



Considerações sobre a otimização de longarinas de pontes de concreto armado e concreto protendido

Álvaro C. Coelho¹, Diôgo S. Oliveira², Carol F. R. Santos³, José C. L. Ribeiro⁴, José M. F. de Carvalho⁵, Kléos M. L. Cesar Jr⁶, Matheus S. Andrade⁷, Bruno S. Borges⁸, Marco A. N. Cardoso⁹, Diego D. Veloso¹⁰

¹ Universidade Federal de Viçosa / Departamento de Engenharia Civil / alvaro.coelho@ufv.br

^{2,3,4,5,6,7,8,9,10} Universidade Federal de Viçosa / Departamento de Engenharia Civil / dec@ufv.br

Resumo

A otimização de estruturas é essencial no contexto da construção civil, para obtenção de sistemas mais econômicos e sustentáveis. Nesse artigo são sintetizados e discutidos os principais resultados obtidos a partir de estudos de otimização de longarinas em pontes de concreto armado e concreto protendido, nos quais foram investigados parâmetros relacionados a otimização da altura e do espaçamento entre longarinas além dos custos entre longarinas protendidas frente às de concreto armado. Foi realizado um levantamento com pontes cadastradas no sistema do DNIT com o intuito de verificar as dimensões das pontes já existentes no Brasil. Observou-se que, de modo geral, para pontes com vãos de até 20 metros longarinas em concreto armado têm melhor desempenho, enquanto que para vãos maiores, longarinas em concreto protendido são mais adequadas. Constatou-se que, apesar das diretrizes existentes, ainda ocorre uma grande dispersão nas dimensões adotadas para as pontes pré-moldadas protendidas, carecendo de estudos e parâmetros para a definições das dimensões mais econômicas, tendo em vista fatores como a altura das longarinas, o espaçamento entre elas, além da necessidade de estabelecer a relação desses parâmetros com o consumo de materiais. Dessa forma realizou-se um estudo de otimização correlacionando os consumos de aço passivo e aço ativo nas longarinas pontes modeladas em elementos finitos, com vãos variando entre 20 e 40 metros para diferentes espaçamentos entre longarinas e diferentes alturas, obtendo assim curvas que correlacionam o consumo de aço passivo, aço ativo e concreto com os espaçamentos entre longarinas e a relação das altura das longarinas pelo vão, com as quais é possível construir tabuleiros com seções otimizadas do ponto de vista do consumo de materiais. Dentre os resultados obtidos, observa-se que de uma forma geral o espaçamento entre longarinas acarretou em uma maior influência no consumo de materiais quando comparada à altura das longarinas.

Palavras-chave

Pontes; otimização; concreto; concreto pré-moldado.

1 Introdução

Frente ao aumento do tráfego rodoviário dos últimos anos em todo mundo, a construção de novas pontes tem se tornado cada vez mais frequente afim de atender a nova demanda. Tendo em vista o grande número de novas obras juntamente com seu alto custo de construção dá-se a necessidade de modelos de estruturas de pontes com sistemas estruturais otimizados, a fim de garantir obras mais econômicas, mantendo sua eficiência.

No Brasil, apenas 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) (DNIT, 2021), dentre as quais, aproximadamente 53% possuem longarinas em concreto armado e 17% são em longarinas de concreto protendido. Esses dois sistemas estruturais, juntamente

com as pontes em lajes em concreto armado, compõem os três principais tipos de estruturas de pontes, totalizando 86% das pontes sobre responsabilidade do DNIT.

A grande maioria das pontes da malha rodoviária federal datam da década de 60 (Silva et al, 2014) e já não atendem ao volume de tráfego e nem à magnitude das cargas dos veículos que às transpõe. Com isso, muitas dessas pontes vão necessitar de um reforço/ampliação do tabuleiro ou até mesmo a completa substituição. Isso conduz à necessidade de modelos de estruturas de pontes com sistemas estruturais otimizados, a fim de garantir obras mais econômicas, dada o grande valor financeiro associado à construção dessas estruturas.

Tendo em vista essa necessidade, o presente artigo traz uma revisão bibliográfica contemplando estudos que abordaram a otimização de estruturas de pontes em concreto armado e em concreto protendido, buscando dimensões mais econômicas. Além disso, foi realizado um estudo de otimização correlacionando os consumos de aço passivo e aço ativo nas longarinas em 48 tabuleiros de pontes modeladas em elementos finitos, com vãos variando entre 20 e 40 metros para diferentes espaçamentos entre longarinas e diferentes alturas, obtendo assim curvas que correlacionam o consumo de materiais com as dimensões adotadas e espaçamentos adotados para as longarinas.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Estudos de Otimização

Estudos de otimização em estruturas de pontes também têm se tornado um tópico relevante nos últimos anos, principalmente com estudos de otimização relacionados ao custo da estrutura, onde pode-se citar os estudos de Martí et. al (2013) que desenvolveram um algoritmo de otimização para minimizar o custo de pontes rodoviárias pré-moldadas de concreto protendido baseado no *Simulated Annealing* (SA). Para pontes mistas, pode-se citar o trabalho de Gocál e Duršová (2012), que realizaram um estudo paramétrico para otimizar a disposição transversal das vigas em uma ponte mista de aço e concreto, com perfis de seção I.

