

FLUXO DE TRABALHO AUTOMATIZADO PARA OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

AUTOMATED WORKFLOW FOR MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

Caio Liberato Calixto¹, Giuseppe Miceli Junior¹, Paulo Cesar Pellanda¹

RESUMO:

Tem-se empregado o Building Information Modeling (BIM) em conjunto com modernas ferramentas computacionais na automatização de processos envolvidos na elaboração de projetos. Uma das atividades facilitadas pelos recursos citados é a busca por soluções otimizadas em diversos aspectos de uma construção. Este artigo objetiva propor um fluxo de trabalho que auxilie projetistas nas definições das seções transversal de vigas e da resistência característica à compressão do concreto (Fck). A presente abordagem utiliza um modelo BIM para extrair informações geométricas de um edifício e realizar análise estrutural através do software Robot Structural Analysis. Com auxílio da Application Programming Interface (API) fornecida por este software, foi implementado um algoritmo genético multiobjetivo para obtenção de estruturas otimizadas do ponto de vista financeiro e ambiental. A aplicação do fluxo de trabalho, no modelo da construção avaliado, proporcionou a escolha de configurações estruturais otimizadas dentro do espaço de projeto, com de reduções de 12,2% do custo e 13,7% do potencial de aquecimento global.

PALAVRAS-CHAVE: projeto estrutural; BIM; algoritmo genético; sustentabilidade.

ABSTRACT:

Building Information Modeling (BIM) has been employed along with modern computing tools to automate design processes. The search for optimized solutions in various aspects of construction is one of the activities facilitated using the aforementioned technologies. This article aims to propose a workflow that assists designers in choosing cross sections of beams as well as determining the characteristic strength of concrete. This approach extracts geometric information of a building from BIM models and uses Robot Structure Analysis software to perform structural analysis. With the utilization of the Application Programming Interface (API) provided by this software, a multi-objective genetic algorithm was implemented to obtain financially and environmentally optimized structures. The results showed that the use of the proposed workflow, in the building model assessed, enabled the choice of optimized structural configurations within the design space reducing by 12,2% the cost and 13,7% the global warming potential.

KEYWORDS: structural design; BIM; genetic algorithm; sustainability

¹Instituto Militar de Engenharia

Fonte de Financiamento: não houve

Conflito de Interesse:
Não há conflito de interesses

Submetido em: 10/12/2021
Aceito em: 20/06/2022

How to cite this article:

CALIXTO, C.L.; MICELI JUNIOR, G.; PELLANDA, P.C. Fluxo de Trabalho Automatizado para Otimização Multiobjetivo de Vigas de Concreto Armado. *Gestão & Tecnologia de Projetos*. São Carlos, v17, n2, 2022. <https://doi.org/10.11606/gtp.v17i2.193351>



INTRODUÇÃO

A tecnologia BIM se desenvolveu rapidamente nos últimos anos e tem sido amplamente aplicada em muitos projetos de construção, provando que benefícios podem ser alcançados com seu uso (SUN et al., 2017). O significado atribuído ao conceito BIM tem evoluído ao longo do tempo. Gaspar (2019) categoriza as definições de BIM em três grupos distintos de acordo com o seu enfoque que podem ser os modelos, processos ou sistemas. Eastman et al. (2014) tratam o BIM como uma tecnologia de modelagem e um conjunto associado de processos para produzir, comunicar e analisar modelos de construção.

Quanto à utilização do BIM, os usos de modelo são definidos como os entregáveis de um projeto que são planejados ou esperados (SUCCAR; SALEEB; SHER, 2016). Os produtos dos usos do modelo são resultados da geração, colaboração ou vinculação a bancos de dados externos e, dessa forma, representam a interação entre um usuário e um sistema de modelagem (BIM DICTIONARY, 2022). Entre os usos de modelo listados por Succar, Saleeb e Sher (2016), pode-se citar a Análise de Sustentabilidade que possui a finalidade de utilizar um modelo tridimensional para calcular impactos ambientais de uma nova edificação ou ainda de benfeitorias já existentes.

No que tange à sustentabilidade, Chi, Wang e Jiao (2015) afirmam que o BIM proporcionará, cada vez mais, otimizações de projetos, ainda nas fases iniciais, com uso de variáveis relacionadas a aspectos ambientais. Isso ocorre, sobretudo, pelo alto impacto ao meio ambiente atribuídos às construções, que são responsáveis por 38% de todas as emissões mundiais de CO₂ relacionadas à energia (UNEP, 2020). O concreto, material de construção mais empregado no mundo (GAGG, 2014), é responsável por grande quantidade de emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE), com destaque para a produção de cimento, que representa 7% de todas as emissões produzidas pelo setor industrial no mundo (IEA, 2018).

Diante desse cenário, diversas técnicas vêm sendo desenvolvidas para mensurar os impactos ambientais das construções (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013). Entre elas, pode-se citar a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) normatizada, no Brasil, pela NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e pela NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b). Com a possibilidade de quantificar a sustentabilidade de edificações, é possível comparar diferentes soluções de projeto e, assim, buscar a minimização dos efeitos danosos do ambiente construído, através de métodos de otimização.

Os métodos de otimização têm a finalidade de encontrar pontos de máximo ou mínimo em funções pré-estabelecidas, sujeitas ou não a um conjunto de restrições (RIGO, 1999). Dessa forma, esses métodos, em problemas de engenharia, são explorados para buscar melhores soluções de projetos (OLIVEIRA, 2017). Afzal et al. (2020) realizaram uma revisão bibliográfica e constataram que, em projetos de estruturas, os objetivos de otimizações mais estudados são as minimizações de custos e de impactos ambientais. Quanto ao método de otimização, os algoritmos genéticos são as técnicas mais utilizadas.

O propósito deste trabalho é a elaboração de um fluxo de trabalho que permita a otimização, por intermédio de um algoritmo genético multiobjetivo, de vigas de concreto armado, nas fases iniciais de projeto. A interação entre o modelo da construção (*BIM Model*) e a ferramenta de otimização será possibilitada pela Application Programming Interface (API) fornecida por um software de análise estrutural. O objetivo da otimização é a minimização simultânea dos custos de vigas e do seu potencial de impacto global (PAG).

REFERENCIAL TEÓRICO

A concepção estrutural consiste na escolha das características dos elementos que suportarão os esforços aplicados na edificação (PINHEIRO, 2007). Entre os fatores que caracterizam a estrutura, pode-se citar as seções transversais dos elementos e seus posicionamentos, os materiais utilizados etc. Assim, são diversas as decisões a serem tomadas pelos projetistas no momento de idealizar uma estrutura.

No estudo realizado por Tafraout et al. (2019), foi implementado um algoritmo genético para otimizar o posicionamento e as dimensões de pilares parede, em edifícios. Ainda nas fases iniciais de projeto, Eleftheriadis, Duffour e Mumovic (2018) exploraram os efeitos no custo e no impacto ambiental de construções ao variar as dimensões e os posicionamentos dos pilares. Para isso, foi desenvolvido um framework que propõe a execução do algoritmo NSGA-II com o software Autodesk Robot Structural Analysis (RSA), através de sua API.

Oliveira (2017) também empregou o RSA juntamente com algoritmos de otimização multiobjetivo para otimizar estruturas, dimensionada através da norma Eurocode 2 (CEN, 2004). Nesse estudo, os objetivos foram maximizar a performance estrutural de edifícios e minimizar os custos. As seções transversais dos elementos estruturais e o posicionamento dos pilares foram as variáveis de projeto. O parâmetro escolhido para mensurar a performance estrutural foi o deslocamento dos elementos estruturais.

As definições das seções transversais de elementos estruturais também foram estudadas por Shao e Zhang (2018) que utilizaram o software de elementos finitos ANSYS, que realizou a análise estrutural e verificar os esforços da estrutura, e um algoritmo genético para minimizar o custo de uma estrutura de concreto. Para evitar soluções com deformações excessivas, uma função de penalização foi implementada. Bagautdinov et al. (2018) definiram um problema de otimização similar, no entanto com perfis metálicos.

Dzwierzynska e Prokopska (2018) utilizaram o conceito de projeto paramétrico para obter possibilidades distintas de projetos de coberturas. O modelo BIM foi parametrizado com auxílio do software Rhinoceros e a otimização multiobjetivo foi realizada no Galapagos. Os autores escolheram como variáveis de projeto características que definem o layout da cobertura, como altura, área e o formato da superfície. Hollberg e Ruth (2016) também empregaram o Rhinoceros para modelar estruturas. Por utilizar um modelo da construção parametrizado, foi possível minimizar o impacto ambiental utilizando os materiais empregados como variável de projeto.

