento de projetos mais eficientes e econômicos. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um algoritmo destinado à otimização do dimensionamento de vigas longarinas de pontes de concreto armado com seção retangular, considerando ou não o uso de armadura de compressão. O algoritmo foi desenvolvido em *Scilab®* e possui a uma interface gráfica que o torna mais acessível e intuitivo para engenheiros e estudantes. Ele visa encontrar a altura mínima de vigas longarinas que atendam às condições estruturais específicas, garantindo a segurança e a eficiência da obra. Para validar os resultados obtidos, foram realizadas comparações com os esforços e áreas de aço calculados por softwares comerciais, como *Ftool®* e *Eberick®*. Os resultados demonstram a eficácia do algoritmo em fornecer pré-dimensionamentos precisos, reduzindo a necessidade de readequações no projeto. Este estudo contribui de forma significativa para a otimização estrutural na engenharia civil, oferecendo uma ferramenta útil para engenheiros e projetistas na fase inicial do projeto de pontes.

Palavras-chave: algoritmo; ponte; vigas longarinas; concreto armado; dimensionamento estrutural.

ABSTRACT: Optimization algorithms applied in civil engineering have proven to be a powerful tool for the development of more efficient and cost-effective projects. This study presents the development of an algorithm aimed at optimizing the design of long reinforced concrete bridge beams with rectangular cross-sections, with or without the use of specified reinforcement. The algorithm was developed in *Scilab®* and features a graphical interface that makes it more accessible and intuitive for engineers and students. It aims to determine the minimum height of long beams that meet specific structural conditions, ensuring the safety and efficiency of the construction. To validate the results obtained, comparisons were made with internal forces and steel areas calculated by commercial software, such as *Ftool®* and *Eberick®*. The results demonstrate the algorithm's effectiveness in providing accurate preliminary designs, simplifying the need for design readjustments. This study makes a significant contribution to structural optimization in civil engineering by offering a useful tool for engineers and designers in the early stages of bridge design.

¹ Egresso de Engenharia Civil. UNIFEBE. E-mail: hevertontss@gmail.com

² Doutora. UNIFEBE. E-mail: vivian.wildner@unifebe.edu.br

³ Doutor. UNIFEBE. E-mail: alexandre.maines@unifebe.edu.br

Keywords: *algorithm; bridge; longitudinal beams; reinforced concrete; structural design.*

1 INTRODUÇÃO

O uso da tecnologia no setor da construção civil vem crescendo a cada dia, com novas ferramentas para ajudar nas diversas áreas do setor, desde a concepção à execução. Nesse contexto, os usos de algoritmos de otimização surgem com o objetivo de agilizar o fluxo de trabalho promovendo a síntese de diversas etapas a fim de otimizar estas tarefas.

Com o crescente aumento do tráfego rodoviário, tem surgido cada vez mais a necessidade de novas pontes para atender a esta demanda. Tendo em vista esse crescimento e o alto custo de construção relacionado a estas obras, surge a necessidade de pontes com modelos estruturais otimizados e que mantenham sua eficiência (Coelho, 2023).

Segundo Fabeane (2015), para se ter um elemento bem dimensionado que atenda todos os requisitos normativos aliado à economia de recursos, o uso de técnicas de otimização nos projetos se faz necessário a fim de se obter maior precisão e rapidez nos resultados encontrados.

De acordo com DNIT (2021) apud Coelho et al. (2023) no Brasil, dentre as pontes sob responsabilidade do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT) existem mais de 6650 pontes cadastradas no Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte (SGO), dentre estas, aproximadamente 53% possuem longarinas em concreto armado e 17% são em longarinas de concreto protendido.

Atualmente existem vários softwares no mercado dedicados a projetos de pontes e viadutos, cada um contendo suas ferramentas de otimização, mas compartilhado um aspecto em comum, a necessidade de se desenhar todo o projeto antes de qualquer análise da estrutura, resultando em retrabalhos para adequação do projeto previamente desenhado com base nos resultados fornecidos pelo software.

O uso do algoritmo de otimização desenvolvido pelo autor não visa a substituição destes softwares, mas sim a sua complementação, oferecendo uma verificação prévia da longarina na etapa inicial do projeto, auxiliando na escolha das dimensões que serão utilizadas, a fim de diminuir a necessidade de uma readequação do projeto após a análise final fornecida por estes softwares, pois o projeto terá como ponto de partida o pré-dimensionamento fornecido pelo algoritmo.

O algoritmo que será desenvolvido se destina exclusivamente a otimização de vigas de concreto armado bi-apoiadas e com seção retangular para pontes e viadutos dimensionados para carga móvel rodoviária padrão TB-450, que se refere a um padrão de carga baseado em um veículo-tipo com peso total de 450 kN, utilizado para simular o efeito de veículos pesados sobre estruturas rodoviárias. O algoritmo propõe-se a encontrar a altura mínima da viga para cada valor de f_{ck} (Feature Compression Know ou resistência característica do concreto) apenas com base nas limitações a compressão do concreto. A partir dos resultados é possível comparar os impactos do valor do f_{ck} e da utilização de armadura simples ou armadura dupla na altura final da viga, fornecendo ao projetista uma visão mais ampla do comportamento da estrutura quanto a estes critérios, facilitando as tomadas de decisão de projeto.

Apesar de todo avanço na área de construção de pontes ocorrido nos últimos anos, desde os materiais aos processos construtivos, acidentes e colapsos continuam a ocorrer. As causas mais comuns são falhas de projeto e/ou execução, colisões, sismos ou falta de inspeção e manutenção (Branco, 2013). Nesse contexto, o desenvolvimento e a implementação de novas tecnologias voltadas para o aprimoramento do projeto e da execução de pontes tornam-se essenciais para aumentar a segurança e a eficiência dessas estruturas.

Grande parte das pontes que compõem a malha rodoviária do Brasil datam da década de 60 e já não atendem a necessidade de volume de tráfego e capacidade de carga dos dias atuais, necessitando que essas obras passem por ampliações ou até mesmo substituições. Isso leva a necessidade de pontes que possuam modelos estruturais otimizados a fim de garantir obras mais econômicas (Coelho, 2023).

A fim de suprir essa necessidade, o desenvolvimento deste algoritmo não se mostra útil apenas para a otimização das vigas longarinas, que é seu objetivo inicial, mas também estabelece um ponto de partida para a expansão da metodologia a outros elementos estruturais das pontes. Este trabalho abre a possibilidade de desenvolver futuras pesquisas que apliquem as abordagens aqui utilizadas para resolver questões semelhantes em outras partes da estrutura.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PONTES E VIADUTOS

Denomina-se ponte a obra que se destina a transpor obstáculos a fim de dar continuidade a uma via. Mais especificamente, se dá o nome de ponte a estrutura quando o obstáculo a ser vencido é um rio, e viaduto quando o obstáculo é outra via ou um vale, sem curso d'água (Marchetti, 2018).

Quanto a sua subdivisão, a estrutura pode ser dividida em três grupos, sendo eles a infraestrutura, mesoestrutura e superestrutura. A infraestrutura é constituída pelos elementos que se destinam a direcionar os esforços provenientes da superestrutura e mesoestrutura para o terreno de apoio e é constituída basicamente por elementos de fundação como blocos, estacas, sapatas e tubulações (Marchetti, 2018).

Também de acordo com Marchetti, a mesoestrutura é aquela responsável por transferir os esforços provenientes da superestrutura para infraestrutura e é constituída pelos pilares. Já a superestrutura é constituída por vigas e lajes, elementos responsáveis pelo suporte direto ao tráfego sobre a estrutura.

Outro quesito de extrema importância a ser analisado durante a etapa de projeto é a altura livre, que é a distância compreendida entre o ponto mais baixo da superestrutura e a superfície do terreno ou água (Dresch, 2018).

No caso dos viadutos, essa distância precisa atender as necessidades de tráfego estabelecidas para a via inferior, de modo a possibilitar a livre circulação de veículos, desde que dentro dos limites de alturas estabelecidos.

Quanto a pontes, além de atender as necessidades de altura livre para o tráfego de embarcações que navegam sob a estrutura (caso ela esteja sobre uma rota de embarcações) é preciso se atentar a cota máxima de rios, para que durante uma eventual cheia, a superestrutura não fique submersa e seja danificada pela força da água ou por detritos carregados por ela. A Figura 1 mostra a ponte Arthur Schlösser localizada no município de Brusque-SC com o Rio Itajaí-Mirim na cota 8,18m.

Figura 1 – Ponte durante cheia do rio

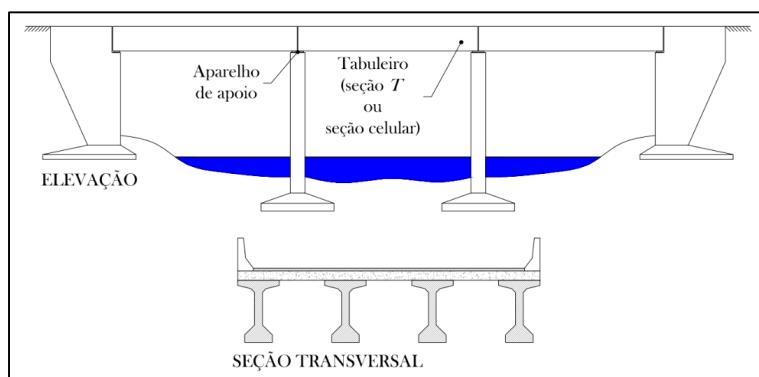


Fonte: O MUNICÍPIO (2023).