Observa-se que, devido ao grande número de variáveis encontradas para a otimização de pontes, o esforço computacional para realização dessas tarefas pode se tornar um problema. Desse modo, alguns autores tomaram como estratégia dividir o processo de otimização em etapas, como pode ser visto no trabalho de Lute, Upadhyay e Singh (2009) que propuseram uma nova abordagem combinando um Algoritmo Genético (GA) e uma Máquina de Vetores de Suporte (SVM) para realizar o projeto de otimização de estruturas de pontes estaiadas. A estrutura proposta consiste em uma operação em duas fases. Na primeira fase, os dados de treinamento são gerados usando a rotina de análise baseada em Elementos Finitos (FEM) e são usados para o processo de aprendizagem de uma máquina de regressão SVM. Na segunda fase, GA e SVM são combinados para obter uma ferramenta híbrida para otimização de pontes estaiadas. Como principal vantagem, o tempo de cálculo da otimização foi reduzido.

Outro estudo, no qual adotou-se a estratégia da otimização em duas etapas, foi proposto por Pedro et. al (2017) que, na primeira etapa empregou um modelo estrutural simplificado, normalmente adotado por projetistas de pontes de modo a localizar uma região ótima e fornecer um ponto de partida para a etapa seguinte, em que é utilizado um modelo em elementos finitos completo de modo a refinar a análise e melhorar a otimização. O estudo mostrou que o esquema proposto foi capaz de reduzir o custo estrutural em até 7,43% já na primeira etapa, podendo chegar a 9,17% ao final da segunda.

2.2 Estudos de otimização de estruturas de ponte de concreto

A revisão bibliográfica dos estudos de otimização em pontes de concreto teve o foco voltado para pontes em várias longarinas de concreto armado e protendido. Esse foi organizado a partir dos principais parâmetros geométricos associados a esse sistema estrutural, trazendo uma compilação de resultados de trabalhos em âmbito nacional, bem como dados de pontes, cadastradas no Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte (SGO) (DNIT, 2021).

2.2.1 Relação vão/altura

Na composição do custo de uma ponte, o comprimento do vão é o principal fator, haja vista que pontes com vãos maiores requerem um menor gasto com infraestrutura, e maior gasto com a superestrutura. Por isso, é uma boa prática realizar um estudo comparativo dos custos e encontrar a melhor faixa de vão a ser alocado. Furtado (2018) estudou a otimização de longarinas de pontes em concreto armado. O estudo foi conduzido a partir de uma ponte com tabuleiro de 10 m de largura, equivalente a duas faixas de rolamento, apoiada sobre três longarinas em concreto armado. Foram investigados 4 vãos bi-apoiados, de 15 a 30 metros, variando de 5 em 5.

Furtado (2018) obteve relações vão/altura entre $L / 7,15$ e $L / 7,60$, sendo menor que a relação normalmente adotada para concreto armado que é da faixa de $L / 10$.

Na Figura 1 são apresentadas a relação entre vão livre e altura útil de diferentes longarinas em concreto protendido proposto por Thomaz (2002). O gráfico mostrado na Figura 3 foi obtido a partir do levantamento de diferentes pontes existentes no Brasil.

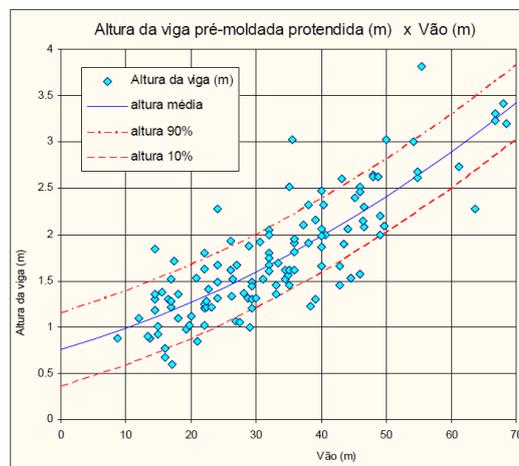


Figura 1 - Relação vão x altura viga pré-moldada protendida (Thomaz (2002)).

A linha azul do gráfico é expressa pela relação:

$$\text{Altura longarina} = (0,00025 * L^2) + (0,02065 * L) + 0,75434 \quad (\text{metros}) \quad (1)$$

Uma comparação entre valores de Furtado (2018) e Thomaz (2002) é demonstrada na Figura 2. Como esperado, as longarinas em concreto protendido necessitam de uma altura consideravelmente menor para conseguir vencer os mesmos vãos que uma longarina de moldada em concreto armado, chegando a ser quase 2,5 vezes menor para o vão de 30 metros.

A fim de se conhecer as alturas das longarinas das pontes existentes no Brasil, foi elaborado um levantamento de 105 pontes sob responsabilidade do DNIT cadastradas no sistema SGO (DNIT, 2021). Foram consideradas pontes com longarinas de concreto protendido na região Sudeste do Brasil e no Distrito Federal. No levantamento foram obtidos o vão, a largura do tabuleiro, a altura das longarinas, o número de longarinas e a distância entre eixos das longarinas. A partir desses dados, foi possível comparar a equação proposta por Thomaz (2002) com as alturas das longarinas encontradas pelo levantamento, como é mostrado na Figura 3.

A partir da análise da Figura 3, percebe-se que as pontes analisadas possuem uma linha de tendência com valores próximos aos valores médios propostos por Thomaz (2002), entretanto ao analisar o coeficiente de determinação (R^2) nota-se uma grande dispersão dos valores, indicando assim uma grande variabilidade existente na altura das longarinas analisadas.

A partir disso, é possível constatar que as pontes vêm sendo projetadas sem um estudo de otimização, principalmente no que se refere à definição das dimensões dos elementos estruturais.