Bianconi, Filippucci e Buffi (2019) abordaram a sustentabilidade através da eficiência energética das construções. Com um algoritmo genético multiobjetivo, estes autores minimizaram o consumo de energia e o custo de edificações com estrutura de madeira. Para isso, utilizaram os softwares Dynamo e EnergyPlus. Fonseca et al. (2016) também empregaram ferramentas de programação visual e simulação energética para encontrar soluções de projeto com custo reduzido e que apresentassem eficientes desempenhos térmico. Diao, Kato e Hiyama (2011) realizaram um estudo que abordou a eficiência energética de uma construção, no entanto analisando diferentes soluções estruturais para minimizar a necessidade de energia empregada na climatização.

Além dos estudos já mencionados, com foco nas fases iniciais de projeto, deve-se mencionar os autores que abordaram o detalhamento da armadura como variável de projeto em otimizações de estruturas com uso do BIM. Mangal e Cheng (2018) apresentaram um processo de otimização envolvendo múltiplas ferramentas. Devido à interoperabilidade facilitada pelo BIM, as informações iniciais de modelo da construção foram exportadas do Revit ao RSA para obtenção dos esforços solicitantes. Dessa forma, com o auxílio de um algoritmo genético

híbrido, foi realizada a otimização para obter um detalhamento com menor consumo de aço em um pórtico de concreto armado.

Liu J. et al. (2020) propuseram um sistema de aprendizagem por reforço multiagente que, com uso de um modelo estrutural modelado no Revit, minimizou a quantidade de interferência entre barras de aço, no detalhamento de armadura de concreto armado. Para isso, os autores utilizaram o framework proposto por Mangal e Cheng (2018) para obter informações através de um modelo digital da construção.

Os resíduos da construção relativos às barras de aço foram abordados por alguns autores que realizaram a formulação do Problema do Corte de Estoque (PCE) para minimizar perdas de material no detalhamento. Porwal e Hewage (2012) fizeram uso de um modelo BIM e do algoritmo de recozimento simulado para extrair informações dos comprimentos das barras de aço e minimizar o percentual de desperdício. Os autores ainda compararam os resultados da otimização ao empregar dois tipos diferentes de barras comerciais (12 e 6 metros).

Khondoker (2021) também abordou o uso da metodologia BIM e uma formulação matemática do PCE para minimizar o consumo de barras de aço, em pórticos planos, no entanto, utilizando técnicas de programação linear inteira mista. Lee et al (2020) propuseram um algoritmo para minimização do desperdício por corte obtendo reduções de 6% do aço empregado e reduzindo as emissões de CO₂ em 3,93%.

Nadoushani et al. (2018) aproveitaram flexibilizações de normas de elaboração de projeto de estruturas de concreto armado, sobretudo no que tange ao posicionamento das emendas de barras de aço, para variar sutilmente o detalhamento de armação de aço. Dessa forma, obtiveram soluções que minimizassem perdas por corte em paredes de cisalhamento a partir de um modelo BIM. O software Matlab foi empregado para gerar padrões de corte com a flexibilização permitida por norma e técnicas de programação linear inteira para minimizar as perdas.

Alguns autores ainda buscaram otimizar o planejamento da construção de estruturas. Wang, Yuan e Sun (2018) associaram um modelo BIM de estruturas de concreto pré-moldado a um algoritmo genético aperfeiçoado para estudar o planejamento de montagem e otimização de edifícios. Liu D. et al (2020) também estudaram a otimização do planejamento de construções em estruturas de concreto pré-moldado em um modelo BIM 4D para minimizar os custos de transporte e estocagem de elementos pré-moldados.

A partir dos trabalhos estudados, verifica-se uma tendência do uso de algoritmos genéticos como método de otimização juntamente com a metodologia BIM, em projetos estruturais. Além disso, apesar da sustentabilidade ter sido abordada por uma parte dos autores estudados, o custo foi o objetivo mais buscado nas otimizações. Quanto as variáveis de projeto, observou-se uma grande variedade de parâmetros estudados. No entanto não foram encontrados trabalhos que utilizassem a resistência característica à compressão do concreto (Fck) como variável de projeto na otimização. Por esse motivo, optou-se por analisar esse parâmetro da estrutura, neste artigo. O Quadro 1 resume as informações apresentadas nesta revisão.

Em relação aos estudos que empregaram o RSA como software de análise estrutural (OLIVEIRA, 2017; TAFRAOUT et al., 2018; ELEFTHERIADIS; DUFFOUR; MUMOVIC, 2018), este trabalho se diferencia, além das variáveis de projeto já mencionadas, por implementar, através de códigos de programação, a verificação de erros de dimensionamento de vigas de concreto, de acordo as regras da NBR 6118/2014 (ABNT, 2014). Este procedimento foi realizado para evitar uma limitação do software, que não possui normas brasileiras em suas configurações. Dessa forma, o RSA foi empregado somente para realizar a análise estrutural, ou seja, a determinação dos esforços solicitantes na estrutura da edificação.

| | | Objetivos da otimização | | | |
|----------------------|--------------------------|---|--|--|---|
| | | Custo | Sustentabilidade | Construtibilidade | Eficiência estrutural |
| Variáveis de Projeto | Tipo de estrutura | Diao, Kato e Hiyama (2011) | Hollberg e Ruth (2016); Diao, Kato e Hiyama (2011) | | |
| | Detalhamento da armadura | Mangal e Cheng (2018); Eleftheriadis, Duffour e Mumovic (2018); Nadoushani et al. (2018) | Khondoker (2021); Eleftheriadis, Duffour e Mumovic (2018); Porwal e Hewage (2012); Lee et al. (2020) | Liu, J. et al. (2020) | |
| | Posição dos elementos | Bianconi, Filippucci e Buffi (2019); Tafraout et al. (2019); Eleftheriadis, Duffour e Mumovic (2018); Oliveira (2017) | Bianconi, Filippucci e Buffi (2019); Eleftheriadis, Duffour e Mumovic (2018) | | Tafraout et al. (2019); Oliveira (2017) |
| | Dimensão dos elementos | Tafraout et al. (2019); Bagautdinov et al. (2018); Shao e Zhang (2018); Eleftheriadis, Duffour e Mumovic (2018); Oliveira (2017); Fonseca et al. (2017) | Eleftheriadis, Duffour e Movi (2018); Fonseca et al. (2017) | | Tafraout et al. (2019); Oliveira (2017) |
| | Layout | Bianconi, Filippucci e Buffi (2019); Dzwierzynska e Prokopska (2018); Fonseca et al. (2017); Diao, Kato e Hiyama (2011) | Bianconi, Filippucci e Buffi (2019); Fonseca et al. (2017); Diao, Kato e Hiyama (2011) | | |
| | Cronograma | Liu, D. et al. (2020) | | Liu, D. et al. (2020); Wang, Yuan e Sun (2018) | |
| | Fck | | | | |

Quadro 1. Categorização dos trabalhos estudados.

Fonte: autor.

MÉTODO DE PESQUISA

O fluxo de trabalho a ser desenvolvido pode ser entendido como uma sequência de atividades executadas para realizar um processo. Isso motivou o uso do método de pesquisa Design Science Research (DSR). Dresch, Lacerda e Antunes Junior (2015) distinguem esse método dos demais pelo seu objetivo de produzir sistemas que ainda não existem. Para atingir esta finalidade, a DSR é empregada no desenvolvimento artefatos, descritos por Simon (1996) como uma interface entre um ambiente interno, que representa a organização do artefato em si, e outro externo no qual está inserido.

Para a condução deste método, foram seguidas, parcialmente, as etapas sugeridas por Dresch, Lacerda e Antunes Junior (2015), no desenvolvimento desta pesquisa:

- Identificação do problema;
- Revisão bibliográfica e conscientização do problema;
- Projeto e desenvolvimento do artefato;
- Avaliação do artefato;
- Explicitação dos resultados;
- Conclusões;
- Comunicação dos resultados.

As duas primeiras etapas já foram apresentadas nas seções anteriores deste artigo. A identificação do problema foi realizada na Introdução, onde foi observada a necessidade de construções mais sustentáveis mantendo a viabilidade financeira das edificações. No Referencial Teórico, a revisão bibliográfica foi elaborada com uma análise sobre estudos relacionados à aplicação de técnicas de otimização em estruturas, com uso da metodologia BIM.

O projeto e desenvolvimento do artefato (nesta pesquisa, o fluxo de trabalho) serão realizados com a descrição de todas as etapas do processo proposto e a formulação do algoritmo genético que executará a otimização. A seguir, as características do modelo de avaliação escolhido serão detalhadas e os resultados da sua otimização, discutidos. Finalmente, as conclusões sobre o estudo, assim como suas limitações, serão apresentadas na última seção deste artigo.

DESENVOLVIMENTO DO FLUXO DE TRABALHO

O fluxo de trabalho proposto para realização da otimização será apresentado nesta seção, conforme ilustra a Figura 1. As variáveis de projeto estudadas serão as seções transversais das vigas e a resistência característica à compressão do concreto empregado. As funções objetivo (FO) da otimização serão minimizar, simultaneamente, o custo total das vigas (FO1) e o potencial de aquecimento global (PAG) (FO2), quantificado pela unidade Kg CO₂-eq.

