



A: XXXIX-0000

ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS NA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE TRELIÇAS MISTAS TUBULARES

ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL IMPACTS IN TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF COMPOSITE TRUSS

Diego Klein (1) (A); Gabriel Erlacher (2); Adenilcia F. G. Calenzani (3); Élcio C. Alves (4)

- (1) Mestrando em Estruturas, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória/ES, Brasil.
(2) Acadêmico de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória/ES, Brasil.
(3) Dr.^a Prof.^a, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória/ES, Brasil.
(4) Dr. Prof., Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória/ES, Brasil.

Endereço para correspondência: diegoklein_@hotmail.com; (A) Apresentador

Área temática: Análise estrutural – Métodos Computacionais

Resumo

A utilização de grandes vãos na construção civil vem crescendo nos últimos anos. A utilização de treliças mistas de aço e concreto é uma boa alternativa, dada a crescente escassez de materiais. O estudo tem como objetivo apresentar a formulação do problema de otimização topológica para treliças mistas de aço tubular e concreto. Para medir a eficiência do problema, a função objetivo será a que minimize a emissão de CO₂ do projeto final, levando em consideração a emissão gerada por perfis de aço, conectores de cisalhamento, laje *steel deck* e resistência do concreto. Na solução do problema foi utilizado um algoritmo de otimização de enxame de partículas e as restrições analisadas utilizando o método de penalidade adaptativa. É feita uma análise das soluções ótimas para determinar quais materiais mais impactam na emissão final de CO₂ da estrutura. Os resultados preliminares indicam que tomando como variável de projeto o cálculo automático do número de painéis e a altura da treliça, pode-se reduzir consideravelmente a massa estrutural deste elemento.

Palavras-chave: treliças mistas, emissão de CO₂, otimização topológica, enxame de partículas.

Abstract

The use of large spans in civil construction has been growing in recent years. The use of composite steel and concrete trusses is a good alternative, given the increasing number of materials. The objective of this work is to present a formulation of the topological optimization problem for composite tubular steel and concrete trusses. To measure the efficiency of problem, the objective function will be the one that minimizes the CO₂ emission of the final project, taking into account the emission generated by steel profiles, shear connectors, steel deck slab and concrete strength. A particle swarm optimization algorithm was used to solve the problem and the constraints were analyzed using the adaptive penalty method. An analysis of the optimal solutions is carried out to determine which materials most impact the final CO₂ emission of the structure. Preliminary results indicate that taking as a design variable the automatic calculation of the number of panels and the height of the truss, the structural mass of this element can be considerably reduced.

Keywords: composite trusses, CO₂ emissions, topological optimization, particle swarm optimization.



1. INTRODUÇÃO

A utilização de estruturas mistas de aço e concreto vem crescendo com o passar dos anos devido às vantagens obtidas na associação de um perfil de aço com uma estrutura de concreto, entre elas: dispensa de fôrmas e escoramentos, redução do peso próprio estrutural, racionalização de recursos e rapidez na velocidade de execução. Em treliças mistas, uma treliça de aço trabalha de maneira simultânea com uma laje de concreto, por meio de ligação mecânica via uso de conector de cisalhamento, resistindo a esforços de tração e compressão, respectivamente, conforme indicado na figura 1 (NBR 8800:2008; FAKURY, CASTRO E SILVA e CALDAS, 2016).

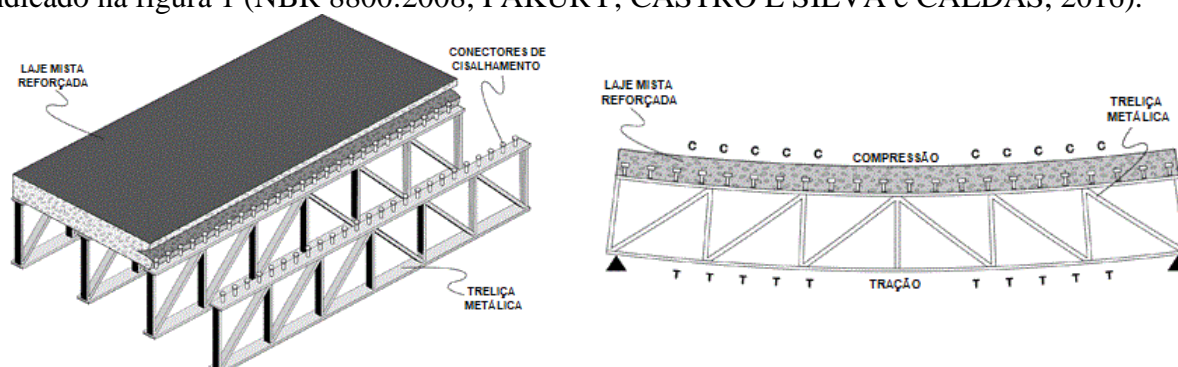


Figura 1. Treliça mista e carregamentos de tração e compressão que atuam sobre a estrutura
Fonte: Adaptado de REIDsteel, 2022.