2.1.1 Pontes em vigas

Pontes em viga são aquelas que possuem seu sistema estrutural constituído por longarinas com ou sem transversinas que servem de apoio para a laje, elementos que receberão diretamente o carregamento. Como as longarinas se apoiam sobre os pilares sem transmissão de momentos fletores, logo, é comum tratar a análise estrutural da superestrutura independente da mesoestrutura considerando os apoios indeformáveis (Cavalcante, 2019). A Figura 2 ilustra uma ponte em viga com seção T, onde é possível observar a disposição das longarinas e o tabuleiro, destacando a elevação e a seção transversal da ponte.

Figura 2 – Ponte em viga com seção T



Fonte: CAVALCANTE (2019).

2.1.2 Pontes de concreto armado

As primeiras pontes em concreto armado surgiram no início do século 20. Eram pontes de concreto simples em arco triarticulado, utilizando o concreto como substituto à pedra. Embora já se empregasse o concreto armado na execução do tabuleiro das pontes de concreto simples, foi a partir de 1912 que começaram a ser construídas as pontes de viga e de pórtico em concreto armado, com vãos de até 30 metros (Debs, 2007).

No tabuleiro de uma ponte de vigas, podem-se identificar três elementos como apresentado na Figura 3, sendo eles as vigas longitudinais, também chamadas de vigas principais ou longarinas, as vigas transversais, também chamadas de transversinas, e a laje.

Figura 3 – Vista inferior da Ponte João Libério Benvenutti em Brusque-SC



Fonte: Autor (2022).

A análise do comportamento estrutural das pontes de concreto armado pode ser feita simplificadamente através de duas etapas. A primeira consiste na distribuição dos esforços na direção transversal da ponte, dependendo fundamentalmente do tipo de seção transversal. Na segunda etapa é feita a análise do efeito das cargas equivalentes obtidas através da distribuição de cargas realizada na etapa anterior.

Debs (2007) comparando a distribuição das cargas através da distribuição dos esforços na direção transversal de uma ponte com duas vigas principais e da distribuição dos esforços longitudinalmente diretamente sobre uma viga simplesmente apoiada para determinação do momento fletor máximo, constatou que é possível abordar de uma forma genérica, os sistemas estruturais (viga e laje) separadamente, embora se saiba que há uma interdependência de maior ou menor grau entre eles.

No processo de cálculo de vigas independentes, admite-se que a viga diretamente carregada irá absorver totalmente os esforços sem intervenção da segunda viga, o que significa supor que para efeito de cálculo das vigas longitudinais, o tabuleiro (laje e eventuais transversinas) seja seccionado sobre as vigas principais simplesmente se apoioando sobre elas (Debs, 2007).

2.1.3 Otimização de estruturas de longarinas

A otimização de estruturas de vigas longarinas gira em torno principalmente das relações entre vão e altura, fatores que interferem diretamente nas escolhas das características do concreto e quantidade de aço utilizado, gerando impacto direto no custo da obra.

Na composição do custo da ponte, a distância entre os apoios é o principal fator, pois pontes com vãos maiores resultam em menores gastos com a infraestrutura, porém resultando em maiores gastos com a superestrutura. Devido a isso, é importante que se faça um estudo a fim de encontrar a melhor relação entre estes dois fatores (Furtado, 2018).

2.2 ALGORITMOS

Algoritmo é qualquer procedimento computacional bem definido que possui um ou mais dados de entrada e a partir deles produz um ou mais valores de saída em um período de tempo finito. Dessa forma, um algoritmo basicamente é um conjunto de operações computacionais que transformam uma entrada em saída (Cormen, 2024).

Também de acordo com Cormen, podemos considerar o algoritmo como sendo um instrumento para resolver problemas computacionais bem específicos. O enunciado do problema apresenta os termos gerais em que se deve tratar os dados de entrada para se obter os dados de saída esperados. A partir disso o algoritmo descreve os procedimentos computacionais específicos para se chegar às saídas.

2.2.1 Utilização de algoritmos na engenharia civil

A utilização de métodos numéricos tem se tornado interessante na análise estrutural devido a crescente busca por projetos mais otimizados e com menores custos, buscando menor massa estrutural, mas sem comprometer a qualidade e nem a segurança. Esse processo faz com que o engenheiro tenha que lidar com inúmeras possibilidades, surgindo assim a necessidade do uso de métodos matemáticos para obter maior agilidade na elaboração dos projetos (Ribeiro, 2022).

No estudo realizado por Oliveira (2017), são exploradas as potencialidades dos algoritmos genéticos aplicados à engenharia civil, destacando sua relevância para a otimização de estruturas complexas e a busca por soluções mais eficientes e econômicas em projetos de engenharia. O trabalho chega à conclusão que através da utilização dessas técnicas é possível obter melhor aproveitamento dos recursos, aumentando o desempenho das construções e reduzindo custos.

Seguindo na mesma linha, o trabalho realizado por Ribeiro (2022) se aprofunda na análise comparativa de algoritmos genéticos e baseados em gradiente aplicados à otimização estrutural. Utilizando o *MATLAB®*, software destinado a cálculos matemáticos, o trabalho buscou focar na otimização de vigas de concreto e barragens, comparando a eficácia e a aplicabilidade de duas abordagens computacionais. O autor demonstra que esses métodos podem oferecer soluções otimizadas que são significativamente mais econômicas e eficientes.

Em estudo realizado por Feitosa (2020), o autor desenvolveu rotinas computacionais específicas com o objetivo de analisar o comportamento dinâmico de estruturas bidimensionais, como pórticos planos, submetidas a diferentes tipos de carregamentos. A partir dessas rotinas, realizou uma análise comparativa entre diferentes algoritmos, destacando a superioridade dos métodos implícitos sobre os explícitos para determinadas aplicações estruturais na área de engenharia civil.

Os autores citados acima representam uma amostra crescente de pesquisas que destacam o impacto e os avanços proporcionados pelo uso de algoritmos na análise e otimização de estruturas na engenharia civil.

2.3 SOFTWARES PARA PROJETOS DE PONTES

No mercado existem diversos softwares que são comumente utilizados para o projeto de pontes, cada um com características específicas que atendem a diferentes necessidades de projeto. Dentre eles é possível citar alguns, como o *AutoCAD Civil 3D®*, um software desenvolvido pela Autodesk utilizado para projetos de infraestrutura. Para projetos de pontes, este software permite a realização do desenho detalhado da estrutura como também possui integração com análises e simulações.

Outro software conhecido na engenharia civil na área de projetos estruturais é o *TQS®*, uma empresa brasileira fundada em 1986 por engenheiros civil, que cria, desenvolve e comercializa softwares para área de estruturas (TQS Informática, 2024).

Também utilizado para o projeto de pontes, o *SAP2000®* é um software utilizado para análise de projetos estruturais de vários tipos, oferecendo uma gama abrangente de ferramentas para análise estática e dinâmica. A sigla S.A.P. é a abreviação de *Structural Analysis Program* e faz parte da família de softwares para projetos de estruturas mais utilizada no mundo para Análise Estrutural, nele é possível analisar e projetar uma estrutura utilizando uma interface gráfica de fácil aplicação (Borghetti, 2016).

Segundo Borguetti (2016), este software utiliza o processo de subdivisão da estrutura por elementos finitos para realização dos cálculos, ou seja, separando-a em pequenas regiões onde são feitos os cálculos.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O estudo é de natureza aplicada, pois visa resolver os problemas práticos específicos usando o conhecimento científico, aplicando técnicas de otimização. Já a abordagem do problema é quantitativa, os objetivos podem ser classificados como explicativos e os procedimentos técnicos como metodológicos, pois foca no desenvolvimento de novos métodos ou na melhoria dos métodos existentes.

O estudo envolve o universo de ponte, especificamente do tipo bi-apoiada, e que é composta por vigas longarinas de concreto armado.

O projeto será realizado em seis etapas, sendo a primeira a definição do problema, esclarecendo e definindo o problema específico que o algoritmo deve resolver. Partindo disso, a segunda etapa é a revisão bibliográfica, estudando a literatura existente a fim de esclarecer conceitos, equações e normas.

A terceira etapa é caracterizada principalmente pelo desenvolvimento do algoritmo, começando pela definição da técnica que será utilizada seguido pela codificação do algoritmo incorporando os modelos de cálculo estrutural das longarinas. O algoritmo será desenvolvido utilizando o software *Scilab®* e terá como objetivo encontrar a altura mínima das vigas, garantindo que elas atendam às condições estruturais necessárias.

A quarta etapa consiste na aplicação do algoritmo no desenvolvimento de um caso de projeto e coleta dos resultados. As vigas serão bi-apoiadas e dimensionadas para a carga móvel rodoviária padrão TB-450. Na quinta etapa serão comparados os resultados obtidos no algoritmo com os resultados obtidos em outros softwares. Os esforços (momentos fletores e forças cortantes) serão validados utilizando o software *Ftool®* e o dimensionamento das áreas de aço será validado com o software *Eberick®*.