O processo inicia com a criação de um modelo estrutural. Essa primeira etapa tem como entrada um modelo arquitetônico, previamente desenvolvido. Um arquivo, no formato livre IFC (Industry Foundation Class), pode ser importado para o RSA para criação de um modelo estrutural. Em seguida, o projetista deve delimitar o espaço de projeto contendo todas as possibilidades que as variáveis podem assumir. Por fim, o algoritmo genético NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II) será empregado para gerar um conjunto de soluções otimizadas. A seguir, essas etapas serão detalhadas.

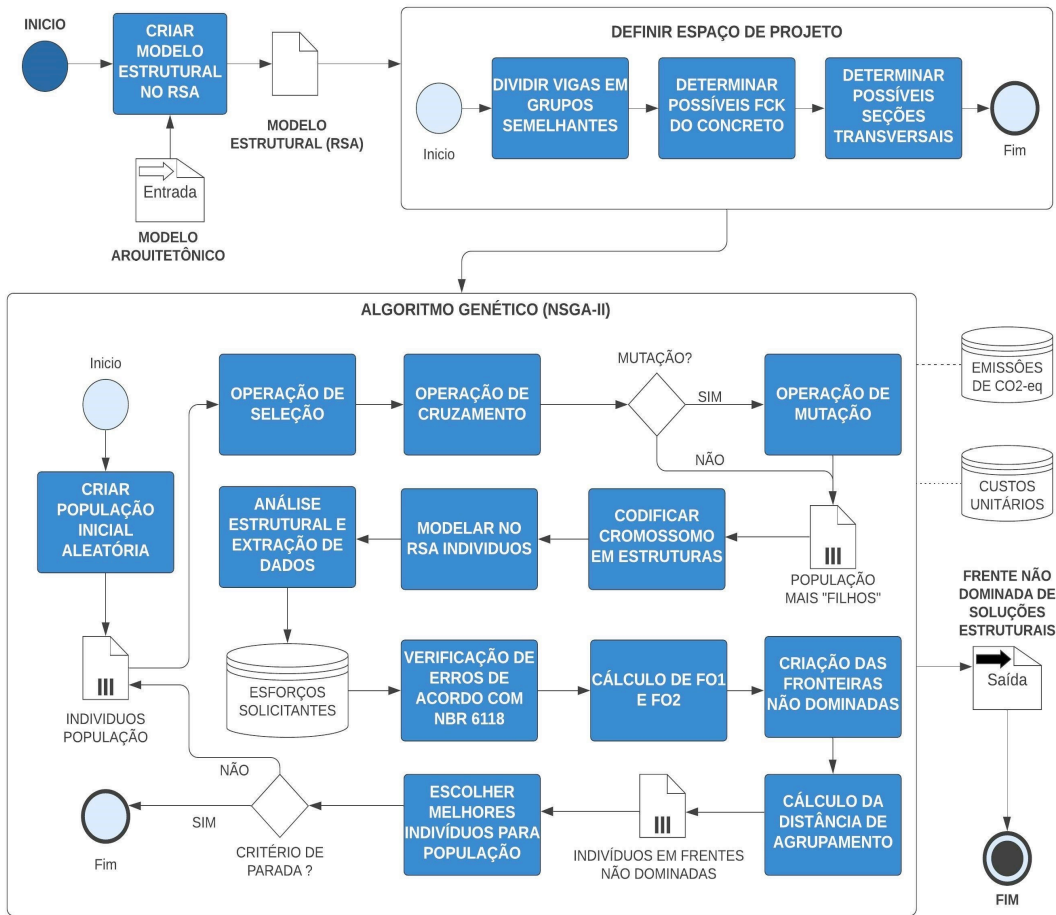


Figura 1. Fluxo de trabalho proposto para otimização multiobjetivo.

Fonte: autor.

MODELO ESTRUTURAL

Para iniciar a concepção estrutural, deve-se ter, como ponto de partida, o layout e restrições impostas pela arquitetura da construção. Essas informações podem ser compartilhadas, em um projeto, através do arquivo IFC, elaborado previamente. Ao criar o modelo estrutural, o projetista deve alimentá-lo com as cargas atuantes na estrutura. No Brasil, a NBR 6120/2019 (ABNT, 2019) determina os valores de carregamentos pelo tipo de edificação e material empregado. Além disso, a NBR 6123/1988 (ABNT, 1988) estabelece um processo para determinação das cargas de vento. As combinações de todas as cargas podem ser calculadas pelos coeficientes listados na NBR 6118/2014 (ABNT, 2014).

No entanto, somente esses dados não são suficientes para determinar os esforços solicitantes na estrutura pois as dimensões das seções transversais das vigas e a classe de concreto empregada têm influência na análise estrutural. Como essas duas características serão variadas, ao longo do processo de otimização, é necessária a utilização de uma ferramenta que possibilite a alteração automática das características da estrutura e o cálculo dos seus esforços solicitantes.

Esse fato justificou o uso do RSA no fluxo de trabalho, por possuir uma API que permite o acesso ao banco de dados do modo estrutural. Isso foi explorado por alguns autores (OLIVEIRA, 2017; TAFRAOUT et al., 2018; ELEFTherIADIS; DUFFOUR; MUMOVIC, 2018) que empregaram o RSA para realizar tarefas repetitivas em otimizações de estruturas. Dessa forma, os valores dos

esforços podem ser acessados através de códigos de programação e serem utilizados posteriormente para o dimensionamento e conferências de restrições estabelecidas pela NBR 6118/2014 (ABNT, 2014).

DEFINIÇÃO DO ESPAÇO DE PROJETO

Na fase de concepção estrutural, o projetista estabelece dimensões iniciais para os elementos que compõem a estrutura e realiza verificações para atender à norma brasileira de concreto armado (ABNT, 2014). Essa escolha é realizada, normalmente, pela experiência prévia do projetista ou por estimativas de pré-dimensionamento. A dificuldade dessa etapa da elaboração do projeto se dá pelo número elevado de combinações possíveis, tornando complexa a tarefa de buscar soluções otimizadas, sem métodos adequados.

Além dos aspectos relativos à economia de material e à sustentabilidade, o projetista deve ter atenção para a construtibilidade, definida pela Construction and Building Authority (BCA) como o grau de facilidade que um projeto pode promover à execução de uma obra (BCA, 2017). Por esse motivo, é comum a repetição das características geométricas ao longo da estrutura para facilitar a montagem e aproveitamento de formas de madeira, por exemplo.

Com o uso do RSA e a implementação de rotinas computacionais que realizem o dimensionamento e detalhamento, o fluxo de trabalho proposto deve proporcionar a automatização das verificações ao longo do algoritmo genético. No entanto, previamente, devem ser estabelecidas possibilidades ou intervalos aos quais as variáveis de projeto estarão limitadas. O conjunto de todas as soluções estruturais, que podem ser originadas com os valores das variáveis de projeto, é chamado de Espaço de Projeto (EP).

Dessa forma, pretende-se limitar o EP para que o algoritmo tenha um tempo de execução viável. Caso essa limitação não fosse realizada, seria necessário permitir que as variáveis assumissem quaisquer valores, o que demandaria um custo computacional mais elevado.

Assim, neste fluxo de trabalho, é proposto que o projetista evite a tarefa repetitiva e propensa a erros (ELEFTHERIADIS et al., 2018) de verificar se diferentes configurações estruturais atendem à NBR 6118/2014 (ABNT, 2014). Sua tarefa, ainda indispensável para elaboração do projeto, seria determinar o EP mantendo o nível de construtibilidade aceitável e respeitando as restrições arquitetônicas.

ALGORITMO GENÉTICO IMPLEMENTADO

O NSGA-II, desenvolvido por Deb et al. (2002), utilizado para a otimização neste estudo foi implementado na linguagem de programação C# por intermédio do ambiente de desenvolvimento integrado Visual Studio 2019. O pseudocódigo do algoritmo está representado na Figura 2, em que as entradas N , g e $f_k(\bar{X})$ são, respectivamente, a quantidade de indivíduos na população P , o número de gerações e a formulação da k -ésima função objetivo relativa a um indivíduo \bar{X} . Os conjuntos Q e R são populações auxiliares, criadas ao longo do algoritmo, e representam, respectivamente, a população de filhos e a união entre a população de pais e filhos, em uma geração i , menor do que g . Finalmente, F_i constitui os conjuntos de fronteiras com soluções não dominadas da população, na geração i .

