

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE EDIFICAÇÕES EM  
CONCRETO ARMADO COM O EMPREGO DOS  
SOFTWARES MATLAB E ROBOT

Fábio Augusto Henkes Huppes

Passo Fundo

2021



CIP – Catalogação na Publicação

---

- H958o Huppes, Fábio Augusto Henkes  
Otimização estrutural de edificações em concreto armado com o emprego dos softwares Matlab e Robot [recurso eletrônico] / Fábio Augusto Henkes Huppes. – 2021.  
1 MB ; PDF.
- Orientador: Prof. Dr. Moacir Kripka.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo, 2021.
1. Construção civil. 2. Otimização estrutural. 3. Concreto armado. 4. Algoritmos genéticos. I. Kripka, Moacir, orientador.  
II. Título.

CDU: 691.328

---

Catalogação: Bibliotecária Juliana Langaro Silveira - CRB 10/2427

Otimização Estrutural de Edificações em Concreto Armado com o Emprego dos  
Softwares Matlab e Robot

Fábio Augusto Henkes Huppes

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade de Passo Fundo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Moacir Kripka.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Afonso Celso de Castro Lemonge

Prof. Dr. Fernando Busato Ramires

Prof. Dr. Zacarias Martin Chamberlain Pravia

Passo Fundo, Abril de 2021

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as inúmeras dificuldades e por iluminar minha caminhada.

A minha mãe por todo apoio e incentivo para concluir mais uma formação acadêmica em minha vida.

A minha namorada pelo apoio nos momentos de dificuldade, pelos conselhos e compreensão nos momentos de minha ausência.

A minha irmã por sempre buscar me descontraír.

A meu pai que a mais de 3 anos partiu para a morada eterna, mas que sempre me incentivou a não parar de estudar, e pelos seus inúmeros conselhos.

Ao meu orientador pelos ensinamentos, dedicação, atenção e direcionamento na elaboração desta pesquisa.

Aos professores membros da banca examinadora desta dissertação, por todas as contribuições efetuadas.

A CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade de Passo Fundo pela bolsa de mestrado concedida.

E a todos que de forma direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão desse trabalho, meu agradecimento.

“Quando você determina um prazo para a realização da meta, suas chances de concretizá-la são grandes. Porém, se isso não acontecer, simplesmente substitua a data por outra. Tenha a certeza de que estará muito mais perto de conseguir o que quer!”

Rodrigo Cardoso

## RESUMO

A indústria da construção civil desempenha um papel importante no desenvolvimento econômico e social, porém consome grandes quantidades de energia e é responsável por uma poluição global significativa. Nesse setor, as edificações são responsáveis por consumir elevada quantidade de materiais, entre esses o aço e o concreto. Há anos, nos projetos de engenharia, busca-se por soluções de baixo custo, contudo o dimensionamento estrutural geralmente é realizado com base na experiência do engenheiro projetista, o qual adota uma solução que nem sempre é a melhor. Diante desse cenário, a otimização estrutural pode ser empregada. No entanto, o desenvolvimento de softwares específicos de otimização, análise, dimensionamento e detalhamento estrutural demandam um grande esforço, além de conhecimentos que normalmente fogem do dia a dia dos projetistas. Nesse sentido, o objetivo do trabalho é otimizar estruturas de edificações em concreto armado, considerando o custo econômico e ambiental por meio da integração dos softwares *Matlab* e *Robot*, a fim de obter-se alternativas otimizadas de projeto, com o menor tempo possível de execução do dimensionamento estrutural. Com essa finalidade, uma formulação para vigas e pilares em concreto armado foi implementada, em associação com o método dos algoritmos genéticos. Para os exemplos analisados, constatou-se que os resultados obtidos foram coerentes com aqueles encontrados na literatura. Observou-se ainda que a metodologia proposta conduz a uma significativa redução nos custos e impactos gerados.

Palavras-chave: Concreto Armado, Otimização Estrutural, Custos, Algoritmos Genéticos.

## **ABSTRACT**

The construction industry make an important role in economic and social development, however it consumes large amounts of energy and is responsible for a meaningful global generation. In this sector, buildings are responsible for consuming a high amount of materials, including steel and concrete. For years, in engineering projects, we have been looking for low-cost solutions, but the structural design is usually performed based on the experience of the design engineer, which adopts a solution that is not always the best. Given this scenario, structural optimization can be employed. However, the development of specific software for optimization, analysis, dimensioning and structural detailing requires a great deal of effort, in addition to knowledge that is normally out of the designers' daily lives. In this sense, the objective of the work is to optimize reinforced concrete building structures, considering the economic and environmental cost through the integration of Matlab and Robot softwares, in order to obtain optimal design alternatives, with the shortest possible execution time structural design. For this purpose, a formulation for reinforced concrete beams and columns was implemented, in association with the method of genetic algorithms. For the analyzed examples, it was found that the results obtained were consistent with those found in the literature. It was also observed that the proposed methodology leads to a significant reduction in the costs and impacts generated.