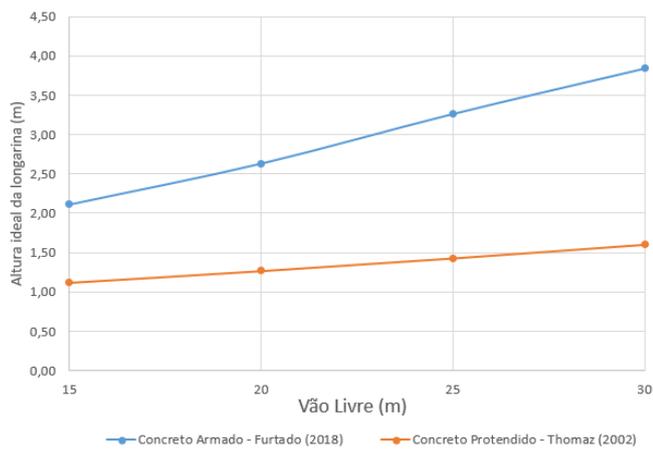


Figura 2 - Relação altura - vão para longarinas em concreto armado e concreto protendido.

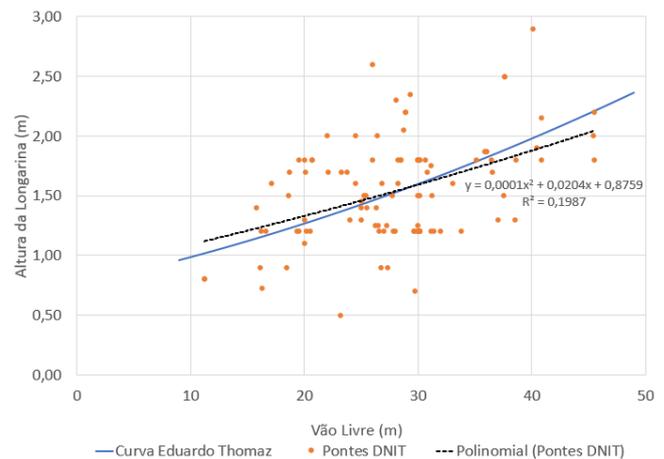


Figura 3 - Altura das longarinas x vão livre.

2.2.2 Comparativo de custos entre concreto armado e concreto protendido

Spessatto, Lazzari e Lazzari (2019) compararam o custo das longarinas em concreto armado com as de concreto protendido. Para isso, estudaram uma ponte já existente com 11,30 metros de largura, com duas longarinas biapoiadas e vãos de 25,70 metros. Os resultados de Spessatto, Lazzari e Lazzari (2019) demonstram que, para uma longarina com a mesma seção transversal, sujeitas a um mesmo carregamento, a taxa de armadura passiva à flexão para o concreto armado tem um valor claramente superior quando comparadas ao concreto protendido. Com relação ao custo final, para a seção em análise, observa-se que as longarinas em concreto protendido apresentaram menor custo que as longarinas em concreto armado, mesmo considerando consumo de armadura ativa.

Gonçalves *et al.* (2018) também propuseram uma análise comparativa entre os sistemas construtivos em concreto armado, concreto protendido aderente e concreto protendido não aderente em longarinas de pontes. As análises foram feitas em uma ponte cuja largura total do tabuleiro era de 14 m, apoiado sobre duas longarinas distantes entre si de 7,60 metros e com dois balanços nas laterais de 3,20 metros. Foram propostos quatro vãos diferentes, sendo eles de 6, 12, 20 e 30 m, com balanços em suas extremidades no valor de $\frac{1}{4}$ do vão.

Dentre os resultados obtidos por Gonçalves *et al.* (2019) observou-se que o peso de aço do sistema protendido aderente (aço ativo + aço passivo) foi o menor dentre os três sistemas analisados, sendo que frente ao sistema em concreto armado o peso de aço é em média 63% menor, e quando comparado ao sistema protendido não aderente o peso médio é aproximadamente 23% menor.

Um estudo de caso feito por Martins (2019), em uma ponte na cidade de Palmas (Estado de Tocantins) demonstrou que a utilização do concreto protendido frente ao concreto armado não foi vantajosa no caso de uma ponte sobre três longarinas com três vão de 19,00 metros e dois balanços de 4,50 metros. O valor final da ponte em concreto armado foi de aproximadamente 88,4% do valor que seria gasto caso as longarinas fossem feitas utilizando concreto protendido. Martins (2019) observou, que o aumento no custo da longarina em concreto protendido se deu pelo custo da armadura ativa.

Outro estudo comparando longarinas pré-moldadas de concreto armado e protendido foi proposto por Junior e Mouço (2018), onde são comparados os custos de produção de longarinas bi apoiadas com vãos variando de 15 a 60 m, para uma ponte de tabuleiro com 14,30 m de largura, e uma longarina de seção variável.

Dentre os resultados obtidos por Junior e Mouço (2018) destaca-se que para todos os vãos analisados as alturas necessárias para as longarinas em concreto armado foram sempre superiores em relação as necessárias para as longarinas em concreto protendido. As longarinas em concreto armado apresentaram uma maior economia frente as longarinas em concreto protendido, situação que tende a sofrer inversão à medida que o vão é aumentado. Tal fato deve-se devido ao custo da armadura ativa ser superior ao custo da armadura passiva. Deve-se observar também que, conforme o vão cresce, a altura necessária da viga de concreto aumenta e passa a ser um limitante do ponto de vista construtivo, funcional e até estético para as estruturas de concreto armado.

Em resumo, tanto no estudo de Martins (2019) como no estudo de Junior e Mouço (2018), nota-se que sistemas em concreto armado possuem menor custo para vãos com até 20 metros, para vãos maiores, o concreto protendido se torna mais vantajoso, tanto do ponto de vista de custo, quando do ponto de vista estético. a ser uma alternativa vantajosa.