O uso de treliças mistas de aço e concreto é atrativo para a aplicação em grandes vãos. O dimensionamento de treliças pode ser facilitado com o uso de técnicas de otimização que forneçam opções de escolha de perfis disponíveis em mercado, resultando em projetos mais econômicos e também menos agressivos ao meio ambiente (NEAL *et al.*, 1992).

Nas últimas décadas, pesquisas relacionadas a otimização estrutural passaram a analisar o impacto que estruturas provocam no meio ambiente, especialmente relacionadas a emissão de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera. É o caso de Camp e Huq (2013) que otimizaram o custo e a emissão de CO_2 em pórticos de concreto armado e encontraram resultados que demonstram a eficiência computacional. Vieira (2014) propôs a otimização do impacto ambiental em estruturas pré-moldadas e tornou mensurável a sustentabilidade dentro de um empreendimento, Medeiros e Kripka (2014) aplicaram a otimização do custo e da emissão de CO_2 em pilares retangulares de concreto armado através da abordagem do ciclo de vida dos insumos, Yepes, Martí e García-Segura (2015) analisaram a otimização de custos e emissão de CO_2 aplicado a pontes rodoviárias de concreto protendido pré-moldado e Tormen *et al.* (2020) analisaram vigas mistas e encontraram soluções semelhantes para soluções ótimas obtidas do ponto de vista financeiro e da análise de sustentabilidade.

Poucos são os estudos que tratam exclusivamente de treliças mistas de aço e concreto. Entre os estudos já divulgados, Silva, Pinto Jr. e Requena (2013) submeteram a avaliação treliças mistas tubulares sujeitas a diversas configurações de painéis Vierendeel, enquanto Trindade, Fernandes e Bertolino Jr. (2017) analisaram uma treliça mista, bi-apoiada, do tipo *steel-joint* Warren modificada. Em ambas pesquisas, os autores constataram que existe uma configuração ideal para a disposição de painéis na treliça e circunstâncias em que os apoios ficam sobrecarregados. Liu *et al.* (2020) estudaram o comportamento a flexão de treliças mistas de perfil retangular preenchido com concreto, associados a laje de concreto armado e concreto protendido. Os resultados



indicaram que a laje de concreto protendido combinada com pinos de cisalhamento prolonga a vida útil das treliças mistas.

No que se refere a otimização topológica, o intuito principal é promover a melhoria do dimensionamento da forma, traduzido em treliças metálicas na altura da estrutura, número de barras, espaçamento entre nós e quantidade de nós. Friedlander e Gomes (2011), Cardoso, Silva e Reyolando (2016), e Tarabay e Lima (2022) apresentaram a otimização topológica de treliças considerando diferentes configurações para as seções, condições de carregamentos e perfis metálicos. Foram empregados critérios de paradas e variáveis de projetos que, de maneira geral, forneceram resultados onde a massa total foi reduzida e a adoção do maior número de variáveis de projeto indicou melhor desempenho na relação carga de ruptura sobre peso próprio.

A otimização topológica de treliças também esteve integrada nas pesquisas de Muller e Klashorst (2017) e Ozimboski *et al.* (2019) que propuseram a otimização topológica simultânea de estruturas treliçadas, por meio de *softwares*, e indicaram que quanto mais complexa a rotina de otimização, melhores são as soluções encontradas, menor o peso estrutural e o esforço computacional para a avaliação de um problema. Já o estudo de Martins *et al.* (2021) trata da análise numérica e experimental de treliças mistas tubulares. Os autores verificaram a influência de conectores de cisalhamento na flexão de treliças metálicas e os resultados indicaram que a deformação do conector de cisalhamento provoca perda de interação entre laje e banzo superior.