**Key Words:** Reinforced Concrete, Structural Optimization, Costs, Genetic Algorithms.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 Objetivos .....</b>	<b>11</b>
1.1.1 Objetivo Geral .....	11
1.1.2 Objetivos Específicos .....	11
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Estruturas de Concreto Armado .....</b>	<b>12</b>
2.1.1 Software <i>Robot</i> .....	12
<b>2.2 Otimização .....</b>	<b>13</b>
<b>2.3 Otimização de Estruturas em Concreto Armado .....</b>	<b>14</b>
2.3.1 Métodos de otimização .....	18
2.3.2 Algoritmos Genéticos .....	19
2.3.3 Software <i>Matlab</i> .....	20
<b>3. FORMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Formulação .....</b>	<b>21</b>
3.1.1 Dados de Entrada .....	21
3.1.2 Variáveis de Projeto .....	22
3.1.3 Funções Objetivo .....	22
3.1.4 Restrições .....	24
<b>3.2 Implementação Computacional .....</b>	<b>25</b>
3.2.1 Conexão com o <i>Robot</i> .....	26
3.2.2 Configurações do computador .....	29
<b>3.3 Calibração do Programa .....</b>	<b>29</b>
<b>4. ANÁLISES NUMÉRICAS E RESULTADOS .....</b>	<b>34</b>
<b>4.1 Exemplo 1 .....</b>	<b>34</b>
<b>4.2 Exemplo 2 .....</b>	<b>38</b>
<b>4.3 Exemplo 3 .....</b>	<b>42</b>
<b>4.4 Exemplo 4 .....</b>	<b>45</b>
<b>4.5 Exemplo 5 .....</b>	<b>48</b>
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>54</b>
<b>5.1 Sugestões para futuros trabalhos .....</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>56</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma geral de funcionamento do Algoritmo Genético .....	20
Figura 2: Formulação .....	21
Figura 3: Variáveis de Projeto .....	22
Figura 4: Metodologia geral da otimização por meio do <i>Robot</i> e <i>Matlab</i> .....	26
Figura 5: Exemplo de acesso ao <i>Robot</i> em um projeto .....	27
Figura 6: Criação de Seção Transversal .....	27
Figura 7: Executar análise .....	27
Figura 8: Momento Fletor.....	28
Figura 9: Configuração para obtenção de armadura.....	28
Figura 10: Exemplo de obtenção de armaduras teóricas .....	29
Figura 11: Exemplo do Pórtico Plano .....	31
Figura 12: Exemplo de Viga Biapoiada .....	34
Figura 13: Viga Biapoiada : Altura x Vão, para diferentes $f_{ck}$ 's .....	35
Figura 14: Viga Biapoiada: Custo x Vão, para diferentes $f_{ck}$ 's.....	35
Figura 15: Altura da viga otimizada - Pórtico Plano .....	39
Figura 16: Custo ótimo do Pórtico Plano .....	39
Figura 17: Representatividade dos Materiais no Pórtico Plano simples .....	40
Figura 18: Altura ótima das vigas considerando as emissões de CO <sub>2</sub> - Pórtico Plano.....	41
Figura 19: Emissões de CO <sub>2</sub> para o Pórtico Plano .....	41
Figura 20: Representatividade dos materiais no Pórtico Plano: Emissões de CO <sub>2</sub> .....	42
Figura 21: Exemplo de Pórtico Plano de Múltiplos Vãos .....	43
Figura 22: Altura ótima das vigas para Pórticos Planos de Múltiplos Vãos .....	43
Figura 23: Custo ótimo do Pórtico Plano de Múltiplos Vãos.....	44
Figura 24: Representatividade dos Materiais no Pórtico Plano de Múltiplos Vãos .....	45
Figura 25: Pórtico Plano com 6 pavimentos e 2 vãos .....	46
Figura 26: Pórtico Espacial.....	48
Figura 27: Planta baixa do Pórtico Espacial.....	49