Na sexta etapa, haverá a codificação da interface gráfica dentro do *Scilab®*. Além de determinar a altura mínima das vigas, o algoritmo irá gerar gráficos que relacionam a altura da viga com o valor de f_{ck} (resistência característica do concreto) utilizado. Isso permitirá uma análise visual e comparativa da influência do f_{ck} na altura das vigas, auxiliando no processo de dimensionamento estrutural e na tomada de decisões de projeto.

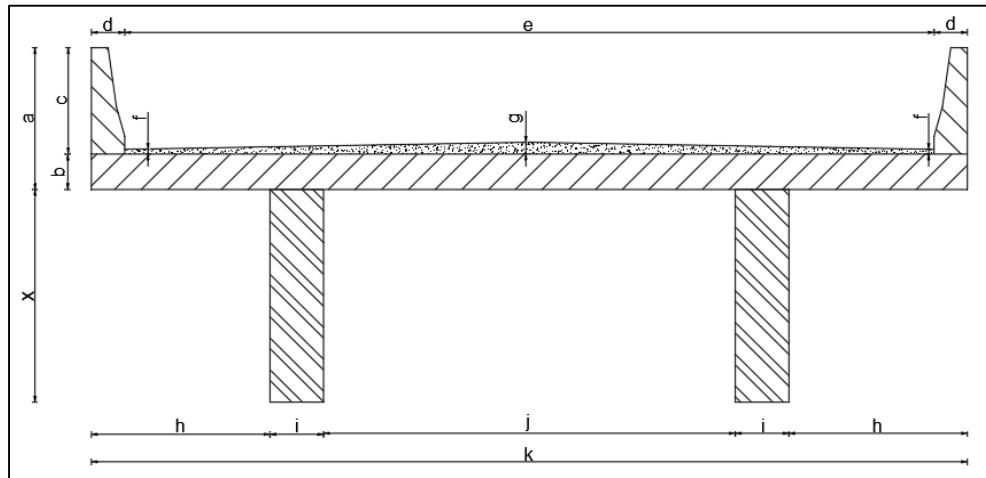
3.1 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO

O algoritmo foi estruturado em quatro grandes partes, iniciando com os dados do projeto da ponte, seguido do levantamento de cargas, passando para o cálculo das armaduras e resultando no gráfico de altura da viga em função de f_{ck} .

3.1.1 Dados de projeto

As propriedades do material e as dimensões iniciais serão definidas conforme recomendações da NBR 6118 (2014) e a seção transversal hipotética da ponte é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Seção transversal da ponte hipotética



Fonte: Autor (2024).

O primeiro dado a ser inserido no algoritmo é o comprimento do vão longitudinal da ponte estudada, valor que deve estar entre os 8 m mínimos e 40 m máximos definidos como os limites do algoritmo. O valor mínimo foi determinado com base nas limitações do algoritmo quando ao posicionamento da carga móvel sobre a estrutura e o valor máximo com base na inviabilidade construtiva de vigas com vãos superiores, sendo necessário aumentar significativamente a área da seção transversal.

O próximo valor a ser definido pelo usuário é o valor da taxa de armadura máxima, valor que é definido pelo projetista e que deve estar abaixo do máximo de 4% definido pela norma, seguido do cobrimento da armadura que deve ser escolhido com base na classe de agressividade ambiental do local em que a estrutura será executada.

Após isso, é definido o número de faixas, que é o número (inteiro) de faixas de tráfego rodoviário a serem carregadas sobre um tabuleiro transversalmente contínuo, sendo que a largura da faixa padrão é de 3,6 m, logo, para se determinar o valor a ser preenchido neste campo será necessário a dividir a largura da pista de rolamento (e) pela largura da faixa de rolamento padrão de 3,6 m, sendo que o valor a ser preenchido deve ser o número inteiro do resultado desta divisão arredondado para baixo.

Os próximos dados de projeto são previamente preenchidos na tela do algoritmo com os valores da tensão de escoamento do aço e dos coeficientes γ_c e γ_f . O valor da tensão de escoamento do aço é referente ao aço CA-50, caso esse não seja o aço escolhido pelo projetista este valor deve ser atualizado. Já os valores do coeficientes γ_c e γ_f foram definidos em 1,4 conforme recomendação da NBR 6118 (2014).

3.1.2 Levantamento de cargas

Seguindo para os campos de levantamento de carga, o primeiro passo é identificar quais elementos estão carregados sobre a viga longarina estudada. Como a seção transversal apresentada na Figura 4 é simétrica, cada viga receberá a carga de metade da área total da seção. Caso houvesse três vigas longarinas, seria necessário fazer a distribuição dos elementos que estão sobre as vigas laterais (que seriam iguais caso a ponte seja simétrica) e os elementos sobre a viga do centro, sendo que os dois tipos de vigas (laterais e central) devem ser calculados um de cada vez no algoritmo, já que iriam possuir dados de levantamento de carga diferentes. A mesma lógica deve ser seguida para quantidades de longarinas superiores a três.

Após definidos os elementos que contribuem para viga estudada, o primeiro item a ser inserido é o guarda-corpo, sinalizado na Figura 4 pelas dimensões c e d . Este campo já está previamente preenchido com o valor de 5,8 kN/m, valor padrão definido pela norma para este elemento, porém caso o projetista ache necessário, este valor pode ser alterado, assim como a sua quantidade caso haja mais de um sobre a viga.

O elemento seguinte é o meio-fio, devendo ser preenchida as dimensões da sua base e altura, seguida das dimensões do asfalto, como a largura (e) que neste caso deve ser dividida por dois para se obter apenas a dimensão que está sobre uma viga, e as alturas do bordo (f) e centro (g) do asfalto. A largura do asfalto ou faixa de rolamento sobre cada viga foi limitada a uma dimensão máxima de 6 m, de forma que se considere sobre cada viga no máximo dois veículos tipo TB-450, representado na Figura 5. Outro dado do asfalto que se deve levar em consideração é se o dimensionamento será feito para apenas uma camada de asfalto ou se será considerado asfalto recupado, devendo-se marcar a opção escolhida. Este valor afetará a carga considerada para o asfalto.

O valor seguinte é largura da base da viga longarina (i) seguido das dimensões de largura (k) e altura (b) da laje, lembrando que o valor de k também deve ser dividido por dois. Foram inseridos três campos para preenchimento das dimensões da laje para casos em que a laje tenha degraus, podendo assim dividir sua área em dois ou três retângulos, porém no caso apresentado na Figura 4 é possível utilizar apenas uma laje. Em casos em que não houver valores a serem preenchidos, como é o caso do meio-fio e lajes 2 e 3, os campos devem ser preenchidos com 0.

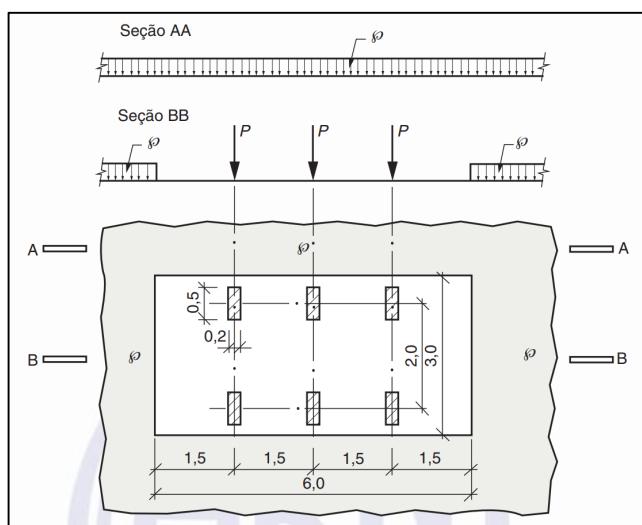
3.1.2 Dimensionamento de cargas

Foi inicialmente definido o formulário que será utilizado para o dimensionamento dos coeficientes de carga móvel e das armaduras das vigas longarinas. Os valores característicos das cargas móveis verticais são fixados na NBR 7188: Carga móvel

rodoviária e de pedestre em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas (ANBT, 2013). A norma é dividida em três ações para cargas móveis, sendo elas, pontes e viadutos, passarelas e carga móvel em estruturas de garagem.

Para dar início ao cálculo das cargas móveis é necessário determinar para qual veículo tipo a ponte será dimensionada e, a partir dele, obter o posicionamento das cargas. Segundo a NBR 7188, a carga P , em quilonewtons, é a carga estática concentrada aplicada no nível do pavimento, com valor característico e sem qualquer majoração. A carga p , em quilonewtons por metro quadrado, é a carga uniformemente distribuída, aplicada no nível do pavimento, com valor característico e sem qualquer majoração, conforme a Figura 5.

Figura 5 – Distribuição das cargas estáticas



Fonte: ABNT (2013).

De acordo com a NBR 7188, $P = 75 \text{ kN}$, três eixos de carga afastados entre si em 1,5 m, com área de ocupação de $18,0 \text{ m}^2$, circundada por uma carga uniformemente distribuída constante $p = 5 \text{ kN/m}^2$, devendo ser posicionadas de forma que as rodas fiquem na posição mais desfavorável, inclusive acostamento e faixas de segurança.