Entradas: N , g e $f_k(\bar{X})$

```

1: Início
2:   Inicializa aleatoriamente a população  $P_0$  de tamanho  $N$ ;
3:   Avalia as funções-objetivo  $f_k$  dos indivíduos de  $P_0$ ;
4:   Atribui um rank para os indivíduos de  $P_0$ ;
5:   Gera a população filho  $Q_0$ ;
6:     Seleção por torneio;
7:     Cruzamento e mutação;
8:     Calcula os valores das funções-objetivo  $f_k$  dos indivíduos criados;
9:   for  $i = 1$  até  $g$  do
10:     $R_i = P_i + Q_i$ ;
11:    for each  $\bar{X} \in R_i$  do
12:      Atribui um rank para  $\bar{X}$ ;
13:    end for
14:    Gera as fronteiras de soluções não-dominadas ( $F_i$ ) de acordo com o rank de cada solução;
15:    Calcula o crowding distance para cada solução de  $F_i$ ;
16:    População  $P_{i+1}$  com as soluções das melhores fronteiras  $F$ ;
17:    Cria a nova geração  $Q_{i+1}$ ;
18:      Seleção por torneio binário;
19:      Cruzamento e mutação;
20:      Calcula os valores das funções-objetivo  $f_k$  dos indivíduos criados;
21:    end for
22: Fim

```

Figura 2.
Pseudocódigo do
NSGA-II.

Fonte: Ribeiro (2019)

A avaliação de cada indivíduo, através dos dois objetivos já mencionados, se inicia com a quantificação dos materiais necessários para construção das vigas de concreto armado (volume de concreto, área de formas e massa de aço). Para calcular a primeira função objetivo (FO1), cada quantidade de material é multiplicada pelo seu respectivo custo unitário, obtido diretamente do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos Índices da Construção Civil (SINAPI). A segunda função objetivo (FO2) foi calculada multiplicando as mesmas quantidades de materiais pelos seus respectivos PAG, na unidade Kg CO₂-eq.

A formulação do algoritmo genético, com possibilidades das variáveis de projeto pré-definidas pelo projetista, pode gerar indivíduos (possíveis soluções) que não respeitem às determinações da norma brasileira de concreto armado. Por esse motivo, é necessário penalizar esses indivíduos por representarem estruturas inválidas, do ponto de vista normativo. Essa penalização foi implementada através de uma função de penalização de ambas as funções objetivo.

Dessa forma, o problema de otimização restrito (pelas limitações de norma) pôde ser tratado como irrestrito (GARCIA, 2014). Nesse estudo, uma adaptação da função de penalização proposta por Bazaraa, Sherali e Shetty (2013) foi utilizada. Os erros de dimensionamento, são identificados ao longo do algoritmo genético. Essa conferência foi implementada na ferramenta computacional desenvolvida para verificar as restrições de normas. As FO1 e FO2, com as penalizações estão descritas nas Equações 1 e 2.

$$FO1 = \left[V_c \times Unit_c + A_f \times Unit_f + \sum_{i=1}^n (M_i \times Unit_i) \right] \times (1 + k \times h^p) \quad (1)$$

$$FO2 = \left[V_c \times E_c + A_f \times E_f + \sum_{i=1}^n (M_i \times E_i) \right] \times (1 + k \times h^p) \quad (2)$$

onde: n quantidade de diferentes bitolas, V_c , A_f e M_i são, respectivamente, o volume de concreto empregado, a área de forma e a massa de aço da bitola i . $Unit_c$, $Unit_f$ e $Unit_i$ são os custos unitários da concretagem, produção de formas de madeira e armação com barras de aço da bitola i . As emissões de CO₂-eq dos serviços de concretagem, formas de madeira e armação com aço da bitola i são representadas, respectivamente, por E_c , E_f e E_i . Por fim, k e p são os parâmetros da função de penalização proposta por Bazaraa, Sherali e Shetty (2013) e h é a quantidade de vigas que apresenta erros de dimensionamento.

Os erros de dimensionamento, em cada viga, são identificados ao longo da execução do AG. Essa conferência foi implementada na ferramenta computacional desenvolvida para verificar as determinações de normas, resumidas no Quadro 2.

Quadro 2.
Penalizações
implementadas no
algoritmo.

Fonte: autor.

| Erros | Descrição | Item na NBR 6118/2014 |
|--------|--|-----------------------|
| Erro 1 | Compressão diagonal do concreto. Ocorre quando a força cortante solicitante de cálculo é maior do que a força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas do concreto. | item 17.4.2.2 |
| Erro 2 | Razão entre profundidade da linha neutra x e altura útil d da viga. Em concretos de até 50 MPa, a máxima relação x/d é 0,45 para garantir o adequado comportamento dúctil em vigas. | item 14.6.4.3 |
| Erro 3 | A norma brasileira limita a quantidade de aço utilizado em vigas de concreto armado. Para isso, a máxima área de aço (somando armadura de tração e compressão) permitida é 4% da área da seção transversal da viga. | item 17.3.5.2.4 |
| Erro 4 | Estado Limite de Deformação Excessiva. A norma limita os deslocamentos máximos que ocorrem nos elementos estruturais. Para aceitabilidade sensorial em razão da limitação visual, o valor máximo do deslocamento é de $l/250$, sendo l o vão. | item 13.3 |
| Erro 5 | Estado Limite de Abertura de Fissuras. A abertura máxima de fissuras depende da classe de agressividade ambiental. A limitação dos valores de fissuração tem a finalidade de proteger as armaduras contra agentes corrosivos. Para a Classe de Agressividade II, as fissuras devem ser limitadas a 0,3 mm. | item 17.3.3 |
| Erro 6 | O espaçamento lateral, medido entre as faces da armadura longitudinal, deve ser maior do que 20mm. Além disso, não deve ser menor do que 1,2 vezes o diâmetro máximo do agregado e deve permitir o uso de vibradores de imersão. | item 18.3.2.2 |
| Erro 7 | Para permitir que a armadura longitudinal possa ser calculada como concentrada em um ponto, a distância do centro de gravidade da armadura até a barra mais afastada deve ser menor que 10% do valor da altura da viga. | item 17.2.4.1 |

Em problemas de otimização multiobjetivo, uma solução A é dominada por outra B quando todas as FO de A são piores ou equivalente às de B, com pelo menos uma FO de A pior do que B. No caso específico desse trabalho, com duas funções de minimização, o conceito de

dominância pode ser observado através das fronteiras de soluções não dominadas representadas na Figura 3. Vale ressaltar que dentro de uma mesma fronteira, não é possível determinar qual solução é melhor do que a outra.

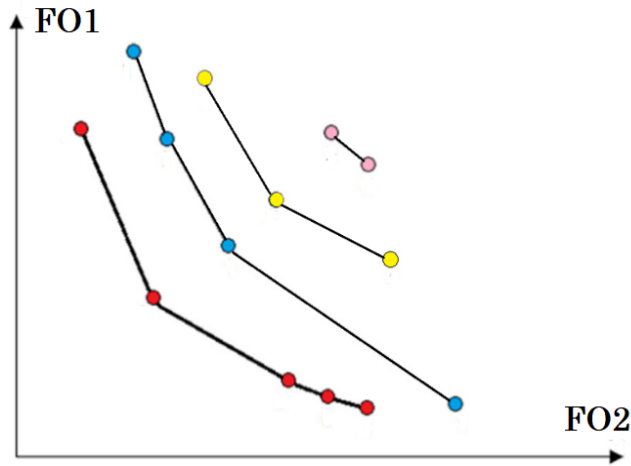


Figura 3. Representação das fronteiras de soluções não dominadas em um caso de otimização com duas funções objetivo de minimização.

Fonte: autor.

Na Figura 3, as soluções vermelhas não são dominadas por nenhuma outra solução do conjunto e constituem, portanto, a primeira fronteira de soluções não dominadas, chamada de Fronteira de Pareto. As demais fronteiras de soluções não dominadas estão representadas pelos outros conjuntos de cores. Ao final da execução do NSGA-II, a Fronteira de Pareto é o resultado da otimização. No fluxo de trabalho proposto, não faz parte do escopo a aplicação de técnicas que auxiliem a escolha da solução, dentro de uma mesma fronteira, sendo uma limitação do estudo. Essa escolha poderá ser feita pelo projetista com Método Multicritério de Apoio à Decisão, por exemplo.

BANCOS DE DADOS EXTERNOS PARA AVALIAÇÃO DAS SOLUÇÕES

A abordagem de avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) será a “berço ao portão”, ou seja, das etapas A1 até A5 do ciclo de vida das construções (Figura 4). Para avaliação das FO, bancos de dados que permitam calcular o custo e o PAG devem ser acessados. Os custos podem ser obtidos diretamente do SINAPI. No entanto, não existe um banco de dados brasileiro unificado para quantificar a sustentabilidade de serviços de engenharia. Por esse motivo, serão utilizados dados de avaliações do ciclo de vida (AICV) realizados por pesquisadores e declarações ambientais de produtos (DAP) fornecidas por produtores de matéria prima (Quadro 3).