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Códigos para obtenção de armaduras .....	28
Quadro 2: Parâmetros <i>default</i> GA utilizados.....	30
Quadro 3: Custo de Materiais 2016.....	31
Quadro 4: Parâmetros Adotados para o Algoritmo Genético.....	31
Quadro 5: Análise Pórtico Plano com vão de 4 m.....	32
Quadro 6: Média do custo e tempo.....	33
Quadro 7: Custos de materiais (2013) sem considerar mão de obra .....	35
Quadro 8: Fck 20 MPa, Medeiros e Kripka (2013) x Huppés (2021).....	36
Quadro 9: Fck 25 MPa, Medeiros e Kripka (2013) x Huppés (2021).....	36
Quadro 10: Fck 30 MPa, Medeiros e Kripka (2013) x Huppés (2021).....	37
Quadro 11: Fck 45 MPa, Medeiros e Kripka (2013) x Huppés (2021).....	37
Quadro 12: Contribuição percentual média dos materiais no custo total das vigas .....	37
Quadro 13: Dimensões e custo otimizados do Pórtico Plano simples.....	38
Quadro 14: Emissões de CO <sub>2</sub> .....	41
Quadro 15: Comparativo da altura da viga e do custo total para o Pórtico Plano de Múltiplos Vãos, Boito (2016) x Huppés (2021).....	44
Quadro 16: Custos dos Materiais 2017 .....	46
Quadro 17: Resultados ótimos para o pórtico de 6 pavimentos e 2 vãos Boscardin (2017) x Huppés (2021).....	47
Quadro 18: Custo do pórtico plano de 6 pavimentos considerando as seções otimizadas do trabalho de Boscardin (2017).....	47
Quadro 19: Custos econômicos dos materiais .....	49
Quadro 20: Custo econômico do Pórtico Espacial .....	50
Quadro 21: Pórtico Espacial: Otimização x Pré-dimensionamento .....	50
Quadro 22: Custos dos Materiais: Otimização x <i>Eberick</i> .....	51
Quadro 23: Quantitativo de Materiais: Otimização x <i>Eberick</i> .....	51
Quadro 24: Comparativo armadura longitudinal: Otimização x <i>Eberick</i> .....	51
Quadro 25: Comparativo armadura transversal: Otimização x <i>Eberick</i> .....	52
Quadro 26: Custos Ambientais do Pórtico Espacial.....	52
Quadro 27: Comparativo das variáveis (m) KgCO <sub>2</sub> x R\$ .....	53
Quadro 28: Comparativo entre as estruturas de custo econômico e ambiental ótimo.....	53
Quadro 29: Representatividade dos Materiais no custo total do Pórtico Espacial .....	53

## 1. INTRODUÇÃO

Em virtude do crescente aumento da população mundial e com projeção de atingir o maior pico no final do século XXI (ONU, 2019), é necessário a construção de novas residências ou edifícios, pois esses além de demandarem grande quantidade de matérias primas, principalmente para a produção do aço e concreto, também contribuem acentuadamente na poluição global.

A união desses dois materiais constitui o concreto armado, o qual no Brasil é amplamente utilizado desde meados do século XX, em razão do sistema construtivo ser simplificado e possibilitar a ousadia da engenharia e arquitetura.

Tendo em vista o aumento do consumo de concreto, e por ser o material de construção mais empregado no mundo, os impactos ambientais nos últimos anos passaram a ter destaque, pois estima-se que na sua produção, o cimento, seu principal constituinte, é responsável pela emissão de aproximadamente 7% das emissões globais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (WBCSD, 2018). Em contrapartida, o aço utilizado em edificações corresponde por 10,5% (ALLWOOD; CULLEN, 2012). No entanto, a busca por soluções eficazes e de baixo custo, há anos é prioridade nos projetos de engenharia, em consequência ao mercado competitivo, onde procura-se rapidez na execução, economia, segurança e qualidade.

Apesar da constante busca por economia nos projetos, o dimensionamento estrutural normalmente é realizado com base na experiência e intuição do engenheiro projetista, todavia, as dimensões de cada elemento devem atender os critérios normativos de resistência e funcionalidade, para garantir um projeto seguro e funcional. Porém, nem sempre a solução adotada é a melhor, pois há um grande número de soluções possíveis para um determinado problema (KRIPKA; MEDEIROS; LEMONGE, 2015).