A carga estática concentrada Q , em quilonewtons, e a carga uniformemente distribuída q , em quilonewtons por metro quadrado, estão definidas nas equações 1 e 2, e são os valores aplicados no nível do pavimento para determinação dos esforços referentes a carga móvel, calculado pelos valores de P e p respectivamente multiplicados pelos coeficientes de impacto vertical (CIV), do número de faixas (CNF) e de impacto adicional (CIA).

$$Q = P * CIV * CNF * CIA \quad (1)$$

$$q = p * CIV * CNF * CIA \quad (2)$$

Por sua vez, *CIV* pode ser definido como as equações 3 e 4, para vão inferior a 10 m e entre 10 m e 200 m, respectivamente.

$$CIV = 1,25, \text{ para estruturas com vão inferior a } 10 \text{ m} \quad (3)$$

$$CIV = 1 + 1,06 * \left(\frac{20}{(Liv+50)} \right), \text{ para estruturas com vão entre } 10 \text{ m e } 200 \text{ m} \quad (4)$$

Onde *Liv* é o vão em metros para o cálculo *CIV*. Para estruturas com vãos acima de 200,0 m, deve ser realizado estudo específico para a consideração da amplificação dinâmica e definição do coeficiente de impacto vertical.

Após a definição do *CIV* é preciso ajustar as cargas *Q* e *q* pelo coeficiente de número de faixas do tabuleiro *CNF*, conforme a equação 5.

$$CNF = 1 - 0,05 * (n - 2) > 0,9 \quad (5)$$

Onde *n* é o número inteiro de faixas de tráfego rodoviário a serem carregadas sobre um tabuleiro transversalmente contínuo. Este coeficiente não se aplica ao dimensionamento de elementos estruturais transversais ao sentido do tráfego (lajes, transversinas, etc.) (ABNT, 2013).

Os esforços *Q* e *q* também devem ser majorados na região das juntas estruturais e extremidades da obra. Todas as seções dos elementos estruturais a uma distância horizontal, normal à junta, inferior a 5,0 m para cada lado da junta ou descontinuidade estrutural, devem ser dimensionadas com os esforços das cargas móveis majorados pelo coeficiente de impacto adicional, sendo *CIA* igual a 1,25 para obras em concreto ou mistas e *CIA* igual a 1,15 para obras em aço.

3.1.3 Dimensionamento das armaduras e da altura da viga

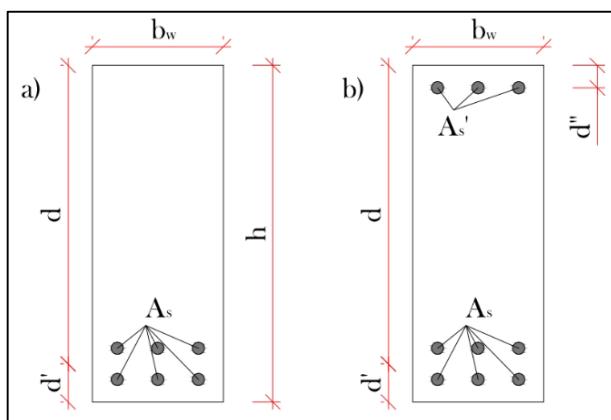
Com as cargas móveis e permanentes definidas o próximo passo é a obtenção dos valores das reações de apoio e posteriormente são calculados os esforços de momento e cortantes máximos para as cargas permanentes. Os resultados são obtidos simplificadamente, considerando as longarinas indeformáveis. Para obtenção

dos esforços relativos à carga móvel deve ser calculada a linha de influência através do método das longarinas indeslocáveis, que consiste na inserção de uma carga unitária vertical na estrutura.

Após isso, é determinado o valor da altura útil da viga d , sendo uma medida estimada pelo projetista. Para definição da altura mínima, o algoritmo adotará sempre o menor valor de d possível que atenda as verificações, sempre adicionando 1 cm a última altura útil calculada caso esta não passe nas verificações e recalculando até encontrar a menor altura que atenda aos critérios definidos.

Após a obtenção dos valores dos esforços e altura útil se dará início aos cálculos referentes a armadura seguindo a metodologia apresentada por Cavalcante (2019), ilustrada na Figura 6, que apresenta vigas com seções retangulares com armadura simples (a) e dupla (b).

Figura 6 – Seção retangular com armaduras simples (a) e dupla (b)



Fonte: CAVALCANTE (2019).

O primeiro passo para o dimensionamento das armaduras longitudinais de uma seção retangular em concreto armado é o cálculo da posição da linha neutra até a borda comprimida (x), que pode ser dimensionado a partir do parâmetro de ductilidade (ε) através do equilíbrio de forças como mostram as equações 6 e 7, onde M_d é o momento de projeto em kN.cm, h é a altura da viga em cm, d' é a distância do centro de gravidade das armaduras tracionadas até a borda tracionada em cm, b_w é a largura da viga em cm e o f_{cd} , que é a resistência de projeto do concreto a compressão que é obtida através da divisão do valor do f_{ck} (resistência do concreto a compressão) em bar pelo coeficiente de segurança γ_c .

$$\varepsilon = \frac{x}{d} = \frac{x}{h-d'} \quad (6)$$

Em que:

$$0,4\varepsilon^2 - \varepsilon + \frac{Md}{0,8*0,85*bw*d^2*fcd} = 0 \quad (7)$$

Após a determinação de ε , é possível encontrar a área de aço de tração através da equação 8, onde As é a área de aço dada em cm^2 e f_{yd} é a tensão de escoamento do aço em bar dividida pelo coeficiente γ_s , valor tabelado de acordo com o tipo de aço utilizado. Para este trabalho foi utilizado o aço CA-50.

$$As = \frac{0,8*0,85*d*\varepsilon*fcd}{f_{yd}} \quad (8)$$

No caso de armaduras duplas, a área de aço necessária de tração (As) é definida pela equação 9, seguida pela área de aço necessária comprimida definida pela equação 10, onde As' é a área de aço comprimida, ε_{lim} é o limite de ductilidade e é igual a 0,45 para $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ e 0,35 para $50 \text{ MPa} < f_{ck} < 90 \text{ MPa}$ de acordo com recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014) e d'' é a distância do centro de gravidade das armaduras comprimidas até a borda comprimida em cm;

$$As = \frac{0,8*0,85*d*\varepsilon_{lim}*fcd}{f_{yd}} + As' \quad (9)$$

$$As' = \frac{Md - 0,8*0,85*d*\varepsilon_{lim}*fcd*(1-0,4*\varepsilon_{lim})}{f_{yd}*(d-d'')} \quad (10)$$

A obtenção do valor da área de aço para armadura de cisalhamento é definida através da equação 11, onde As_w é o valor da área de aço dado em m^2 , Vd é o valor da média dos cortantes inicial e final do trecho calculado, de 0m a 1m ou de 1m a 2m multiplicado pelo fator de segurança γ_f . Serão calculados apenas estes dois trechos pois são o pior caso, resultando no esforço cortante máximo da estrutura, sendo suficientes para determinar o diâmetro máximo do estribo e consequentemente a menor largura útil para as barras longitudinais.

O valor de Z é obtido multiplicando a altura útil definida da viga por 0,8. Serão dimensionados apenas os dois primeiros metros pois a partir deles já é possível determinar o diâmetro máximo dos estribos, valor necessário para fazer a distribuição

das barras longitudinais por camada, encontrando os centros de gravidade e para posteriormente calcular a altura final da viga.

$$Asw = \frac{Vd}{Z * fyd} \quad (11)$$

Após os cálculos de área de aço é necessário verificar o concreto quanto ao seu estado limite de compressão comparando os valores do Muc (momento limite de compressão do concreto) e Md (momento de projeto) dados em kN.cm, onde, para o cálculo sem o uso de armadura de compressão, o limite mínimo da altura será a verificação do Muc , que deve ser maior ou igual ao valor de Md .

Quando a armadura de compressão for utilizada, será necessário verificar se o valor de Md é maior que o Muc e menor do que duas vezes o Muc , como apresentado nas equações 12 e 13, onde fcd é a resistência de projeto do concreto a compressão, bw é a dimensão da base da seção transversal da viga em centímetros, d é a altura útil da viga em centímetros, M é o valor do momento fletor máximo em kN.cm e γ_f é o fator de segurança. Para o cálculo sem o uso de armadura de compressão, o limite mínimo da altura será a verificação do Muc . Quando a armadura de compressão for utilizada, será necessário verificar se o valor de Md é maior que o Muc e menor do que duas vezes o Muc .

$$Muc = 0,272 * fcd * bw * d^2 \geq Md \quad (12)$$

$$Md = M * \gamma_f \quad (13)$$

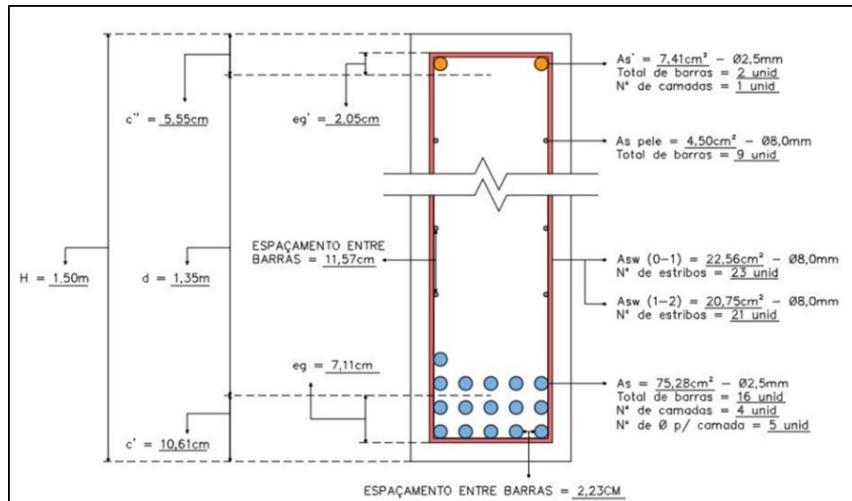
Caso Md não for maior que o Muc e menor do que duas vezes o Muc , é necessário rever parâmetros, aumentando a altura da viga, largura da base ou o fck . Caso a exigência seja atendida, os parâmetros da viga não precisam ser alterados, porém será necessário utilizar uma armadura de compressão dimensionada a partir da equação 10 e recalcular a armadura de tração dimensionada através da equação 11.