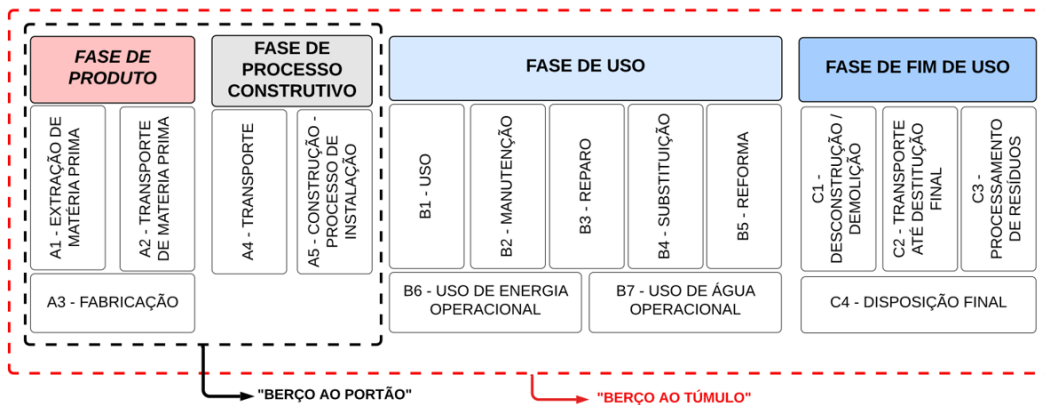


Figura 4. Etapas do ciclo de vida das edificações

Fonte: adaptado de BSI (2011).

Quadro 3. Fontes de dados para avaliação do impacto do ciclo de vida da construção de vigas na abordagem berço ao portão

Fonte: autor.

| Atividade | Etapa A1 | Etapa A2 | Etapa A3 | Etapa A4 | Etapa A5 |
|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| Concretagem | Silva et al. (2020) | Silva et al. (2020) | Silva et al. (2020) | Silva et al. (2020) | Silva et al. (2020) |
| Forma de madeira | Barrantes (2016) | Cálculo | Campos (2012) | Cálculo | Cálculo |
| Armação com barras de aço | Arcelormittal (2022) | Arcelormittal (2022) | Arcelormittal (2022) | Cálculo | Não há emissões |

Para realizar uma abordagem "berço ao portão", as etapas A2 e A4 (Transportes), referentes aos serviços de forma de madeira e armação devem ser calculadas uma vez que não são contempladas nas fontes consideradas. As emissões relativas a essas etapas serão calculadas através do consumo de óleo diesel de caminhões utilizados nos deslocamentos. Além disso, as emissões de equipamentos elétricos, consideradas nas composições do SINAPI, serão consideradas na etapa A5 do ciclo de vida da forma de madeira (Processo de Instalação).

Assim, pode-se resumir as emissões e CO₂-eq de cada serviço da construção de vigas de concreto armado pela Tabela 1.

Tabela 1. PAG dos serviços necessários para construção de vigas de concreto.

Fonte: autor.

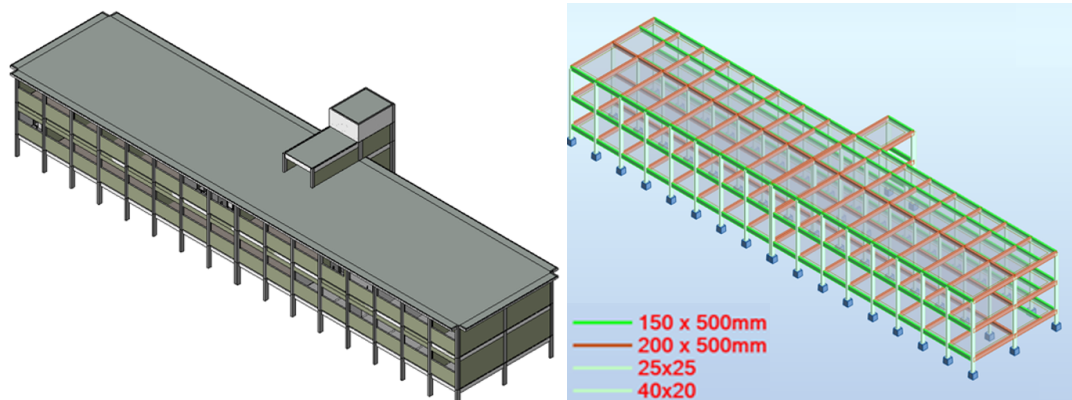
| Serviço | Unidade | PAG (Kg CO ₂ -eq) |
|------------------------|----------------|------------------------------|
| Concreto C25 | m ³ | 185 |
| Concreto C30 | m ³ | 205 |
| Concreto C35 | m ³ | 225 |
| Concreto C40 | m ³ | 260 |
| Armação com aço 6.3mm | Kg | 0,89 |
| Armação com aço 8.0mm | Kg | 0,92 |
| Armação com aço 10.0mm | Kg | 0,92 |
| Armação com aço 12.5mm | Kg | 0,92 |
| Armação com aço 16.0mm | Kg | 0,92 |
| Forma para viga | m ² | 3,49 |

MODELO DE AVALIAÇÃO E DETERMINAÇÃO DO ESPAÇO DE PROJETO

Um pavilhão de concreto armado, já construído em uma obra finalizada, com 3 pavimentos e uma área total de 1412,11 m² será utilizado para avaliar a eficiência do fluxo de trabalho desenvolvido. Na Figura 5, as características geométricas das vigas de concreto armado estão detalhadas, para possibilitar a comparação entre o projeto que foi construído e os resultados da otimização, que será realizada a seguir.

Figura 5. Modelo arquitetônico (esquerda) e modelo estrutural (direita) da construção.

Fonte: autor



Inicialmente, o modelo arquitetônico (Figura 5) foi importado para o RSA e o modelo estrutural foi desenvolvido após inserção das cargas atuantes, de acordo com a NBR 6120/2019 (ABNT, 2019) e NBR 6123/1988 (ABNT, 1988). Para definir o espaço de projeto, as vigas da estrutura foram dadas em 6 (seis) grupos, de acordo com o seu posicionamento na estrutura (Figura 6). Além disso, foram definidas 4 (quatro) opções de classes de concreto e 8 (oito) opções para as seções transversais dos grupos das vigas. Assim, o cromossomo com 20 (vinte) genes binários, que representa uma solução, e sua codificação podem ser exemplificados pela Figura 7.

Observa-se que os dois primeiros genes representam a resistência característica à compressão do concreto a ser empregado. Os demais genes se referem às seções transversais das vigas de concreto. Dessa forma, fica estabelecido um espaço de projeto com um total de 1.048.576 possibilidades de solução.

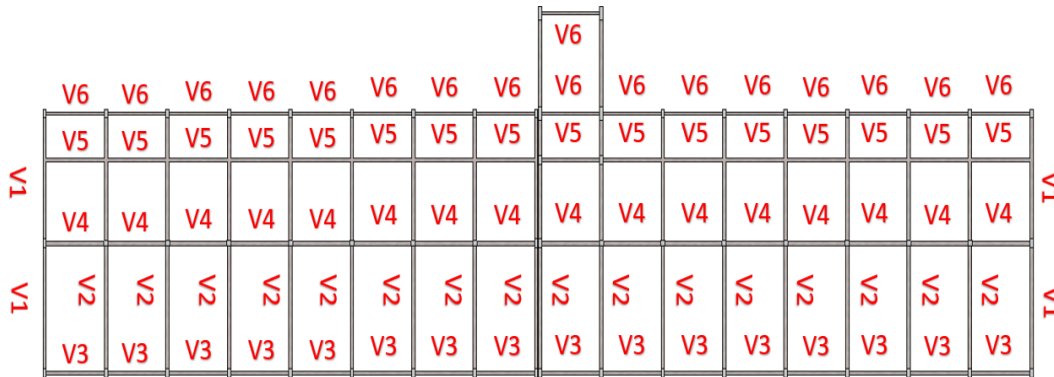


Figura 6. Divisão das vigas do pavimento tipo em diferentes grupos que terão mesma seção transversal.

Fonte: autor.

Decodificação do Fck da estrutura

| Gene 1 | Gene 2 | Fck |
|--------|--------|--------|
| 0 | 0 | 25 MPa |
| 0 | 1 | 30 MPa |
| 1 | 0 | 35 MPa |
| 1 | 1 | 40 MPa |

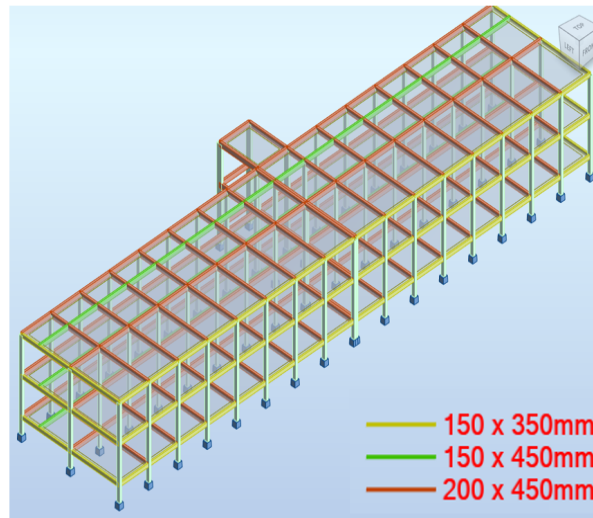
| Gene 1 | Gene 2 | Gene 3 | Gene 4 | Gene 5 | Gene 6 | Gene 7 | Gene 8 | Gene 9 | Gene 10 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Gene 11 | Gene 12 | Gene 13 | Gene 14 | Gene 15 | Gene 16 | Gene 17 | Gene 18 | Gene 19 | Gene 20 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |

Figura 7. Exemplificação do cromossomo representando uma solução estrutural e sua decodificação.