2.2.3 Número de longarinas versus vão

Em relação à definição do número de longarinas da seção e o espaçamento entre as mesmas, Thomaz (2002) propôs que a distância máxima entre eixos (a) das longarinas seja dada por:

$$a = 0,028 * L + 2 \quad (\text{variáveis em metro}) \quad (2)$$

Já Gondim (2018) propôs uma variação do espaçamento entre longarinas em concreto protendido com seção tipo I pré-moldada, com finalidade de obter uma viga mais leve, com peso máximo de 15 tf, facilitando assim sua movimentação no canteiro de obras. Em seu estudo, Gondim (2018) analisou uma ponte cujo tabuleiro tinha 10 m de largura. A seção da longarina foi fixada com uma altura de 75 cm e uma base de 50 cm. Afim de obter vários resultados para análise, além de variar a distância entre eixos das longarinas de 0,50 m a 1,50 m aumentando 0,25 m a cada vez, o vão também foi alterado de 2,5 m em 2,5 m começando com 15 m até o maior vão analisado de 32,5m, como é esquematizado na Figura 4.

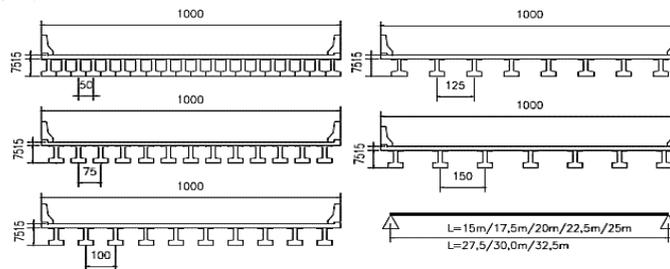


Figura 4 - Seção transversal do tabuleiro, variação entre eixos e vão propostas por Gondim. (Gondim (2018))

Gondim (2018) também definiu 12 arranjos de cordoalhas para seu modelo, onde cada arranjo tinha diferentes áreas de armadura ativa. O arranjo A é o que tinha menor área de armadura ativa, enquanto que o arranjo L tinha a maior área de armadura ativa. Os arranjos são apresentados pela Figura 5. Após definir os parâmetros, Gondim (2018) considerou uma metodologia automatizada no Excel para determinar o campo de aplicação de cada arranjo com seus determinados espaçamentos entre eixos para cada vão. Os resultados são apresentados na Figura 6, em que é possível visualizar qual é o arranjo (área de armadura) necessária para vencer determinado vão com um espaçamento entre eixos.

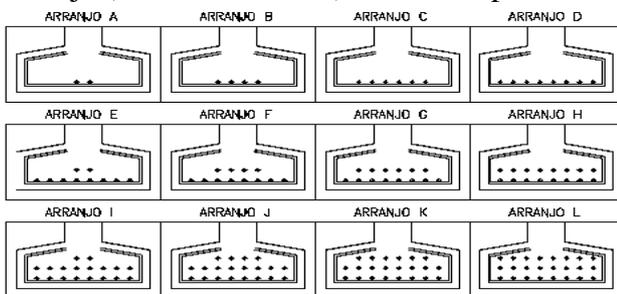


Figura 5 - Arranjos de cordoalhas Ø 12.7mm - CP190RB (Gondim (2018))

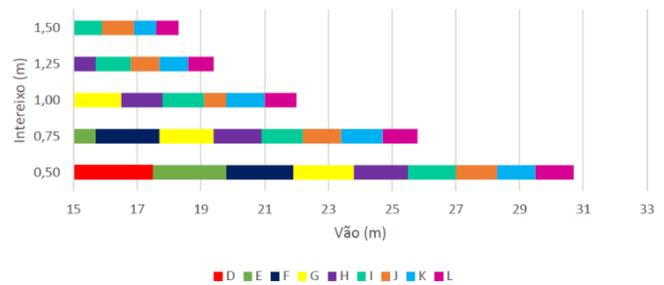
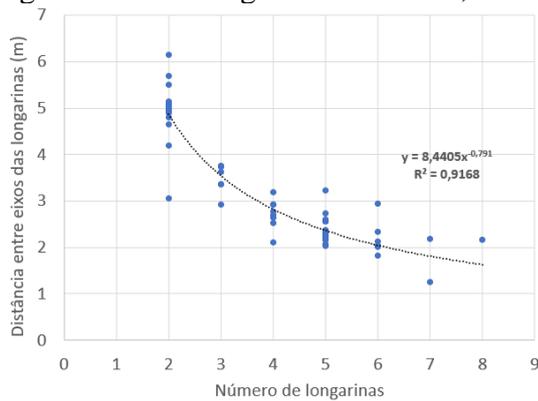


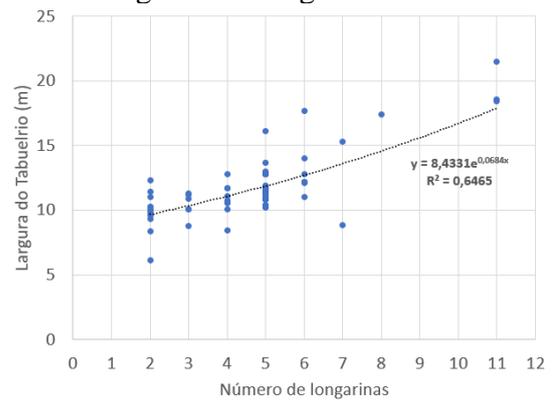
Figura 6 - Visualização do campo de aplicação da viga estudada (Gondim (2018))

Com os resultados obtidos por Gondim (2018) nota-se que ao se variar o espaçamento entre os eixos das longarinas, mantendo a sua seção fixa, pode-se aumentar ou diminuir a necessidade de armaduras ativas na peça para vencer um mesmo vão. Essa análise permite que uma otimização seja feita de modo a verificar se seria mais economicamente viável fazer uma ponte com mais longarinas, com menos armaduras, ou uma longarina com maior taxa de armadura, porém em menor quantidade.