Seguindo para determinação da altura final da viga, é feita a distribuição das barras longitudinais por camadas respeitando os valores de cobrimento definidos e o espaçamento mínimo entre barras de dois centímetros. Com as barras longitudinais em suas devidas posições é possível calcular o d' e d'' , representados na Figura 6. Com os valores de d' e d'' finais definidos, a partir da equação 14 é possível determinar a altura final da viga.

$$h = d + d' \quad (14)$$

A Figura 7 apresenta um exemplo hipotético de uma seção transversal de uma viga longarina com a disposição das ferragens de tração, compressão e cisalhamento representadas pelas cores azul, laranja e vermelho, respectivamente junto aos seus respectivos valores de dimensionamento calculados, sendo que a área da armadura de pele (A_{spel}) é igual a 1% da área da seção final da viga para cada lado, com espaçamento máximo de 20 cm e eg e eg' são iguais aos valores de d' e d'' , respectivamente, menos o cobrimento.

Figura 7 – Seção transversal com exemplo de resultados obtidos



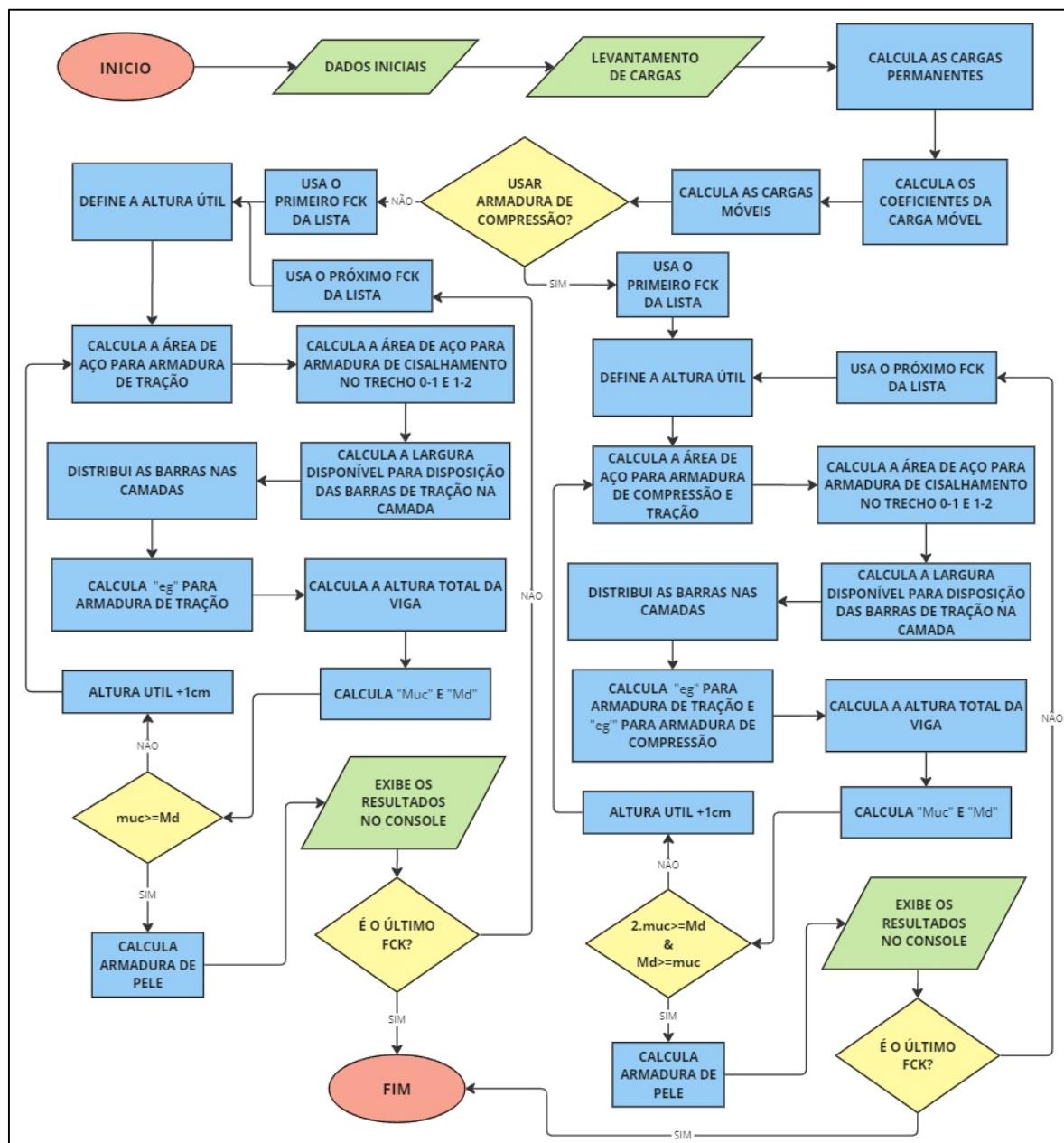
Fonte: Autor (2024).

3.2 FLUXOGRAMA DO ALGORITMO

De acordo com os cálculos de dimensionamento de longarinas descritos acima, o algoritmo deverá funcionar de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 8.

Após a conclusão do algoritmo de cálculo, foi desenvolvida uma interface gráfica para facilitar a sua utilização, nela são inseridos os dados de projeto e da seção para o dimensionamento da carga. Após calcular, a interface exibe um gráfico relacionando a altura mínima possível da viga com base nas verificações dos limites do concreto a compressão com os valores de f_{ck} utilizados, variando de 20 a 60. Selecionando um dos valores de f_{ck} abaixo do gráfico e recalculando, serão exibidas as informações de altura útil, altura final da viga, assim como a área de aço e bitolas escolhidas para o valor selecionado. As bitolas são definidas automaticamente de forma que sejam utilizadas a menor quantidade de barras possível a fim de obter os menores valores de d' e d'' com bitola máxima de 25mm.

Figura 8 – Fluxograma do funcionamento do algoritmo



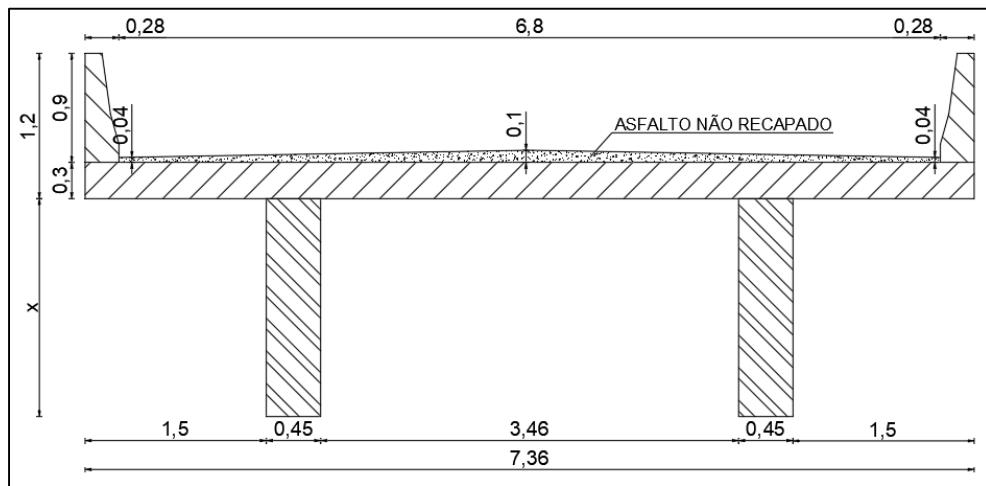
Fonte: Autor (2024).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para dar início ao cálculo no algoritmo é preciso primeiramente definir os parâmetros de entrada, ou dados de projeto, conforme indicado na tela do algoritmo.

O modelo utilizado para a realização dos cálculos será composto por uma ponte hipotética com vão longitudinal de 20 m, valor compreendido entre os 8 m mínimos e 40 m máximos definidos como os limites do algoritmo. A seção transversal hipotética da ponte é definida pela Figura 9.