Fonte: autor.

Decodificação da seção transversal da viga do grupo n

| Gene 3 n | Gene 3 n + 1 | Gene 3 n + 1 | Seção (cm x cm) |
|----------|--------------|--------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 15 x 35 |
| 0 | 0 | 1 | 15 x 40 |
| 0 | 1 | 0 | 15 x 45 |
| 0 | 1 | 1 | 15 x 50 |
| 1 | 0 | 0 | 20 x 25 |
| 1 | 0 | 1 | 20 x 40 |
| 1 | 1 | 0 | 20 x 45 |
| 1 | 1 | 1 | 20 x 50 |



RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a execução do NSGA-II, as fronteiras de soluções não dominadas foram obtidas (Figura 8). Os três indivíduos da primeira fronteira (1, 2 e 3), destacados na Figura 8, representam a saída do fluxo de trabalho (Fronteira de Pareto).

A seguir, na Tabela 2, será apresentada a última geração do algoritmo genético. Os valores de resistência característica à compressão do concreto (Fck) estão na unidade megapascal (MPa) e as seções transversais das vigas estão com suas dimensões em centímetros (cm). Essas soluções representam a última geração do algoritmo genético sendo, portanto, as que melhores se adaptaram ao longo do processo de otimização.

Figura 8. Resultado da execução do algoritmo NSGA-II.

Fonte: autor.

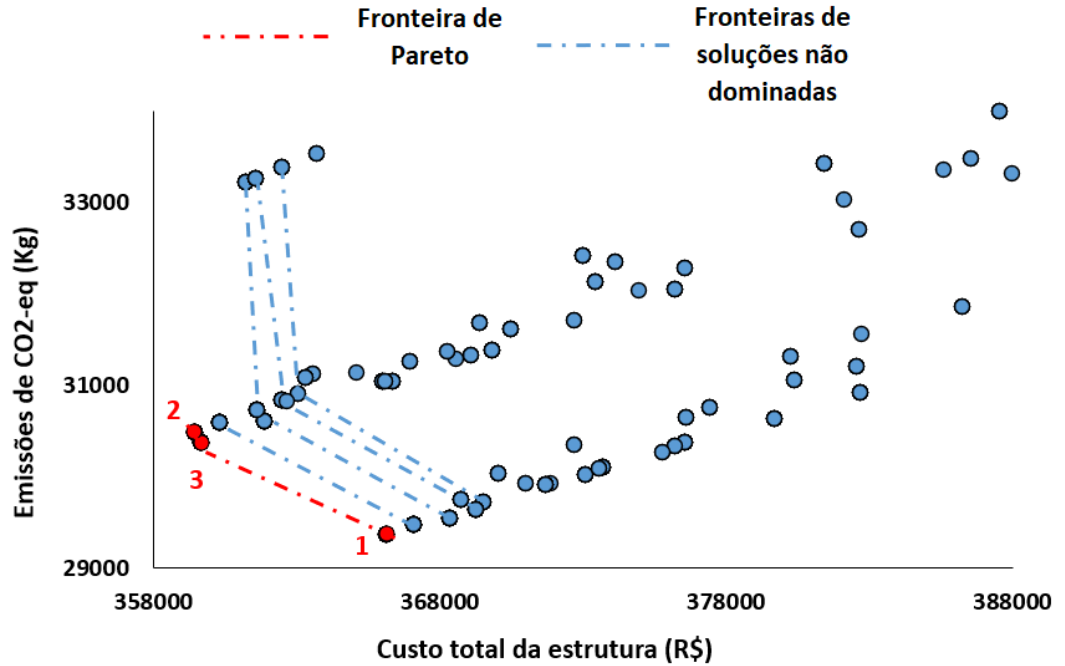


Tabela 2. Característica da estrutura dos indivíduos, na última geração do algoritmo genético.

Fonte: autor.

| Variável | Ind 1 | Ind 2 | Ind 3 | Ind 4 | Ind 5 | Ind 6 | Ind 7 | Ind 8 | Ind 9 | Ind 10 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Fck | 25 | 30 | 30 | 25 | 25 | 30 | 35 | 30 | 30 | 30 |
| V1 | 15x45 | 20x35 | 15x40 | 15x50 | 15x45 | 20x40 | 15x45 | 20x40 | 20x35 | 20x50 |
| V2 | 20x50 | 20x45 | 20x45 | 20x50 | 20x50 | 20x45 | 20x45 | 20x45 | 20x45 | 20x45 |
| V3 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 |
| V4 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 |
| V5 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 |
| V6 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 | 15x35 |

É importante destacar os parâmetros do algoritmo genético implementado. A população de cada evolução foi estabelecida com o número de 10 (dez) indivíduos. O critério de parada do algoritmo foi escolhido como número fixo de 100 evoluções. O percentual de 1% foi adotado como probabilidade da ocorrência de mutação, após o cruzamento dos indivíduos. O método de seleção empregado foi o torneio. Finalmente, o cruzamento foi configurado para ocorrer em um único ponto do cromossomo, sendo este aleatório.

Ao analisar as características das variáveis de projeto obtidas nas soluções da última geração do algoritmo genético, verifica-se que houve uma diversidade dos valores de resistência característica à compressão do concreto, entre os indivíduos. Isso ocorreu pois, mesmo que concretos mais resistentes tenham custos unitários mais elevados, eles proporcionam o dimensionamento com seções transversais de menor área, consumindo uma quantidade menor de material.

Além disso, é possível verificar que, em todas as soluções, independentemente da resistência característica à compressão do concreto, foi possível dimensionar a estrutura com a menor

seção possível do espaço de projeto para as vigas dos grupos V3, V4, V5 e V6. Isso pode indicar que a escolha do espaço de projeto poderia contemplar seções com áreas ainda menores o que proporcionaria ainda soluções mais otimizadas.

Apesar de ter sido possível encontrar uma fronteira não dominada de soluções, apresentando resultados mais favoráveis quando comparado a um projeto sem otimização, o fluxo de trabalho não permite determinar uma única estrutura. Isso deve ser feito pelo projetista com auxílio de ferramentas adicionais.

Além disso, a definição do espaço de projeto deve ser realizada de acordo com a experiência do projetista e uma avaliação sobre o nível de construtibilidade das possibilidades não é contemplado nesse estudo, sendo uma limitação. Nesse estudo, optou-se por dividir todas as vigas da estrutura em 6 (seis) grupos distintos de vigas, no entanto, não foi realizada uma avaliação quanto a viabilidade de realizar esse procedimento.

Comparando os resultados das soluções da Fronteira de Pareto com as dimensões do projeto construído (sem otimização), é possível concluir que houve uma economia financeira juntamente com a obtenção de soluções mais sustentáveis (Figura 9). A solução mais econômica (Ind 2) possui um custo 12,2% menor do que o projeto inicial e a mais sustentável (Ind 1) apresenta 13,7% de redução de emissões de GEE.