A partir do um levantamento dos dados disponíveis no SGO (DNIT, 2021) foi possível extrair correlação entre o número de longarinas com distância entre eixos e a correlação entre o número de longarinas com a largura do tabuleiro, como pode ser visto na Figura 7-a e Figura 7-b.



a) Número de longarinas x distância entre eixos.



b) Número de longarinas x largura do tabuleiro.

Figura 7 – Correlações obtidas através do levantamento de dados no SGO.

Ao analisar a Figura 7-a observa-se que para um mesmo número de longarinas a distância entre elas apresenta uma grande dispersão. Já ao analisar a Figura 7-b observa-se uma tendência do aumento do número de longarinas quando maior for a largura do tabuleiro.

3 Estudo de otimização com modelagem em Elementos Finitos

Considerando que diferentes vãos, espaçamento e alturas influenciam diretamente no consumo de materiais nas longarinas, foi proposto um estudo onde avaliou-se a influência desses parâmetros no consumo de aço passivo, aço ativo e o consumo de concreto. A fim de verificar a influência desses parâmetros e correlacioná-los com os seus consumos, foram avaliadas pontes com vãos de 20, 30 e 40 metros. Para realização dos estudos, as pontes foram modeladas em Elementos Finitos através do software *CSiBridge v.23* (Figura 8), a partir do qual foram retirados os esforços solicitantes nas longarinas e nas lajes. De posse desses esforços foram utilizadas duas planilhas no *Microsoft Excel*, uma para realizar o dimensionamento das longarinas e outra para dimensionar as lajes, verificando todos os Estados Limites Último e de Serviço, obtendo assim o quantitativo de aço passivo, aço ativo e concreto necessários na estrutura.

Para as longarinas de todas as pontes foram adotadas seções transversais conforme a apresentada na Figura 9, sendo que, para os vãos de 20, 30 e 40 metros a espessura da alma (e) foi adotada com 20, 30 e 40 cm, respectivamente. Já as variações de altura da longarina (h_L) foram realizadas alterando-se apenas a altura das almas (h_a). Adotou-se concreto com f_{ck} de 35 MPa, e balanços laterais no tabuleiro de 110 cm, conforma a seção transversal genérica apresentada na Figura 10. Além disso, a armadura ativa foi considerada com protensão limitada, com pós tração e cabos curvos. Todas as perdas foram calculadas pelo Método Geral, considerando fluência e retração de forma incremental às etapas construtivas de protensão, içamento, concretagem da laje e ponte em serviço.

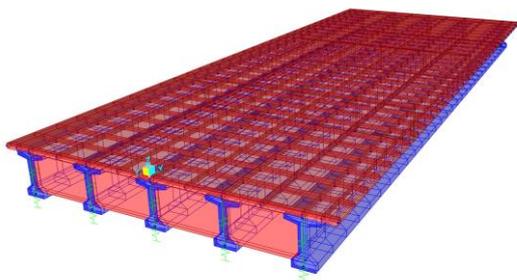


Figura 8 - Modelo 3D em Elementos Finitos com longarinas pré-moldadas em concreto protendido.

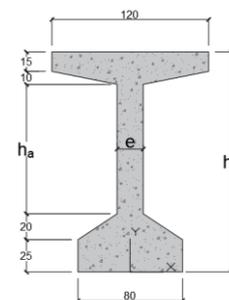


Figura 9 - Seção transversal adotada no estudo de otimização.

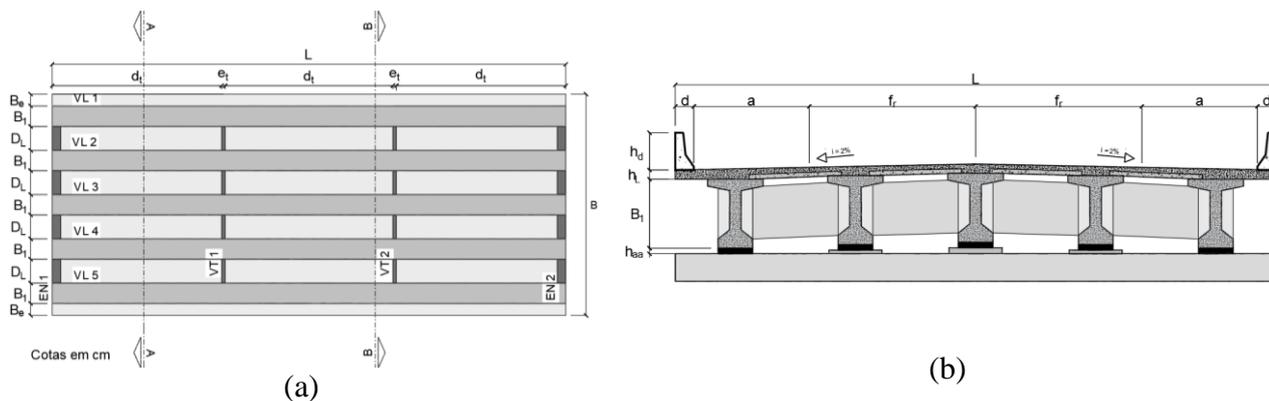


Figura 10 - (a) Vista inferior do tabuleiro (b) Seção transversal da ponte (corte A-A)