Figura 9 – Seção transversal da ponte hipotética calculada



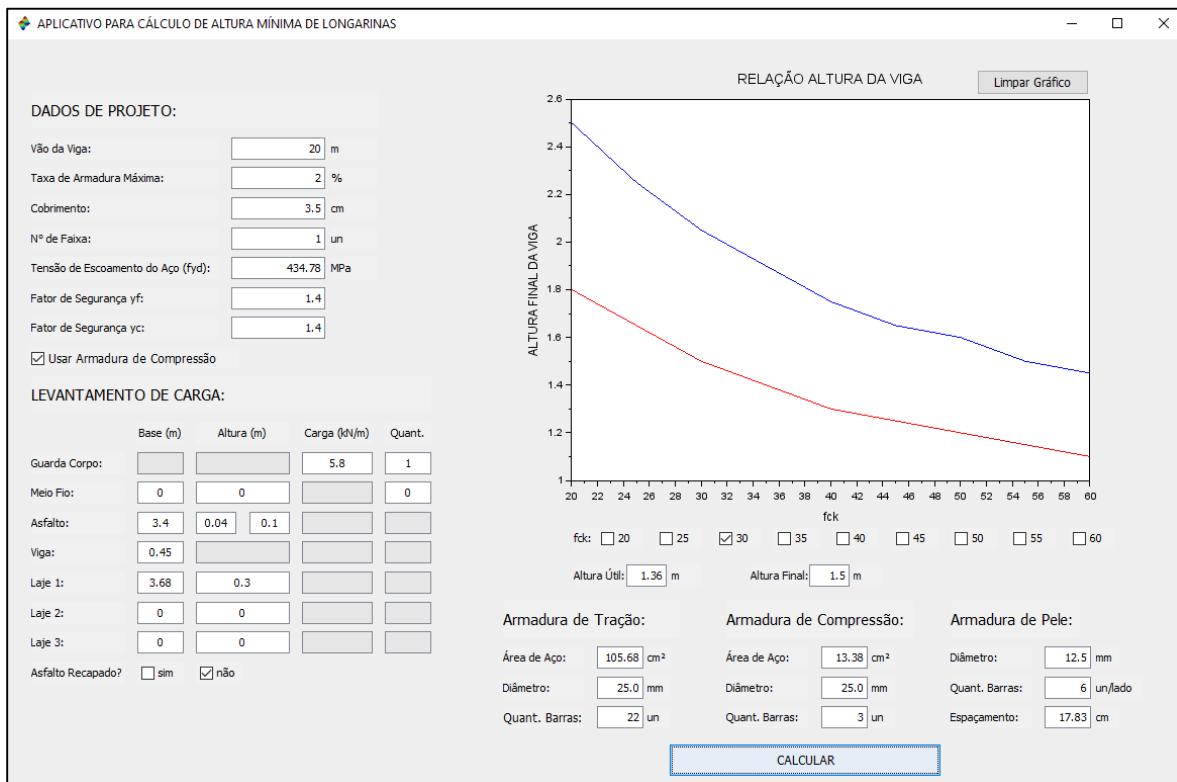
Fonte: Autor (2024).

Por se tratar de uma ponte simétrica, será calculada apenas uma das longarinas. Os valores a seguir foram definidos com base na NBR 6118 (2014), sendo que taxa de armadura máxima foi definida em 2%, valor que é definido pelo projetista e que deve estar abaixo do máximo de 4%, o cobrimento em 3,5 cm de acordo com a classe de agressividade ambiental III, a tensão de escoamento de projeto para o aço CA-50 foi de 434,78 MPa, e os coeficientes γ_c e γ_f em 1,4 para cargas variáveis.

O valor do número de faixas (n) foi calculado como igual a 1, sendo o número inteiro arredondado para baixo resultado da divisão da largura total da faixa de rolamento de 6,8 m, definida pela Figura 9, por 3,6 m. Após isso foi feita a entrada dos dados de projeto e levantamento de carga no algoritmo.

A Figura 10 mostra um exemplo dos resultados fornecidos pelo algoritmo, onde, no gráfico, a linha azul representa as alturas da viga com armadura simples (primeira situação calculada), e a linha vermelha com armadura dupla (segunda situação calculada após ser marcada a opção para utilizar armadura de compressão). O que é exibido no gráfico é a sobreposição dos dois cálculos, o que facilita a comparação de diferentes resultados.

Figura 10 – Captura de tela do algoritmo

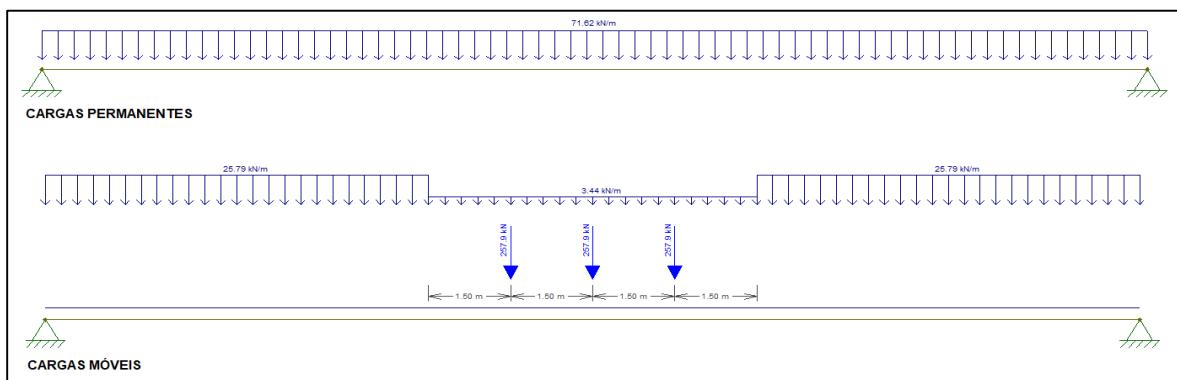


Fonte: Autor (2024).

A partir do gráfico é possível observar o impacto da utilização de armadura dupla na estrutura, reduzindo significativamente a altura final da viga de 2,05 m para 1,5 m para o valor de $f_{ck} = 30$ MPa marcado na interface. A tela também apresenta os resultados dos cálculos das áreas de aço, diâmetro e quantidade de barras para cada valor de f_{ck} selecionado.

Para validação dos resultados dos esforços de momento máximo e cortantes calculados pelo algoritmo, foi utilizado o software *Ftool®*, atribuindo a viga desenhada no software os mesmos atributos definidos nos dados de entrada do algoritmo, assim como os mesmos valores de cargas calculados no levantamento de carga. Foi atribuída também à viga os mesmos valores de altura e base da viga utilizados pelo algoritmo, conforme exemplo na Figura 11.

A partir disso, foram calculadas 18 vigas, uma para cada valor de f_{ck} disponível no algoritmo, para armadura simples e dupla, e comparado individualmente os valores dos esforços calculados pelo algoritmo e pelo *Ftool®*, resultando em valores iguais.

Figura 11 – Lançamento das cargas sobre a viga no *Ftool®*


Fonte: Autor (2024).

Podendo-se avaliar também que quanto maior o f_{ck} utilizado, menores são os valores dos esforços de momento e cortante obtidos, como é possível observar na Tabela 1, que traz alguns dos valores calculados pelo algoritmo desenvolvido comparando com os obtidos pelo *Ftool®*. Isso se deve ao fato de que o aumento do f_{ck} resulta na diminuição da altura da viga devido ao aumento da resistência a compressão, e por sua vez na diminuição da carga permanente.

 Tabela 1 – Comparaçāo resumida dos resultados do algoritmo com *Ftool®*

f_{ck}	Altura Útil (m)	Esforços	Unid.	Scilab®	<i>Ftool®</i>	Erro(%)
20	2,89	Momento Fletor Máximo	kN.m	7782,5	7782,5	0,00%
20	2,89	Esforço Cortante v0	kN	1600,6	1600,6	0,00%
20	2,89	Esforço Cortante v1	kN	1484,7	1484,7	0,00%
20	2,89	Esforço Cortante v2	kN	1368,9	1368,9	0,00%
25	2,46	Momento Fletor Máximo	kN.m	7540,6	7540,6	0,00%
25	2,46	Esforço Cortante v0	kN	1552,2	1552,2	0,00%
25	2,46	Esforço Cortante v1	kN	1441,2	1441,2	0,00%
25	2,46	Esforço Cortante v2	kN	1330,2	1330,2	0,00%
30	2,18	Momento Fletor Máximo	kN.m	7383,1	7383,1	0,00%
30	2,18	Esforço Cortante v0	kN	1520,2	1520,2	0,00%
30	2,18	Esforço Cortante v1	kN	1412,8	1412,8	0,00%
30	2,18	Esforço Cortante v2	kN	1305,0	1305,0	0,00%
35	1,97	Momento Fletor Máximo	kN.m	7264,0	7264,0	0,00%
35	1,97	Esforço Cortante v0	kN	1497,1	1497,1	0,00%
35	1,97	Esforço Cortante v1	kN	1391,6	1391,6	0,00%

35	1,97	Esforço Cortante v2	kN	1286,1	1286,1	0,00%
40	1,82	Momento Fletor Máximo	kN.m	7181,6	7181,6	0,00%
40	1,82	Esforço Cortante v0	kN	1480,2	1480,2	0,00%
40	1,82	Esforço Cortante v1	kN	1376,4	1376,4	0,00%
40	1,82	Esforço Cortante v2	kN	1272,6	1272,6	0,00%

Fonte: Autor (2024).