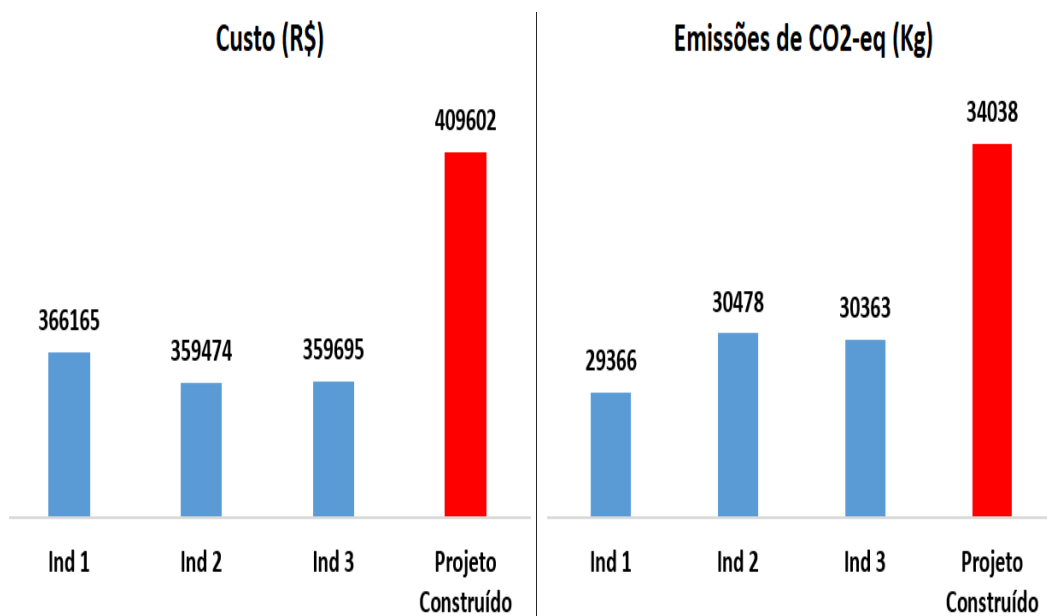


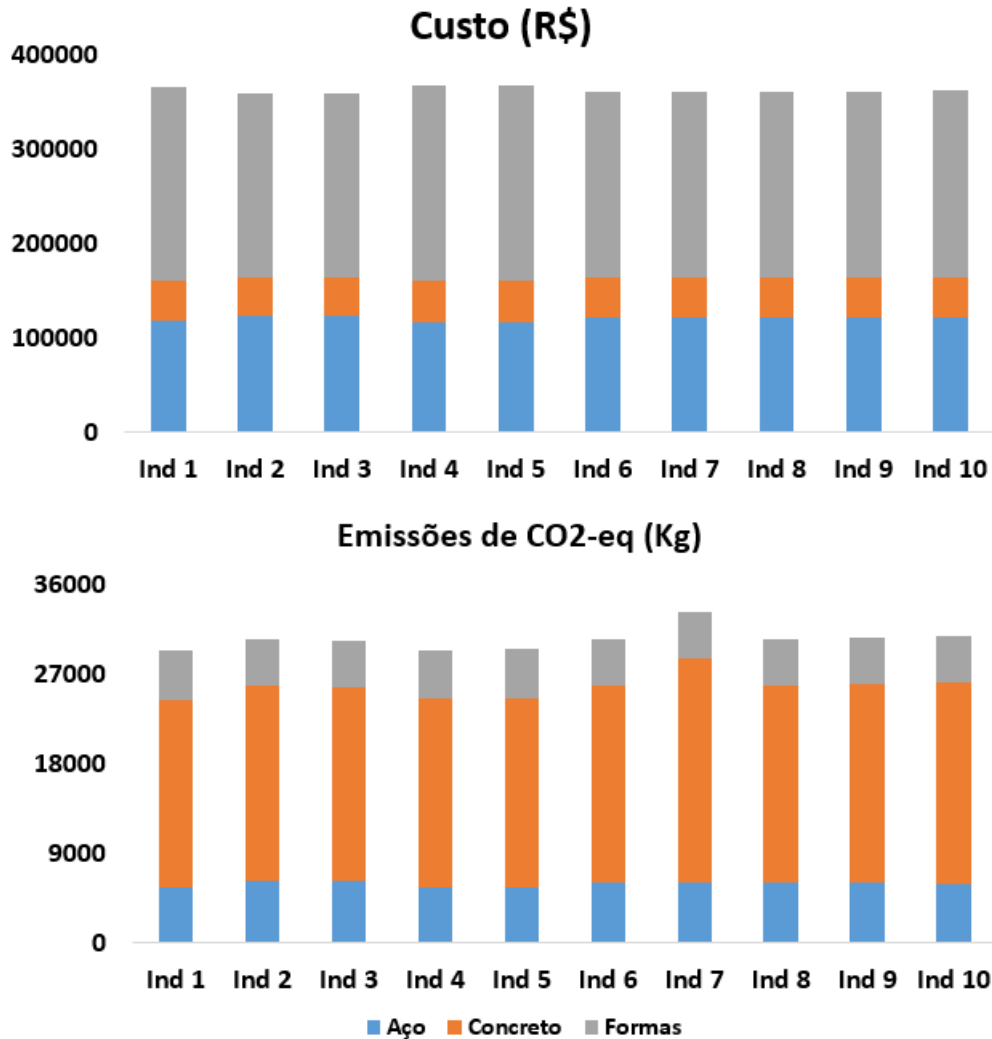
Figura 9. Comparação entre custos e emissões de CO2-eq do projeto inicial e das melhores soluções encontradas.

Fonte: autor.

Também foi observado que as formas de madeira representam o maior percentual dos custos das soluções da última geração do algoritmo, embora não contribuam da mesma forma para o PAG. Em contrapartida, a armação com barras de aço foi o serviço que mais contribuiu para as emissões de GEE (Figura 10).

Figura 10. Composição entre os custos e emissões de CO₂-eq das atividades da construção das vigas de concreto armado, na última geração do algoritmo genético.

Fonte: autor.



CONCLUSÃO

Esse estudo desenvolveu um fluxo de trabalho que realiza uma otimização, nas etapas iniciais do projeto, com objetivo de obter soluções estruturais mais econômicas e sustentáveis. Com uso da metodologia BIM, foi possível acessar o banco de dados de um modelo estrutural para obter as informações dos esforços solicitantes e dimensionar automaticamente as vigas de acordo com as especificações da NBR 6118:2014 (ABNT, 2014).

O uso de uma ferramenta BIM que oferece API permite alteração automática das características da estrutura para criação de novas soluções, ao longo do algoritmo genético. Sem esse recurso, não seria possível realizar o processo de forma automática, uma vez que os esforços de cada solução são diferentes, para as variáveis consideradas nesse estudo.

Para avaliar as diferentes soluções consideradas, foram consultados os custos unitários do SINAPI para quantificar o custo da estrutura. No entanto, a falta de um banco de dados equivalente para emissões de GEE demandou a pesquisa de trabalhos que já tivessem realizado AICV de serviços necessários para a construção de vigas de concreto.

Ao fim da otimização, foi possível obter soluções com reduções de 12,2% e 13,7% dos custos e do potencial de aquecimento global, respectivamente. Os resultados também mostraram que a

escolha por valores de resistência à compressão do concreto mais elevadas pode proporcionar estruturas mais esbeltas, com menor volume de material empregado. Esse fato compensa, em partes, o custo unitário mais elevado de concretos com classes superiores. Além disso, foi verificado que as formas de madeira foram os serviços que representam a maior parcela dos custos entre as melhores soluções. Por outro lado, a concretagem é a atividade que possui maior relevância para o potencial de aquecimento global.

No entanto, não foi possível determinar, com o processo proposto, se o nível de construtibilidade das soluções obtidas é aceitável, sendo uma limitação desse trabalho. Por fim, no exemplo estudado, constatou-se que a escolha do espaço de projeto pode influenciar no resultado da otimização. Portanto, fica evidente a importância da atuação do projetista, no fluxo de trabalho, ao delimitar as opções das variáveis de projeto de maneira adequada.

Referências Bibliográficas

AFZAL, M.; LIU, Y.; CHENG, J. C.; GAN, V. J. *Journal of Cleaner Production*, v. 260, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120623>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620306703>. Acesso em: 25 jan. 2022.

ARCELORMITTAL. **Declaração Ambiental de Produto (DAP)**. 2021. Acesso em: 2 ago. de 2021. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com/meio-ambiente/acos-longos/declaracao-ambiental-produto>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 66 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040**: Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044**: Gestão ambiental — avaliação do ciclo de vida — requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b. 46 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6120**: Ações para o cálculo de estrutura de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 60p.

BAGAUTDINOV, R.; MONASTIREVA, D.; BODAK, I.; POTAPOVA, I. Feasibility study tool for semi-rigid joints design of high-rise buildings steel structures. In: *EDP SCIENCES. E3S Web of Conferences*. [S.l.], 2018. v. 33, p. 02022. Disponível em: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/08/e3sconf_hrc2018_02022/e3sconf_hrc2018_02022.html. Acesso em: 25 jan. 2022.

BARRANTES, L. de S. **Avaliação do desempenho ambiental da produção de biomassa florestal com finalidade energética no Brasil: o caso de Itapeva**. 2016. Dissertação (Mestre em Engenharia) — Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2016.

BAZARAA, M. S.; SHERALI, H. D.; SHETTY, C. M. **Nonlinear programming**: theory and algorithms. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

BIANCONI, F.; FILIPPUCCI, M.; BUFFI, A. Automated design and modeling for mass-customized housing. A web-based design space catalog for timber structures. *Automation in construction*, v. 103, p. 13–25, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.002>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580518305302>. Acesso em: 25 jan. 2022.

BIM DICTIONARY. **Model Use (MU)**. Disponível em: <https://bimdictionary.com/en/model-use/1>. Acesso em: 25 jan. de 2022.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 15978**: Sustainability of construction works. assessment of environmental performance of buildings. calculation method. London: BSI, 2011. 64 p.

BUILDING AND CONSTRUCTION AUTHORITY. **Code of Practice on Buildability**: 2017 edition. Singapore: BCA, 2017. 78 p.