Em se tratando da otimização de estruturas, uma técnica bastante utilizada é a *Particle Swarm Optimizaton* (PSO), aplicada tanto para problemas com ou sem restrição, onde um sistema com várias partículas individuais e de comportamento próprio são alteradas ao longo do processo e essa tendência de generalização do sistema de partículas faz com que partículas semelhantes assumam representação de formas geométricas, forneçam coordenadas locais e indiquem a orientação (REYNOLDS, 1987).

O método PSO foi aplicado em diversos estudos, entre os quais: otimização de treliças de aço (PEREZ e BEHDINAN, 2007); minimização do peso de treliças com restrições de tensão e deslocamento (BARBOSA e LEMNOGE, 2008); otimização da forma de treliças considerando restrições de frequência (GOMES, 2009); projeto otimizado de estruturas de treliças conectadas por pinos (BAGHLANI e MAKIABADI, 2013) e estruturas reticuladas com restrições de frequência de vibrações (CARVALHO, HALLAK e LEMONGE, 2018).

Diante do retrato mundial caracterizado pelo uso de materiais construtivos em escala já mais vista a pesquisa tem por objetivo propor a otimização topológica de treliças mistas tubulares de aço e concreto para a minimização da emissão de CO₂, utilizando o algoritmo metaheurístico *Particle Swarm Optimization* (PSO), conhecido como enxame de partículas, integrado ao *software* Matlab para a exemplificação numérica da formulação proposta.

2. DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE TRELIÇAS MISTAS

A Norma Brasileira NBR 8800:2008 é quem define os padrões de dimensionamento de treliças mistas de aço e concreto no Brasil. Para o dimensionamento dos tubos foram inseridas as adaptações propostas pela NBR 16239:2013. Foram considerados as três principais configurações geométricas de treliças: Pratt, Howe e Warren. É preciso ressaltar que para cada modelo existe um comportamento distinto quando submetido a carregamentos. Os esforços de compressão e tração resistentes de cálculo, assim como o momento fletor são calculados dentro da rotina de dimensionamento construída no *software* e seguindo as prescrições da norma já mencionada.



No dimensionamento da seção mista fica estabelecido, segundo a NBR 8800:2008, que a interação entre aço e concreto seja completa e que barras submetidas a atuação simultânea de força axial de tração ou compressão e de momentos fletores sejam verificadas conforme a Eq. 1 e Eq. 2.

Para $N_{Sd}/N_{Rd} \geq 0,2$:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \geq 1,0 \quad 1$$

Para $N_{Sd}/N_{Rd} < 0,2$:

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \geq 1,0 \quad 2$$

Onde:

N_{Sd} = esforço axial solicitantes de cálculo

N_{Rd} = esforço axial resistente de cálculo

M_{Sd} = momento fletor solicitante de cálculo, seja no eixo x ou y

M_{Rd} = momento fletor resistente de cálculo, seja no eixo x ou y

Além das restrições referentes ao estado limite último foi verificada a flecha devido ao estado limites de serviço (FAKURY, CASTRO E SILVA e CALDAS, 2016). Em treliças biapoiadas submetidas a carregamentos uniformemente distribuídos a flecha não deve exceder a razão do vão sobre 350 e do vão sobre 250 em treliças de piso e cobertura, respectivamente. Além disso limitou-se a altura da treliça sendo menor igual ao vão sobre 8 e os número de painéis tendo tendo que ser para para as treliças Pratt e Howe e assumindo um valor inteiro para a treliça Warren.

3. PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

A formulação do problema de otimização consiste em minimizar da emissão de CO_2 em treliças mistas tubulares associadas a laje mista *steel deck*. A função de minimização do problema ($Min CO_2$) é apresentada na Eq. 4 e expressa em $kgCO_2$.

$$Min CO_2 = CO_{2(con)} + CO_{2(tre)} + CO_{2(deck)} + CO_{2(tela)} + CO_{2(conec)} \quad 4$$

Onde:

$Min CO_2$ = mínima emissão de dióxido de carbono para a treliça mista

$CO_{2(con)}$ = emissão de dióxido de carbono para o concreto da laje mista *steel deck*

$CO_{2(tre)}$ = emissão de dióxido de carbono para os perfis da treliça metálica

$CO_{2(deck)}$ = emissão de dióxido de carbono para a fôrma de aço *steel deck*

$CO_{2(tela)}$ = emissão de dióxido de carbono na malha de aço de reforço

$CO_{2(conec)}$ = emissão de dióxido de carbono para os conectores de cisalhamento *Stud Bolt*

Os valores para emissão de CO_2 do concreto e do aço são apresentados na tabela 1 para cada componente da treliça metálica. As emissões de CO_2 , em $kgCO_2$, foram definidas com base na metodologia *Life Cycle Assessment* (LCA) que consiste na análise das etapas que envolvem deste a extração do material até o seu reuso.