Tabela 1 – Comparação resumida dos resultados do algoritmo com *Ftool®* (Continuação)

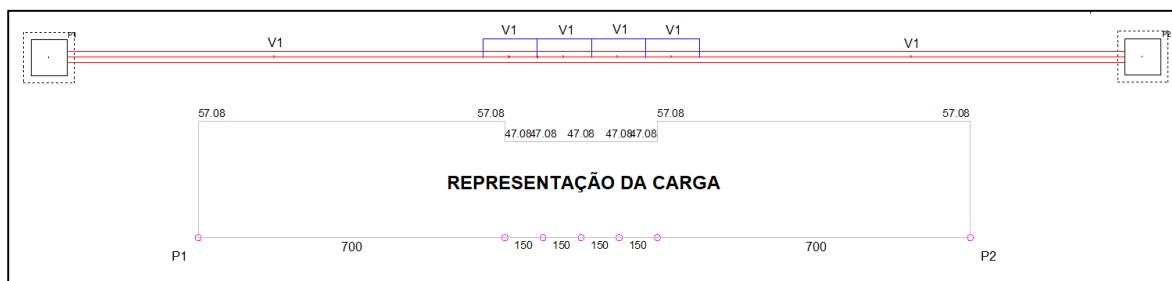
f_{ck}	Altura Útil (m)	Esforços	Unid.	Scilab®	<i>Ftool®</i>	Erro(%)
45	1,69	Momento Fletor Máximo	kN.m	7107,5	7107,5	0,00%
45	1,69	Esforço Cortante v0	kN	1465,6	1465,6	0,00%
45	1,69	Esforço Cortante v1	kN	1363,2	1363,2	0,00%
45	1,69	Esforço Cortante v2	kN	1260,9	1260,9	0,00%
50	1,59	Momento Fletor Máximo	kN.m	7051,3	7051,3	0,00%
50	1,59	Esforço Cortante v0	kN	1454,3	1454,3	0,00%
50	1,59	Esforço Cortante v1	kN	1353,1	1353,1	0,00%
50	1,59	Esforço Cortante v2	kN	1251,9	1251,9	0,00%
55	1,5	Momento Fletor Máximo	kN.m	7000,6	7000,6	0,00%
55	1,5	Esforço Cortante v0	kN	1444,2	1444,2	0,00%
55	1,5	Esforço Cortante v1	kN	1344,0	1344,0	0,00%
55	1,5	Esforço Cortante v2	kN	1243,8	1243,8	0,00%
60	1,43	Momento Fletor Máximo	kN.m	6961,3	6961,3	0,00%
60	1,43	Esforço Cortante v0	kN	1436,3	1436,3	0,00%
60	1,43	Esforço Cortante v1	kN	1336,9	1336,9	0,00%
60	1,43	Esforço Cortante v2	kN	1237,5	1237,5	0,00%

Fonte: Autor (2024).

A validação com precisão dos valores dos esforços de momentos fletores e forças cortantes calculados pelo algoritmo desenvolvido comprova e eficácia do algoritmo quanto ao cálculo destas forças.

Da mesma forma que foram validados os valores dos esforços de momento fletor máximo e cortantes, foi reproduzida dentro do *Eberick®* cada uma das 18 vigas calculadas. Como o *Eberick®* não faz o cálculo da carga móvel, para obtenção dos resultados, foram inseridas na viga forças que provocassem os mesmos esforços de momento e cortante calculados e comparados com os resultados do algoritmo para garantir a conformidade com as normas e a eficiência estrutural. A Figura 12 apresenta a modelagem e lançamentos das cargas sobre uma das vigas no software.

Figura 12 – Exemplo da modelagem e do lançamento das cargas sobre a viga no *Eberick®*



Fonte: Autor (2024).

A Tabela 2 apresenta e compara os resultados da área de aço e bitolas escolhidas pelo algoritmo desenvolvido no *Scilab®* com os valores obtidos através do *Eberick®*, onde As é a armadura de tração na viga com armadura simples, As' é a armadura de tração da viga com armadura dupla e As'' é a armadura de compressão.

Tabela 2 – Comparaçāo dos resultados do algoritmo com *Eberick®*

f_{ck}		Algoritmo Desenvolvido			<i>Eberick®</i>		
		As (cm ²)	As' (cm ²)	As'' (cm ²)	As (cm ²)	As' (cm ²)	As'' (cm ²)
20	Área de Aço	81,15	88,23	11,76	81,12	88,18	11,74
20	Armadura	17 Ø25	18 Ø25	3 Ø25	17 Ø25	18 Ø25	3 Ø25
25	Área de Aço	82,62	97,44	12,61	82,56	97,38	12,60
25	Armadura	19 Ø25	20 Ø25	3 Ø25	19 Ø25	20 Ø25	3 Ø25
30	Área de Aço	97,66	105,68	13,38	97,60	105,64	13,36
30	Armadura	20 Ø25	22 Ø25	3 Ø25	20 Ø25	22 Ø25	3 Ø25
35	Área de Aço	104,34	113,98	14,21	104,30	113,95	14,18
35	Armadura	22 Ø25	24 Ø25	3 Ø25	22 Ø25	24 Ø25	3 Ø25
40	Área de Aço	111,31	120,73	14,85	111,19	120,69	14,84
40	Armadura	23 Ø25	25 Ø25	4 Ø25	23 Ø25	25 Ø25	4 Ø25
45	Área de Aço	117,30	127,51	15,53	117,25	127,46	15,51

45	Armadura	24 Ø25	26 Ø25	4 Ø25	24 Ø25	26 Ø25	4 Ø25
50	Área de Aço	123,53	133,78	16,15	123,50	133,74	16,12
50	Armadura	25 Ø25	28 Ø25	4 Ø25	25 Ø25	28 Ø25	4 Ø25
55	Área de Aço	129,32	105,07	13,12	129,28	105,04	13,10
55	Armadura	27 Ø25	22 Ø25	3 Ø25	27 Ø25	22 Ø25	3 Ø25
60	Área de Aço	136,06	105,38	13,08	136,01	105,33	13,06
60	Armadura	28 Ø25	22 Ø25	3 Ø25	28 Ø25	22 Ø25	3 Ø25

Fonte: Autor (2024).

Na Tabela 2 não foi adicionada uma coluna de erro porque a principal comparação é entre a quantidade de barras, já que influenciam diretamente na altura final da viga. Pode-se ver também que a área de aço à tração e compressão possuem uma pequena diferença (erro máximo de 0,63%) possivelmente devido a pequenos arredondamentos ao longo do cálculo.

Os resultados apresentados na Tabela 2 mostram uma comparação detalhada entre os valores obtidos pelo algoritmo desenvolvido em *Scilab®* e os valores calculados pelo software *Eberick®*, variando o valor de f_{ck} de 20 a 60 MPa. Ao analisar a variação de f_{ck} , observa-se que a área de aço (As) aumenta progressivamente com o aumento da resistência característica do concreto. Para $f_{ck} = 20$ MPa, a área de aço calculada pelo algoritmo é de 81,15 cm², enquanto para $f_{ck} = 60$ MPa, a área de aço chega a 123,53 cm². Essa tendência é consistente e indica a necessidade de mais aço à medida que a resistência do concreto aumenta para suportar as cargas aplicadas.

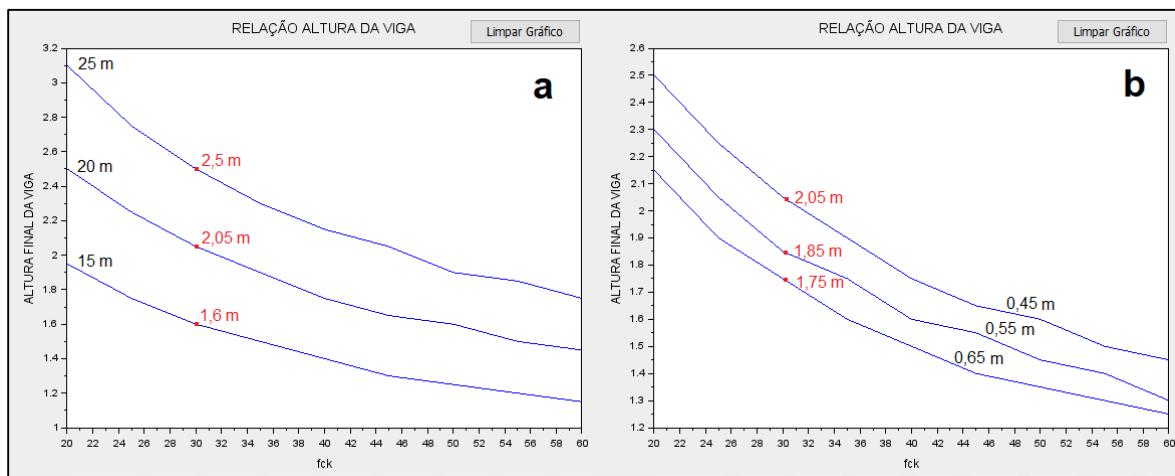
Além disso, a quantidade de barras de armadura necessária também aumenta com o aumento de f_{ck} . Para $f_{ck} = 20$ MPa, o número de barras é de 15 Ø25, aumentando para 27 Ø25 quando $f_{ck} = 60$ MPa, resultado direto do aumento da área de aço necessária.

Também é possível observar que a tendência do aumento na área de aço não se aplica a armadura dupla (As' e As'') para valores de f_{ck} superiores a 50 MPa. Isso se dá devido a diminuição do valor do limite de ductilidade (ϵ_{lim}) de 0,45 para 0,35, de acordo com as recomendações da NBR 6118 (2014) para valores de f_{ck} superiores a 50 MPa. Como é possível observar nas equações 9 e 10, a área de aço para armaduras duplas é calculada em função do valor do limite de ductilidade (ϵ_{lim}) e não em função do parâmetro de ductilidade (ε) calculado através da equação 7 para armaduras simples.