Para amenizar essas situações a otimização estrutural pode ser empregada, pois maximiza a eficiência estrutural, ou seja, normalmente por meio da otimização é possível alterar as dimensões das seções transversais dos elementos estruturais, a área de aço, volume de concreto, entre outros. Dessa forma, obtêm-se uma solução ideal ou ótima, com base em uma função objetivo definida e das limitações existentes. Ademais, a aplicação da otimização estrutural, pode ser utilizada como uma ferramenta auxiliar na tomada de decisão dos calculistas.

Diversos são os trabalhos que otimizam elementos estruturais ou até mesmo edificações, sob aspecto do custo e do seu peso, e nos últimos anos a consideração dos impactos ambientais também está sendo empregada na otimização. Apesar da grande quantidade de estudos, o

desenvolvimento de softwares específicos de otimização, análise, dimensionamento e detalhamento estrutural demandam um grande esforço, além de conhecimentos que geralmente fogem do dia a dia dos projetistas. Esse fato faz com que a otimização estrutural ainda não esteja incorporada à rotina dos escritórios de cálculo.

Dessa forma, o presente trabalho visa responder à seguinte questão: de que forma é possível otimizar edificações em concreto armado objetivando a redução do custo econômico e ambiental, com o emprego de software comercial?

O referido trabalho está contido na linha de pesquisa Estruturas da Infraestrutura do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UPF, e dá continuidade a estudos relativos à otimização de estruturas em concreto armado (BOITO, 2016; BOSCARDIN, 2017; MEDEIROS E KRIPKA, 2013).

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral consiste em otimizar estruturas de edificações em concreto armado, com emprego de ferramentas computacionais comerciais.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos são:

- a) Desenvolver um processo baseado em Algoritmos Genéticos para otimização de pórticos de edifícios em concreto armado, considerando o custo econômico e ambiental dos materiais que compõem a estrutura;
- b) Associar o processo de otimização integrando-o a um software comercial;
- c) Analisar estruturas de complexidade crescente comparando os resultados com referências da literatura;
- d) Propor alternativas ótimas para os projetos, buscando o menor tempo de execução do dimensionamento estrutural.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Estruturas de Concreto Armado

O concreto armado é um material formado por concreto e barras de aço. Em virtude do concreto resistir uma baixa parcela da resistência à tração (cerca de 10% da resistência a compressão), as barras de aço absorvem os esforços de tração a qual o elemento estrutural está submetido e de compressão também no caso dos pilares, por exemplo. E somente por conta da boa aderência entre esses materiais, que o conjunto funciona (ARAÚJO, 2010)

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), é necessário garantir a durabilidade das estruturas de concreto, as quais devem ser construídas considerando as condições ambientais no momento que ela é projetada, e ao ser utilizada precisa ser segura, mantendo-se estável e apta em serviço ao decorrer de sua vida útil.

Em consequência da complexidade e do tempo hábil para realizar cálculos manuais de estruturas, faz-se necessário a utilização de *softwares* comerciais de análise e dimensionamento estrutural, dentre esses pode-se destacar o *Autodesk Robot Structural Analysis Professional*.

#### 2.1.1 Software *Robot*

O *Robot* é uma ferramenta de análise estrutural avançada que utiliza elementos finitos e possui tecnologia BIM (Modelagem da Informação da Construção). Além disso, o software é capaz de realizar análises lineares e não lineares, análises, modais, sísmicas entre outras. Também é possível calcular qualquer tipo de estrutura, além de fazer o detalhamento estrutural dos elementos, que esta compõe.

Para a concepção de edificações em concreto armado é necessário definir os elementos estruturais, atribuir seções transversais, criar/configurar materiais, como exemplo as classes de concreto e aço. Definir a norma padrão a ser utilizada, caso a norma que procure não se encontra na base de dados, pode-se usar uma similar.

Outro recurso que o *Robot* apresenta, é a *API* (Interface de Programação de Aplicações), que consiste em um conjunto de ferramentas que permitem a integração com programas externos e desenvolvimento de novas funções. A integração é possível por meio da implementação computacional nas linguagens de programação *C++*, *C#*, *Visual Basic*, ou qualquer outra linguagem de programação com suporte à tecnologia *Component Object Model* (COM), em tradução livre significa modelo de objeto componente. Devido a possibilidade dessa integração, pode-se realizar a otimização estrutural.

## 2.2 Otimização

A otimização consiste em obter a melhor solução possível de um determinado problema. esse problema é chamado de monoobjetivo quando tem apenas um objetivo e multiobjetivo quando a solução atender dois ou mais objetivos normalmente conflitantes (PENADÉS-PLÀ; GARCÍA-SEGURA; YEPES, 2019).