Tabela 1. Emissões de CO₂ por material (SANTORO e KRIPKA, 2020; WORDSTEEL, 2021)

| Material | Unidade | CO ₂ (kgCO ₂) | Material | Unidade | CO ₂ (kgCO ₂) |
|--------------------------|----------------|--------------------------------------|--------------------------|----------------|--------------------------------------|
| f _{ck} = 20 MPa | m ³ | 130.68 | f _{ck} = 50 MPa | m ³ | 216.40 |
| f _{ck} = 25 MPa | m ³ | 139.88 | Perfil de aço | kg | 1.120 |
| f _{ck} = 30 MPa | m ³ | 148.28 | Steel deck | kg | 2.638 |
| f _{ck} = 35 MPa | m ³ | 162.36 | Malha de aço | kg | 1.924 |
| f _{ck} = 40 MPa | m ³ | 172.77 | Stud Bolt | kg | 1.924 |
| f _{ck} = 45 MPa | m ³ | 185.32 | | | |

Para a solução do problema de otimização foi utilizado o PSO com o Método da Penalidade Adaptativa (APM) proposto por Barbosa e Lemonge (2008). Para a minimização da emissão de CO₂ considerando as sete variáveis de projeto: perfil tubular do banzo inferior, perfil tubular do banzo superior, perfis tubulares das diagonais e montantes, resistência característica do concreto à compressão, escolha da laje *steel deck*, número de painéis e altura da treliça. Foram disponibilizadas 142 opções de perfis usuais tubulares, resistência característica do concreto conforme indicado na tabela 1, cadastrados os modelos MF-50 e MF-75 para o *steel deck* conforme catálogo da Metform e considerado apenas conectores de cisalhamento do tipo *Stud Bolt* com diâmetro de 19mm.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Com intuito de verificar a eficiência dos resultados obtidos para otimização da emissão de CO₂ em treliças mistas tubulares através do PSO foi analisados três tipos de treliças propostas neste trabalho. Foram consideradas como dados de entrada uma laje do tipo *steel deck* com nervuras paralelas à treliça metálica, treliças de piso do tipo Pratt, Howe e Warren, construção escorada, espaçamento entre treliças de 200cm, comprimento de vão de 24m, altura da treliça de 1m, piso do tipo elevado com presença de divisórias fixas ou móveis, construção destinada a uso residencial, f_{ck, inicial} de 25MPa, classe de agressividade ambiental II, agregado gnaíse, aço AGR 542 com f_y de 345MPa. Após a otimização da estrutura foram encontrados os seguintes parâmetros, para as treliças analisadas, conforme apresentado na tabela 1 que descreve as emissões de CO₂ individualizadas.

Tabela 1. Emissão de CO₂ individualizada, em kgCO₂, para vão de 24m via PSO

| Treliça | Concreto | Perfis | Steel Deck | Malha de Aço | Stud Bolt | Total |
|---------|----------|----------|------------|--------------|-----------|----------|
| Pratt | 470,448 | 1991,258 | 1062,375 | 111,746 | 66,960 | 3702,787 |
| Howe | 470,448 | 1988,729 | 1062,375 | 111,746 | 66,960 | 3700,258 |
| Warren | 470,448 | 1955,877 | 1062,375 | 111,746 | 66,960 | 3667,406 |

Conforme pode ser observado na tabela 2, a emissão de CO₂ foi menor na treliça Warren se comparada aos valores fornecidos pelas treliças Pratt e Howe. É preciso ressaltar que não houveram variações no modelo do *steel deck*, altura da laje, espessura da capa de concreto, espessura da forma e f_{ck} das soluções ótimas geradas para cada modelo de treliça desta avaliação, sendo MF-50, 10cm, 5cm, 0,8mm e 20MPa, respectivamente. Os resultados indicam que o



comprimento do vão é diretamente proporcional ao número de conectores e altura da treliça. Na tabela 2 são apresentadas as dimensões dos perfis encontrados e a altura de cada treliça metálica