A partir dos resultados encontrados com os dimensionamentos para pontes com vãos de 20 a 40 metros, foi possível gerar duas curvas correlacionando os consumos de aço passivo e aço ativo para todas longarinas do sistema, com os espaçamentos entre eixos das longarinas por vão e com a relação os vãos por altura das longarinas. conforme pode ser visto na Figura 11. Para isso, em um dos eixos adotou-se a distância entre os eixos das longarinas enquanto no outro, o vão foi dividido pela altura da longarina ao cubo, dessa forma, buscou-se minimizar ao máximo a influência dos vãos, devido essa está diretamente relacionada com a inércia da seção, onde essa por sua vez, influência diretamente na resistência a flexão da longarina e conseqüentemente no consumo de armadura. Além disso, obteve-se também as equações das superfícies geradas por cada curva, conforme as equações (3) e (4) para os consumos de aço passivo e aço ativo respectivamente, onde a equação (3) resultou em um R² de 0,77, enquanto que a equação (4) apresentou um R² de 0,80.

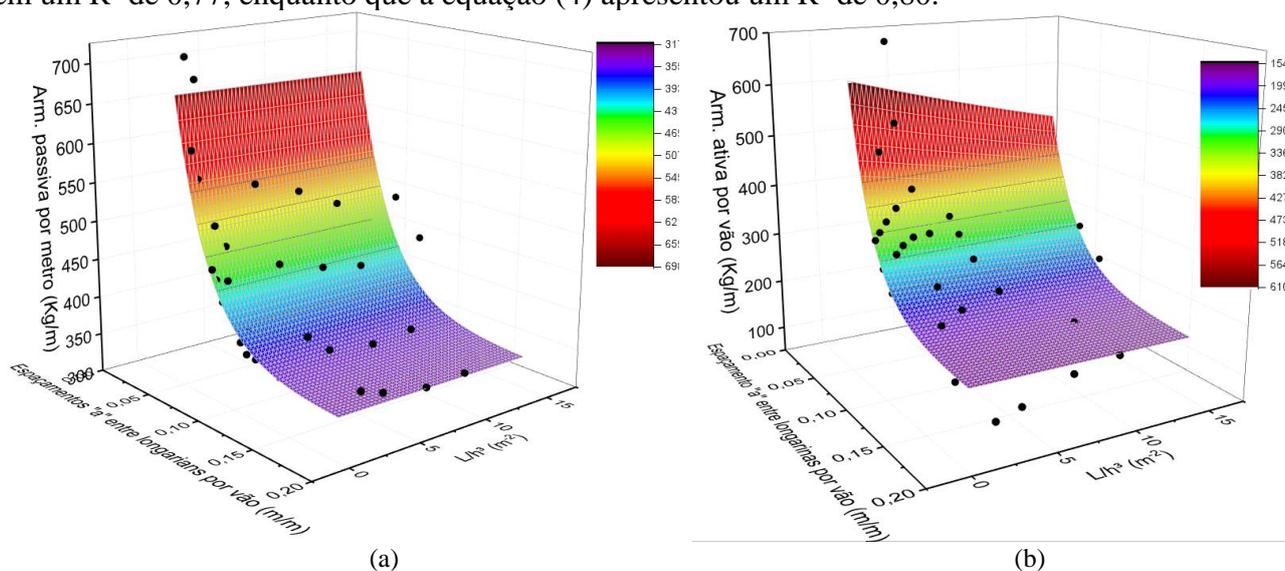


Figura 11 – Consumo de armaduras passivas (a) e ativas (b) (Kg/m) nas longarinas em função do espaçamento “a” longarinas por vão (m/m) e L/h³ (m⁻²)

$$C_{ap} = 339 + 1000 * \exp \left\{ -\frac{a_1/L_1}{0,03} - \frac{L_1/h_1^3}{10^3} \right\} \quad (3)$$

$$C_{aa} = 168 + 1400 * \exp \left\{ -\frac{a_1/L_1}{0,03} - \frac{L_1/h_1^3}{50} \right\} \quad (4)$$

Sendo:

- C_{ap} o consumo de armadura passiva nas longarinas em kg/m;
- C_{aa} o consumo de armadura ativa nas longarinas em kg/m;
- a_1 o espaçamento entre os eixos das longarinas (m);
- L_1 o vão da ponte (m);
- h_1 a altura da longarina (m).

Além das curvas de consumo das armaduras passivas e ativas também foram obtidas as curva onde o consumo total de armadura é obtido correlacionando o espaçamento entre eixos das longarinas pelo vão da ponte além da relação do vão com a altura da longarina, cuja regressão não linear obtida indica um $R^2 = 0,95$, conforme indicado na Figura 12 e na Equação (5), e a curva correlacionando o consumo de concreto em m^3 com o espaçamento entre eixos das longarinas e a relação do vão com a altura da longarina, conforme é apresentado na Figura 13 e na Equação (6) que apresentou um R^2 de 0,89.