O método de otimização depende do tipo de algoritmo utilizado, o qual estipula critérios a serem seguidos para solução de problemas operacionais. Os algoritmos podem ser classificados em determinísticos e heurísticos, a diferença é que os determinísticos chegam ao ótimo global usando técnicas de programação matemática e os heurísticos foram desenvolvidos para resolver problemas complexos de otimização estrutural de variáveis discretas. Esses algoritmos heurísticos tradicionais conseguem bons resultados mesmo sem garantir o ótimo global. Já os algoritmos metaheurísticos possuem ferramentas para evitar ótimos locais tendo por finalidade encontrar uma solução melhor (PENADÉS-PLÀ; GARCÍA-SEGURA; YEPES, 2019).

Alguns exemplos de técnicas de otimização são os algoritmos genéticos, programação evolutiva, rede neural, recozimento simulado, colônia de formigas e otimização de enxame de partículas. A maioria desses métodos baseia-se em comportamentos biológicos, moleculares, enxame de insetos e sistemas neurobiológicos (RAO, 2009).

O primeiro passo no processo de otimização consiste em identificar os objetivos, as variáveis e restrições do problema, porém o modelo adotado não deve ser muito simples, ao ponto de afastar a solução da realidade. E atualmente tem-se buscado problemas mais desafiadores, os quais podem demandarem muito tempo e esforço.

Basicamente um problema de otimização pode ser descrito da seguinte forma:

Maximizar ou minimizar:

$$f(x_i), \text{ sendo } i = 1, n \quad (1)$$

Sujeito a:

$$g_j(x_i) \leq 0, \text{ sendo } j = 1, m \quad (2)$$

$$h_k(x_i) = 0, \text{ sendo } k = 1, l \quad (3)$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad (4)$$

Na Equação (1),  $f(x)$  representa a função objetivo que se deseja maximizar ou minimizar, a qual frequentemente relaciona-se a alguma quantidade numérica. Além disso, o “ $x$ ” é o vetor das variáveis do problema, que influenciam no valor final da função a ser

otimizada. As relações expostas nas Equações (2) e (3) são chamadas de restrições de desigualdade e restrições de igualdade, respectivamente. E a Equação (4) representa as restrições laterais, com limites inferior e superior do espaço de busca.

Em qualquer problema de otimização nem sempre se encontra o valor ótimo global, e sim um ótimo local, que representa uma solução alternativa, a qual tem a possibilidade de ser um valor muito próximo do ótimo global.

De forma geral, a otimização pode ser empregada em diversas situações, das mais simples até aquelas com maior complexidade, sendo uma delas a otimização de estruturas de concreto armado.

### **2.3 Otimização de Estruturas em Concreto Armado**

A otimização estrutural teve início por volta de 1872, quando Maxwell desenvolveu os primeiros problemas relacionados ao assunto. Posteriormente Michell ingressou no campo da otimização estrutural, em 1904. Inicialmente os problemas de otimização consistiam em minimizar o peso de uma treliça (GHODDOSIAN *et al.*, 2018).

Esses e outros estudos iniciais consistiam em otimizar estruturas de aço formadas por barras. Apenas na década de 1950, as primeiras pesquisas referentes a otimização de estruturas de concreto armado foram realizadas. Todavia, a partir da década de 1970, diversos estudos consideráveis foram desenvolvidos, os quais são responsáveis pela disseminação dos processos de otimização no mundo (BASTOS, 2004).

Inúmeras pesquisas sobre a otimização de estruturas de concreto armado são encontradas, desde a otimização de um elemento estrutural isolado até a otimização de um edifício completo, tendo por função definida normalmente o custo e o peso dos elementos que compõem a estrutura. No entanto nos últimos anos, está sendo empregada com maior ênfase no quesito ambiental, visto que a construção civil é umas das grandes responsáveis pelos impactos ambientais globais.

Dentre os estudos sobre otimização de estruturas de concreto armado, em sua maioria refere-se à otimização de elementos isolados ou de pórticos planos. Destaca-se na sequência alguns desses estudos, e também aqueles que abordam a otimização de edifícios, com ênfase na minimização dos impactos ambientais.

Paya-Zaforteza *et al* (2009), otimizaram pórticos planos de concreto armado, empregando duas funções objetivo, custo e emissões de CO<sub>2</sub>, utilizando o método do recozimento simulado. Os resultados apontam que para a estruturas de custo mínimo, tem-se

leve aumento das emissões (3,8%), por outro lado as soluções ótimas para CO<sub>2</sub> aumentam levemente o custo (2,77%). Além disso, os autores afirmam que a função objetivo baseada em emissões de CO<sub>2</sub> aparentemente é mais ecológica, pois os preços são mais sensíveis às variações de mercado, enquanto as emissões dependem de processos de fabricação dos materiais.