Tabela 2. Perfis tubulares metálicos e altura da treliça metálica em vão de 24m via PSO

| Treliça | Banzo Superior | Banzo Inferior | Diagonais e Montantes | Altura |
|---------|--------------------|--------------------|-----------------------|--------|
| Pratt | TC 101,6mm x 5,6mm | TC 141,3mm x 5,6mm | TC 101,6mm x 5,6mm | 275cm |
| Howe | TC 101,6mm x 4,0mm | TC 168,3mm x 5,6mm | TC 141,3mm x 5,0mm | 295cm |
| Warren | TC 88,9mm x 5,6mm | TC 168,3mm x 5,0mm | TC 101,6mm x 6,4mm | 300cm |

Conforme indicado na tabela 2, a melhor solução ótima encontrada para o vão de 24m não necessariamente se traduz na menor altura da treliça metálica, mas sim na dimensão dos perfis TC adotados. O banzo superior da treliça Warren tem o menor diâmetro nas soluções ótimas para a treliça de aço e, conseqüentemente, forneceu a menor emissão de CO₂ para o trecho de 24m. O gráfico da figura 2 apresenta as restrições do problema para as soluções ótimas de cada treliça.

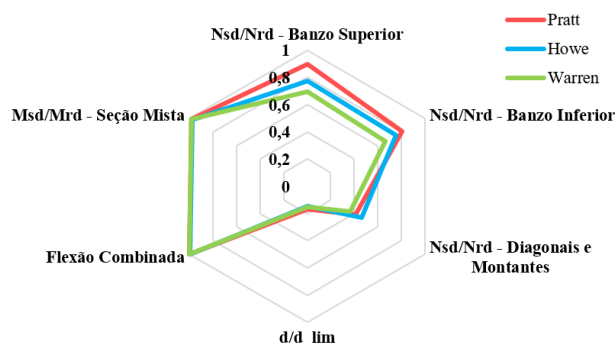


Figura 2. Gráfico das restrições normalizadas

É possível verificar no gráfico da figura 2 que, em todos os casos, a flexão combinada e o momento solicitante da seção mista estão próximos dos limites aceitáveis. Quanto aos esforços que atuam sobre os banzos superior e inferior, diagonais e montantes, a treliça Warren apresenta as melhores respostas, assegurando a capacidade resistente dos perfis TC utilizados nesses trechos.

A solução ótima para a minimização da emissão de CO₂ nos vãos de 24,0m de comprimento foi obtida com treliça Warren. Os piores resultados deixaram de ser fornecidos pela treliça do tipo Howe e passaram a ser verificados na otimização com treliças do tipo Pratt. Muito embora as variações não sejam grandes entre os modelos de treliças, toda e qualquer redução na emissão de CO₂ já expressa um grande significado e ajuda na redução do impacto ambiental.

5. CONCLUSÕES

A otimização para minimizar a emissão de CO₂ em estruturas é extremamente necessária e possível de ser realizada através de técnicas como o *Particle Swarm Optimization* (PSO). O PSO forneceu resultados aceitáveis para a otimização topológica de treliças mistas tubulares e permitiu definir quais os modelos de treliças fornecem as melhores soluções, neste caso a treliça Warren. Um fator que torna atrativo a utilização da otimização topológica via PSO é a facilidade em sua implementação e a possibilidade de obter resultados de maneira prática.



AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pelo incentivo á produção acadêmica e a FAPES e CAPES pelo apoio junto a instituição para promoção do desenvolvimento científico.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008). Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. NBR 8800:2008. Rio de Janeiro.
- Baghlani, A. and Makiabadi, M.H. (2013). An enhanced particle swarm optimization for design of pin connected structures. *Scientia Iranica A*, v. 20, n. 5, p. 1415-1432.
- Barbosa, H.J.C. and Lemonge, A.C.C. (2008). An adaptive penalty method for genetic algorithms in constrained optimization problems. *Frontiers in Evolutionary Robotics*, Editora Hitoshi Iba, p. 9-34.
- Camp, C.V. and Huq, F. (2013). CO₂ and cost optimization of reinforced concrete frames using a big bang-big crunch algorithm. *Engineering Structures*, v. 48, p. 363-372.
- Cardoso, E.S.; Silva, M.A. e Reyolando, M.L.R.F. (2016). Otimização de forma utilizando um modelo de treliça. XXXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Brasília, Novembro.
- Carvalho, J.P.G.; Hallak, P.H. e Lemonge, A.C.C. (2018). Otimização estrutural de treliças considerando restrições de frequências naturais de vibração. *Principia: Caminhos da Iniciação Científica*, v. 18, n.2.
- Facury, R.H.; Castro e Silva, A.L.R. e Caldas, R.B. (2016). Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto. Pearson Education do Brasil, São Paulo, BRA.
- Friedlander, A. and Gomes, F.A.M. (2011). Solution of a truss topology bilevel programming problem by means of an inexact restoration method. *Computational e Applied Mathematics*, v. 30, n. 1, p. 109-125.
- Gomes, H.M. (2009). Truss optimization on shape and size with dynamic constraints using a particle swarm optimization. 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, November.
- Klein, D.; Calenzani, A.F.G. and ALVES, E.C. (2021). Optimized design of composite steel and concrete trusses to minimize cost and environmental impact. XLII Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering and III Pan-American Congress on Computational Mechanics, Rio de Janeiro, November.
- Liu, B.; Liu, Y.; Jiang, L. and Wang, K. (2020). Flexural behavior of concrete-filled rectangular steel tubular composite truss beams in the negative moment region. *Engineering Structures*, v. 216.
- Martins, J.D.; Pereira Jr, S.E.; Xavier, E.M.; Neiva, L.H.A. and Sarmanho, A.M.C. (2021). Experimental and numerical analysis of composite steel and concrete trusses. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.*, v. 14, n. 2.
- Medeiros, G.F. and Kripka, M. (2014). Optimization of reinforced concrete columns according to different environmental impact assessment parameters. *Engineering Structures*, v. 59, p. 185-194.
- Muller, T.E. and Klashorst, E. (2017). A quantitative comparison between size, shape, topology and simultaneous optimization for truss structures. *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 14, n. 12, p. 2221-2242.



- Neal, S.; Johnson, R.; Lawson, R.M. and Mullett, D.L. (1992). Design of composite trusses. The Steel Construction Institute, Ascot, UK.
- Ozimboski, J.M.; Guarnieri, G.B.; Medeiros, G.F. e Kripka, M. (2019). Otimização dimensional, geométrica e topológica de treliças: validação experimental e por meio de estruturas de palito de picolé. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 11, n. 1, p. 57-67.
- Perez, R.E. and Behdinan, K. (2007). Particle Swarm Optimization in Structural Design. *Swarm Intelligence: Focus on Ant and Particle Swarm Optimization*, p. 373-394.
- REIDsteel Corporate. Composite Beam Bridges. Disponível em: <<https://www.steel-bridges.com/composite-beam-bridge.html>> Acesso em: 14/06/2022.
- Reynolds, C.W. (1987). Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model. *Computer Graphics*, v. 21, n. 4, p. 25-34.
- Santoro, J.F. and Kripka, M. (2020). Minimizing environmental impact from optimized sizing of reinforced concrete elements. *Computers and Concrete*, v. 25, n. 2, p. 111-118.
- Silva, A.O.B.; Pinto JR, N.O. and Requena, J.A.V. (2013) Composite hollow truss with multiple Vierendeel panels. *Revista Escola de Minas*, v. 66, n. 4, p. 431-438.
- Tarabay, M.A.K. e Lima, L.S. (2022). Otimização topológica, geométrica e dimensional de estrutural metálicas treliçadas, dimensionadas conforme a norma ABNT NBR 8800:2008. *Revista da Estrutura de Aço*, v. 11, n. 1, p. 21-38.
- Tormen, A.F.; Pravia, Z.M.C.; Ramires, F.B. and Kripka, M. (2020). Optimization of steel concrete composite beams considering cost and environmental impact. *Steel and Composite Structures*, v. 34, n. 3, p. 409-421.
- Trindade, L.G.C.; Fernandes, G.R. e Bertolino Jr, R. (2017). Análise estrutural de vigas mistas treliçadas do tipo *steel-joist Warren* modificada. *Revista Matéria*, v. 22, n. 3.
- Vieira, A.A. (2014). Redução do impacto ambiental das estruturas em concreto pré-moldado através de otimização por algoritmo genético. M.Sc. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos, BRA.
- Worldsteel Association. LCI data for steel products. Pittsburgh, 2017.
- Yepes, V.; Martí, J.V. and García-Segura, T. (2015). Cost and CO₂ emission optimization of precast-prestressed concrete U-beam road bridges by a hybrid glowworm swarm algorithm. *Automation in Construction*, v. 49, p. 123-134.