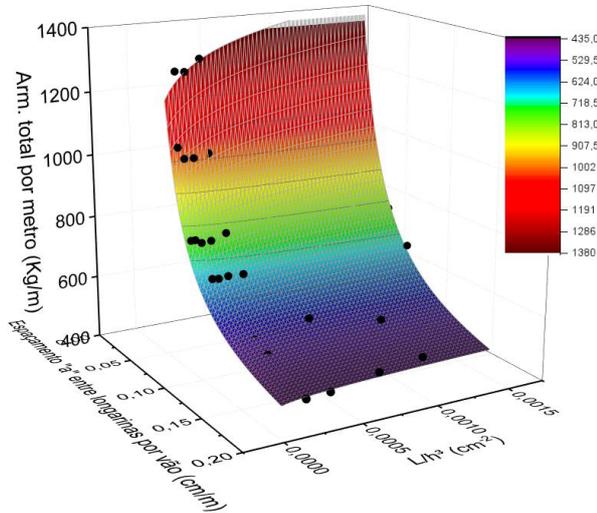


Figura 12 - Consumo de armaduras total (Kg/m) em função do espaçamento entre eixos das longarinas “a” por vão (cm/cm) e L/h^3 (cm^{-2})

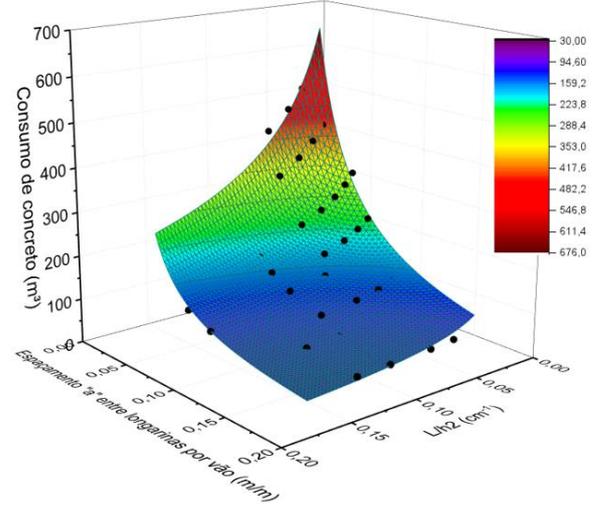


Figura 13 - Consumo de concreto (m^3) em função do espaçamento entre eixos das longarinas “a” por vão (m/m) e L/h^2 (cm^{-1})

$$C_{at} = 400 - \left[75 * \left(\frac{a_2}{L_2} \right)^{-1,25} \right] - \left[43 * \left(\frac{L_2}{h_2^3} \right)^{0,015} \right] + \left[100 * \left(\frac{a_2}{L_2} \right)^{-1,25} * \left(\frac{L_2}{h_2^3} \right)^{0,015} \right] \quad (5)$$

$$C_c = -6 - \left[2 * \left(\frac{a_1}{L_1} \right)^{-1} \right] - \left[3 * \left(\frac{L_2}{h_2^2} \right)^{-0,5} \right] + \left[4,53 * \left(\frac{a_1}{L_1} \right)^{-1} * \left(\frac{L_2}{h_2^2} \right)^{-0,5} \right] \quad (6)$$

Sendo:

- C_{at} o consumo de armadura total nas longarinas em kg/m;
- C_c o consumo de concreto em m^3 ;
- a_1 o espaçamento entre os eixos das longarinas (m);
- L_1 o vão da ponte (m);
- h_1 a altura da longarina (m).
- a_2 o espaçamento entre os eixos das longarinas (cm);
- L_2 o vão da ponte (cm);
- h_2 a altura da longarina (cm).

Dessa maneira, a partir das curvas obtidas no estudo é possível definir quais são as melhores alturas e o espaçamento entre eixos de longarinas que resultam nos menores consumos de material, tanto para as armaduras ativas, passivas e totais, quanto para o consumo de concreto.

Afim de exemplificar a utilização das equações apresentadas, são apresentados na Tabela 1 alguns valores de alturas e distâncias entre eixos de longarinas para vãos de 20 m, 30 m e 40 m com largura do tabuleiro de 13 metros, enquanto que na Tabela 2 são apresentados os consumos de armaduras e concreto para todas as longarinas da ponte, obtidos através das equações (3), (4), (5) e (6) para as situações analisadas.

Tabela 1 - Exemplos de dimensões para cálculo do consumo de materiais.

	Vão (m)	Altura da longarina (m)	Distância entre os eixos das longarinas (m)	Número de longarinas
Hipótese 1	20	1,40	1,80	7
Hipótese 2	20	1,40	3,60	4
Hipótese 3	20	1,80	3,60	4
Hipótese 4	30	1,70	3,60	4
Hipótese 5	30	1,70	2,16	6
Hipótese 6	30	2,50	3,60	4
Hipótese 7	40	2,90	2,70	5
Hipótese 8	40	2,30	2,70	5
Hipótese 9	40	2,30	2,16	6

Tabela 2 - Consumo de material obtidos através das equações (3), (4), (5) e (6).

	Consumo de armadura passiva (C_{ap}) (Kg/m)	Consumo de armadura ativa (C_{aa}) (Kg/m)	Consumo de armadura total (C_{at}) (Kg/m)	Consumo de concreto (C_c) (m^3)
Hipótese 1	388,43	228,25	660,24	101,37
Hipótese 2	341,46	171,00	487,05	42,91
Hipótese 3	341,47	171,24	478,88	60,11
Hipótese 4	357,20	190,69	566,71	71,33
Hipótese 5	429,17	280,40	750,10	129,19
Hipótese 6	357,28	192,68	545,57	115,64
Hipótese 7	444,23	310,80	732,71	222,19
Hipótese 8	444,05	306,17	759,05	168,81
Hipótese 9	503,76	384,69	886,83	215,28

Ao analisar a Tabela 2, nota-se que para os exemplos apresentados para pontes com vãos de 20 metros, alterar a altura não gerou mudanças significativas nos consumos de armadura, entretanto observa-se que consumo de concreto teve um aumento de aproximadamente 30% entre a hipóteses 2 e a hipótese 3, enquanto que ao se variar a distância entre longarinas de 1,80 m para 3,60 m, reduzindo assim o número de longarinas utilizadas, observou-se uma redução significativa tanto nas armaduras passivas e ativas, quanto no consumo de concreto. Situação semelhante à apresentada para os vãos de 30 e 40 metros, demonstrando assim que o espaçamento entre os eixos longarinas tem uma maior influência sobre o consumo das armaduras tanto passivas quanto ativas, quando comparado a influência da altura. A altura das longarinas teve uma influência maior sobre o consumo de concreto nas longarinas frente ao consumo de armaduras.