Outras análises possíveis de se realizar através do algoritmo, é a variação dos resultados de altura final mínima com base na variação do comprimento do vão (a) e/ou dimensão da base da viga (b), como mostrado na Figura 13. É possível observar

em (a) a variação do vão para os valores de 15 m, 20 m e 25 m, resultando em valores de alturas finais de viga crescentes, variando de 1,6 m até 2,5 m, para $f_{ck} = 30$ MPa e largura da viga de 0,45m. Por sua vez, em (b), mantendo o vão da ponte em 20m, é realizada a variação da base da viga para os valores de 0,45 cm, 0,55 cm e 0,65 cm, resultando em valores de alturas finais da viga decrescentes, variando de 2,05 m até 1,75 m, também para o para $f_{ck} = 30$ MPa.

Figura 13 – Resultados da altura da viga com base na variação do vão (a) e base da viga (b)



Fonte: Autor (2024).

As análises dos gráficos da Figura 13 revelam compreensões importantes para o dimensionamento otimizado de vigas longarinas de pontes de concreto armado. No gráfico (a), a relação direta entre o comprimento do vão e a altura da viga sugere que para projetos com vãos menores, é possível economizar na altura das vigas sem comprometer a segurança estrutural. Esta economia pode resultar em menores custos de construção e material.

No gráfico (b), a variação da base da viga destaca a importância de considerar a largura da seção transversal no projeto. Uma base maior permite reduzir a altura da viga necessária para suportar as mesmas cargas, promovendo uma utilização mais eficiente do concreto e do aço. Este ajuste pode ser particularmente útil em situações onde a altura total da ponte é restrita ou quando se busca minimizar a quantidade de material utilizado.

A alteração da largura da base da viga também ocasiona consequentemente na alteração da largura livre para distribuição das barras longitudinais que devem ser posicionadas dentro dos estribos, uma vez que larguras maiores permitem o posicionamento de mais barras na mesma camada, resultando na diminuição dos valores de d' e d'' e por sua vez na altura final da viga.

Esses resultados, combinados com os dados apresentados nas tabelas 1 e 2, reforçam a eficácia do algoritmo desenvolvido em *Scilab®* para fornecer pré-dimensionamentos precisos. A capacidade de ajustar a altura da viga com base no comprimento do vão e na largura da base oferece aos engenheiros e projetistas uma ferramenta poderosa para otimizar o uso de materiais e reduzir os custos de construção, ao mesmo tempo em que garantem a segurança e a durabilidade das estruturas.

O algoritmo composto por 2213 linhas de código pode ser acessado através do link: <https://abrir.link/pfAlr>. Para executar o código é necessário que o software *Scilab®* esteja instalado no computador, após isso basta abrir o código baixado dentro do *Scilab®* e executá-lo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho demonstrou a viabilidade e a eficiência de um algoritmo desenvolvido para a otimização do dimensionamento de vigas longarinas de pontes de concreto armado. O algoritmo, ao encontrar a altura mínima das vigas que atendam aos limites de compressão do concreto, mostrou-se uma ferramenta precisa e confiável.

Os resultados obtidos através do algoritmo desenvolvido em *Scilab®* foram comparados com os resultados gerados pelos softwares comerciais *Ftool®* e *Eberick®*. Essa comparação revelou uma precisão significativa nos valores de esforços de momentos fletores e forças cortantes calculados pelo algoritmo. Para todos os valores de f_{ck} e suas respectivas alturas úteis calculadas, os resultados dos esforços de momento fletor máximo e esforço cortante apresentaram uma margem de erro de 0,00%, comprovando a eficiência do algoritmo na determinação desses esforços. Esta precisão é crucial para garantir a segurança e a confiabilidade das estruturas projetadas.

A tabela de comparação das áreas de aço e bitolas escolhidas mostrou que o algoritmo é eficaz no dimensionamento das armaduras longitudinais. As pequenas variações encontradas, com um erro máximo de 0,63%, são atribuídas a arredondamentos nos cálculos. No entanto, essas diferenças não comprometem a integridade estrutural, pois o algoritmo fornece resultados que atendem às normas técnicas. Isso demonstra que o algoritmo pode ser utilizado como uma ferramenta confiável para o pré-dimensionamento de vigas longarinas, auxiliando engenheiros e projetistas na fase inicial do projeto fornecendo um panorama amplo do comportamento da estrutura quanto aos critérios estabelecidos.

Outro aspecto relevante é a capacidade do algoritmo de gerar gráficos que relacionam a altura mínima das vigas com os valores de f_{ck} . Eses gráficos permitem uma análise visual e comparativa da influência do f_{ck} na altura das vigas, facilitando a tomada de decisões de projeto. A interface gráfica desenvolvida torna o algoritmo acessível e fácil de usar, possibilitando que profissionais da área e estudantes façam ajustes e obtenham resultados rapidamente. A utilização desse algoritmo pode reduzir o tempo e os custos associados à readequação de projetos estruturais, promovendo uma maior eficiência no desenvolvimento de pontes.

A principal contribuição deste estudo é fornecer aos engenheiros e estudantes uma ferramenta adicional para o pré-dimensionamento de vigas longarinas, facilitando a tomada de decisões e aumentando a precisão dos projetos. Apesar das variações muito pequenas encontradas nas áreas de aço, o algoritmo demonstrou atender aos requisitos normativos, o que é essencial para garantir a segurança das estruturas. Além disso, a interface gráfica desenvolvida torna a utilização do algoritmo mais acessível, permitindo ajustes rápidos e obtenção de resultados de forma prática.

Futuras pesquisas podem explorar a expansão da metodologia aplicada neste algoritmo para maior quantidade de vigas longarinas e dimensionamentos de outros elementos estruturais de pontes, como pilares e fundações, ampliando ainda mais sua aplicação na engenharia civil. A continuação deste trabalho pode contribuir para o avanço da otimização estrutural, promovendo projetos cada vez mais eficientes e econômicos, sem comprometer a segurança e a qualidade das obras.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto.** Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestre em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

BORGHETTI, Everton. **Análise de diferentes propostas de longarinas em pontes de concreto armado através da ferramenta SAP 2000.** Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica apresentado à Assessoria de Pós-Graduação e Pesquisa pela Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – FATECS, Centro Universitário de Brasília – UniCEUB, Brasília-DF, 2016.

BRANCO, Hugo. **Colapso de pontes: Lições aprendidas.** Dissertação de Mestrado. Instituto superior de engenharia de Lisboa; 2013.

CAVALCANTE, Gustavo Henrique F. **Pontes em concreto armado: análise e dimensionamento.** Editora Blucher, 2019. E-book. ISBN 9788521218623. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521218623/>. Acesso em: 09 abr. 2024.

CORMEN, Thomas H.; LEISERSON, Charles E.; Ronald L. Rivest; e outros. **Algoritmos.** Grupo GEN, 2024. E-book. ISBN 9788595159914. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595159914/>. Acesso em: 17 abr. 2024.

COELHO, Álvaro. *et al.* **Considerações sobre a otimização de longarinas de pontes de concreto armado e concreto pretendido.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 14, 2013 Rio de Janeiro.

Anais [...]. Viçosa: UFV, 2023. p. 1. Disponível em: http://abpe.org.br/trabalhos2023/trabalhos/ID_190.pdf. Acesso em: 6 abr. 2024.

DEBS, Mounir Khalil El; TAKEYA, Toshiaki. **Introdução às Pontes de Concreto.** São Carlos, 2007. Texto provisório de apoio à disciplina SET-412, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte - SGO.** Disponível em: <https://sisdnit.dnit.gov.br/sisdnit/jsp/>. Acesso em: 28 jun. 2021.

DRESCH, Fernanda; GOTO, Hudson; SCHMITZ, Rebeca J.; e outros. **Pontes.** Grupo A, 2018. E-book. ISBN 9788595024830. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595024830/>. Acesso em: 12 abr. 2024.

FABEANE, R. **Pontes mistas aço-concreto: Estudo de diretrizes para dimensionamento otimizado.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Passo Fundo; 2015.

FEITOSA, Karielson Medeiros. **Estudo de algoritmos de integração temporal na análise dinâmica de pórticos planos com o Método dos Elementos Finitos.** Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

FURTADO, J.J.H.C. **Otimização de longarinas de pontes em concreto armado.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

MARCHETTI, Oswaldo. **Pontes de concreto armado.** Editora Blucher, 2018. E-book. ISBN 9788521212799. Disponível em:
<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521212799/>. Acesso em: 12 abr. 2024.

O MUNICÍPIO. **Nível do rio Itajaí-Mirim passa dos 8 metros em Brusque.** Disponível em:
<https://omunicipio.com.br/nivel-do-rio-itajai-mirim-passa-dos-8-metros-em-brusque/>. Acesso em: 20 abr. 2024.

OLIVEIRA, Nayane Cecília Pereira de. Aplicabilidade dos Algoritmos Genéticos na Engenharia Civil. Monografia

(Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

RIBEIRO, Heitor Moura Dias. **Análise Comparativa no Uso de Algoritmos Genéticos e Baseados em Gradiente Aplicados à Otimização Estrutural.** Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

TQS INFORMÁTICA. **Sobre a empresa.** Disponível em:
<https://www.tqs.com.br/tqsabout/company>. Acesso em: 20 abr. 2024