BUYLE, M.; BRAET, J.; AUDENAERT, A. Life cycle assessment in the construction sector: A review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 26, p. 379–388, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113002876>. Acesso em: 25 jan. 2022.

CAMPOS Érica Ferraz de. **Emissão de CO₂ da madeira serrada da Amazônia: o caso da exploração convencional**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN). **Eurocode 2**: Design of concrete structures: Part 1-1 -general rules and rules for buildings. Bruxelas, Bélgica, 2004. 225 p.

CHI, H. L.; WANG, X.; JIAO, Y. BIM-enabled structural design: impacts and future developments in structural modelling, analysis and optimisation processes. **Archives of computational methods in engineering**, v. 22, n. 1, p. 135–151, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-014-9127-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-014-9127-7>. Acesso em: 25 jan. 2022.

DIAO, Y.; KATO, S.; HIYAMA, K. Development of an optimal design aid system based on building information modeling. **Building Simulation**, v. 4, n. 4, p. 315–320, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-011-0054-3>. Disponível em: <https://meiji.elsevierpure.com/en/publications/development-of-an-optimal-design-aid-system-based-on-building-inf>. Acesso em: 25 jan. 2022.

DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S.; MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE transactions on evolutionary computation**, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002. DOI: 10.1109/4235.996017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=996017>. Acesso em: 25 jan. 2022.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V. **Design science research**: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia. Porto Alegre: Bookman, 2015.

DZWIERZYNSKA, J.; PROKOPSKA, A. Pre-rationalized parametric designing of roof shells formed by repetitive modules of catalan surfaces. **Symmetry**, v. 10, n. 4, p. 1-16, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym10040105>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-8994/10/4/105>. Acesso em: 25 jan. 2022.

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **Manual de BIM**: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores. Porto Alegre: Bookman, 2014.

ELEFTHERIADIS, S.; DUFFOUR, P.; MUMOVIC, D. BIM-embedded life cycle carbon assessment of RC buildings using optimised structural design alternatives. **Energy and Buildings**, v. 173, p. 587–600, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.042>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778818305954>. Acesso em: 25 jan. 2022.

ELEFTHERIADIS, S.; DUFFOUR, P.; STEPHENSON, B.; MUMOVIC, D. Automated specification of steel reinforcement to support the optimisation of RC floors. **Automation in Construction**, v. 96, p. 366–377, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092658051830414X>. Acesso em: 25 jan. 2022.

FONSECA, L.P.G; NUNES, V.D.L; SANTANA, L.O; CARLO, J.C.; CÉSAR JUNIOR, K.M.L. Otimização multiobjetivo das dimensões dos ambientes de uma residência unifamiliar baseada em simulação energética e estrutural. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n.1, p. 267-288, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000100135>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/nf9DDk5mQBhZGNWGVhLVMFj>. Acesso em: 25 jan. 2022.

GAGG, C. R. Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. **Engineering Failure Analysis**, v. 40, p. 114–140, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350630714000387>. Acesso em: 25 jan. 2022.

GARCIA, Rafael de Paula. **Estratégias de penalização adaptativa para a solução de problemas de otimização com restrição via algoritmos genéticos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014

GASPAR, J. A. M. **O significado atribuído a BIM ao longo do tempo**. 2019. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

HOLLBERG, A.; RUTH, J. LCA in architectural design—a parametric approach. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 7, p. 943–960, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1065-1>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-016-1065-1>. Acesso em: 25 jan. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap. Low-Carbon Transition in the Cement Industry**. Paris: IEA, 2018. 66 p. Disponível em: <https://www.wbcsd.org/contentwbc/download/4586/61682/1>. Acesso em: 25 jan. 2022.

KHONDOKER, M. T. H. Automated reinforcement trim waste optimization in RC frame structures using building information modeling and mixed-integer linear programming. **Automation in Construction**, v. 124, p. 103599, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103599>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580521000509>. Acesso em: 25 jan. 2022.

LEE, D.; SON, S.; KIM, D.; KIM, S. Special-length-priority algorithm to minimize reinforcing bar-cutting waste for sustainable construction. **Sustainability**, v. 12, n. 15, p. 1-15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12155950>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/15/5950>. Acesso em: 25 jan. 2022.

LIU, D.; LI, X.; CHEN, J.; JIN, R. Real-time optimization of precast concrete component transportation and storage. **Advances in Civil Engineering**, v. 2020, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/5714910>. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2020/5714910/>. Acesso em: 25 jan. 2022.

LIU, J.; LIU, P.; FENG, L.; WU, W.; LI, D.; CHEN, Y. F. Automated clash resolution for reinforcement steel design in concrete frames via q-learning and building information modeling. **Automation in**

Construction, v. 112, p. 103062, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103062>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580519304753>. Acesso em: 25 jan. 2022.

MANGAL, M.; CHENG, J. C. Automated optimization of steel reinforcement in RC building frames using building information modeling and hybrid genetic algorithm. **Automation in Construction**, v. 90, p. 39–57, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.013>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580517305630>. Acesso em: 25 jan. 2022.

NADOUSHANI, Z. S. M.; HAMMAD, A. W.; XIAO, J.; AKBARNEZHAD, A. Minimizing cutting wastes of reinforcing steel bars through optimizing lap splicing within reinforced concrete elements. **Construction and Building Materials**, v. 185, p. 600–608, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818316969>. Acesso em: 25 jan. 2022.

OLIVEIRA, J. I. F. de. **Otimização Multiobjetivo Aplicada à Análise Estrutural de Edifícios**. 2017. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) — Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2007. 380 p. Disponível em: http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/Apost_EESC_USP_Libanio.pdf. Acesso em: 25 jan. 2022.

PORWAL, A.; HEWAGE, K. N. Building information modeling–based analysis to minimize waste rate of structural reinforcement. **Journal of construction engineering and management**, v. 138, n. 8, p. 943–954, 2012. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000508](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000508). Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CO.1943-7862.0000508>. Acesso em: 25 jan. 2022.

RIBEIRO, A. C. **Otimização multiobjetivo para alocação de geração distribuída em sistemas de distribuição via NSGA-II e composição MAX-MIN**. 2019. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2019.

RIGO, Eduardo. **Métodos de otimização aplicados à análise de estruturas**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

SHAO, T.; ZHANG, C. Architectural design model based on BIM management system model and data mining. *International Journal of Performability Engineering*, v. 14, n. 11, p. 2574–2580, 2018. DOI: 10.23940/ijpe.18.11.p3.25742580. Disponível em: <http://www.ijpe-online.com/EN/10.23940/ijpe.18.11.p3.25742580>. Acesso em: 25 jan. 2022.

SILVA, F. B.; YOSHIDA, O. S.; SAADE, M. R.; SILVA, V. G. D.; SILVA, M. G. D.; MORAGA, G. L.; PASSUELLO, A.; OLIVEIRA, L. A. D.; JOHN, V. M. Avaliação do ciclo de vida do concreto dosado em central com base em dados da indústria brasileira. **Concreto e Construções**, v. 98, p. 91–97, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2020.98.0010>. Disponível em: http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/pdfs/edicao98/10_avaliacao_ciclo.pdf. Acesso em: 25 jan. 2022.

SIMON, H. A. *The Sciences of the Artificial*. 3. ed. Cambridge: MIT Press, 1996.

SUCCAR, B.; SALEEB, N.; SHER, W. Model Uses: foundations for a modular requirements clarification language. *In: Australasian Universities Building Education (AUBEA2016)*, 2016, Cairns, Queensland, Australia. **Proceedings [...]**. Cairns: Central Queensland University, 2016. p. 45 – 57.

SUN, C.; JIANG, S.; SKIBNIEWSKI, M. J.; MAN, Q.; SHEN, L. A literature review of the factors limiting the application of BIM in the construction industry. **Technological and Economic Development of Economy**, v. 23, n. 5, p. 764–779, 2017. DOI:

<https://doi.org/10.3846/20294913.2015.1087071>. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3846/20294913.2015.1087071>. Acesso em: 25 jan. 2022.

TAFRAOUT, S.; BOURAHLA, N.; BOURAHLA, Y.; MEBARKI, A. Automatic structural design of RC wall-slab buildings using a genetic algorithm with application in BIM environment. **Automation in Construction**, v. 106, p. 102901, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102901>.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580519303954>.

Acesso em: 25 jan. 2022.

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAM (UNEP). **Global Status Report for Buildings and Construction**: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. Nairobi, 2020. 105 p.

WANG, Y.; YUAN, Z.; SUN, C. Research on assembly sequence planning and optimization of precast concrete buildings. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 24, n. 2, p. 106–115, 2018.

DOI: <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.458>. Disponível em:

<https://journals.vgtu.lt/index.php/JCEM/article/view/458>. Acesso em: 25 jan. 2022.

Caio Liberato Calixto

caio.calixto@ime.eb.br

Giuseppe Miceli Junior

giuseppe.pged@ime.eb.br

Paulo Cesar Pellanda

pellanda@ime.eb.br