Entretanto, em alguns casos, a altura da longarina pode ser um fator limitante devido a exigências quanto ao gabarito, sendo a utilização de um maior número de longarinas com menores espaçamentos entre elas, uma possível alternativa visando a redução de sua altura. Assim, pode-se utilizar dessas curvas, fixando o valor máximo da altura e encontrado assim qual é a melhor configuração de espaçamento entre longarinas que resulta no menor consumo de material.

4 Conclusões

A exposição de vários trabalhos relacionados ao tema otimização de longarinas nas pontes, demonstra que esse assunto é de grande interesse e relevância. Quando se trata de sistemas estruturais de pontes, um pequeno detalhe ou ajuste que se faça no arranjo ou detalhamento estrutural pode acarretar em uma grande economia final, quando considera-se a magnitude dessas obras e o grande número de pontes no Brasil.

A partir dos trabalhos analisados, observou-se que, para vãos de 20 a 25 metros, o uso de longarinas em concreto armado conduz a boas soluções. Para vãos maiores que 25 metros, apesar do custo das longarinas em concreto armado serem menores quando comparadas as longarinas em concreto

protendido até um vão de aproximadamente 50 metros, a altura das longarinas em concreto armado pode vir a ser um limitante do ponto de vista construtivo, funcional e até estético para estruturas de concreto armado.

Observou-se grande variabilidade nos dados analisados das 105 pontes extraídas do SGO-(DNIT, 2021). Esses dados apresentaram uma grande dispersão dos valores de altura da longarina para o mesmo vão, diferentes quantidades de longarinas para pontes com o mesmo vão e conseqüentemente diferentes distâncias entre eixos, divergindo da recomendação de Thomas (2002). Nesse sentido, o estudo de otimização conduzido permitiu a correlacionar o consumo de armadura passiva e ativa e o consumo de concreto com a altura da longarina, o vão e o espaçamento entre longarinas, onde, de uma forma geral, observou-se que o espaçamento entre as longarinas, e conseqüentemente a quantidade de longarinas no sistema, apresentou uma maior influência sobre o consumo de matérias quando comparada à altura. Além disso, com essas curvas é possível construir tabuleiros com seções otimizadas do ponto de vista do consumo de materiais. Esses tabuleiros serão apresentados em trabalhos futuros, conforme a evolução da presente pesquisa, ainda em andamento.

Referências

- 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.
- GOCÁL, J.; ĎURŠOVÁ, A. Optimisation of transversal disposition of steel and concrete composite road bridges. *Procedia Engineering*, v. 40, 2012, p. 125- 130.
- GONÇALVES, C.S et al. Comparativo técnico entre o dimensionamento de longarinas em concreto armado e concreto protendido. In: Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 10., 2018, Rio de Janeiro.
- GONDIM, J.J. Avaliação de viga de concreto pré-moldado para pontes rodoviárias com vão entre 15 e 35 metros. 2016. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- JUNIOR, A.T.S; MOUÇO, D.L. Análise comparativa entre longarinas pré-moldadas de concreto armado e protendido para pontes rodoviárias. In: Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 10., 2018, Rio de Janeiro.
- LUTE, Venkat; UPADHYAY, Akhil; SINGH, K. K. Computationally efficiently analysis of cable-stayed bridge for GA-based optimization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 22, 2009, p. 750-758.
- MARTÍ, J. V.; VIDOSA, F. G.; YEPES, V.; ALCALÁ, J. Design os prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing. *Engineering Structures*, v. 48, 2013, p. 342- 352.
- MARTINS, G.A; CARVALHO, D, I; CASTRO, B, C. Custo das longarinas em concreto protendido: Estudo de caso da ponte sobre o ribeirão brejo comprido na cidade de palmas. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia; In: Semana Oficial de Engenharia e da Agronomia, 76., 2019, Palmas.
- PEDRO, R. L; DEMARCHE, J.; MIGUEL, L. F.F.; LOPEZ, R. H. An efficient approach for the optimization of simply supported steel-concrete composite I-grider bridges. *Advances in Engineering Software*, v. 112, 2017, p. 31-45.
- THOMAZ, E.C.S. Concreto protendido pontes: Vigas pré-moldadas. Notas de aula. IME.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte - SGO. Disponível em: <https://sisdnit.dnit.gov.br/sisdnit/jsp/>. Acesso em: 28 de junho de 2021.
- SILVA, P. F; BRITO M. A. N.; SANTOS, I. C.; SILVA, R. S. Y. C.; Emídio Sobrinho, B. Efeitos da Mudança da NBR 7188:2013 nos Projetos de Pontes. Estudo de Caso: Projeto de Recuperação da Ponte sobre o Rio Correias na BR 101/SC. In.: Anais do VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro. 2014.
- SPESSATTO, R.P; LAZZARI, B.M; LAZZARI, P.M. Dimensionamento e estudo comparativo de materiais de uma viga de ponte rodoviária em concreto armado e concreto protendido. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 62., 2020, Florianópolis. [Anais]. Santa Catarina: IBRACON, 2020.
- ZAFORTEZA, Ignacio Paya; YEPES, Víctor; HOSPITALER, Antonio; VIDOSA, Fernando González. CO₂-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing. *Engineering Structures*, v. 31, 2009, p. 1501 – 1508.