Katkhoda e Knaa (2012), buscaram a otimização do custo econômico de edifícios de 10, 15 e 20 andares em concreto armado, levando em conta três sistemas estruturais. Foram também considerados três faixas de preço, uma mediana (custo do concreto por m<sup>3</sup> 3000 SYP, custo de 1tf de aço 24000 SYP), uma onde o concreto é caro e o aço barato (custo do concreto por m<sup>3</sup> 6000 SYP, custo de 1tf de aço 25000 SYP) e outra onde o concreto é barato e o aço é caro (custo do concreto por m<sup>3</sup> 4700 SYP, custo de 1tf de aço 65000 SYP). Os melhores resultados foram obtidos quando o concreto é barato e o aço caro, para os edifícios de 15 e 20 andares, o que representa uma economia de aproximadamente de 17% e 22% respectivamente.

Camp e Huq (2013), otimizaram estruturas de concreto armado (pórticos planos), a partir de estruturas empregadas por outros autores da área. A otimização baseou-se em reduzir custos e as emissões de CO<sub>2</sub>, por meio da aplicação do algoritmo Big Bang-Big Crunch. Com a utilização desse algoritmo foi possível obter resultados inferiores aos obtidos pelos outros autores que utilizaram o algoritmo genético e recozimento simulado. Normalmente, os projetos com foco em minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> podem ser alcançados com um leve aumento do custo.

Park *et al* (2013), fizeram a otimização de pilares de concreto armado com perfil de aço, ou seja, uma estrutura mista, de um edifício alto com 35 andares acima do solo e 6 andares abaixo do solo, visando reduzir custo e emissões de CO<sub>2</sub> na fase de construção. Os resultados demonstram que o uso de mais concreto em comparação ao aço e materiais de alta resistência são métodos econômicos e ambientalmente eficazes, pois a solução ideal reduziu o peso total em 7,79%, no entanto o peso do concreto aumentou em 7,24% e o peso do aço foi reduzido em 39,14%, no geral o custo e as emissões reduziram em 32,13% e 31% respectivamente.

O objetivo do trabalho desenvolvido por Medeiros e Kripka (2013), consistiu em minimizar o custo de vigas em concreto armado utilizando o método *Simulated Annealing*, considerando a influência do custo do concreto, do aço e das formas. Os resultados apontam que quanto o maior for o número de grupos de seções de vigas, menores serão os custos gerados pelos materiais. Outro ponto importante é que na maior parte dos casos, quanto maior o fck, maior o custo para as vigas de mesmos vãos. E referente aos custos dos materiais para as vigas, o aço representou 50%, seguido do concreto com 30% e das formas por 20%.

Medeiros e Kripka (2014), também otimizaram seções retangulares de pilares de concreto armado submetido a cargas uniaxiais de flexão e compressão. Verificaram que a otimização dos custos monetários está diretamente relacionada a redução dos custos ambientais, além disso, normalmente as melhores soluções ambientais demandam maior quantidade de aço, menor consumo de concreto e maior quantidade de formas. Geralmente, quanto maior a resistência do concreto melhores as soluções tanto para custos ambientais como para custos monetários.

No estudo desenvolvido por Yeo e Potra (2015), foi realizada a otimização estrutural empregando duas funções objetivos, custos e emissões de CO<sub>2</sub>, para um único pórtico plano, submetido a carregamentos gravitacionais e laterais. Os resultados apontam que a otimização é mais eficaz para a redução da pegada de carbono quando sujeitas a elevadas forças de compressão. À medida que a resistência do concreto aumenta a diferença entre custos otimizados e emissões de CO<sub>2</sub> diminui. Além do mais, o pórtico otimizado em termos de custos, a contribuição do concreto para o custo total é maior em comparação a otimização do pórtico levando em conta as emissões de CO<sub>2</sub>. A contribuição do aço no quesito emissões de CO<sub>2</sub> é maior para o pórtico otimizado frente às emissões. Sobretudo a maior contribuição para o total de emissões é por causa do concreto, o que significa que o concreto tem menor pegada de CO<sub>2</sub> do que o aço. E para atingir emissões mínimas de CO<sub>2</sub> em comparação ao projeto de custo mínimo, é em torno de 5 a 15%.

Boito (2016), em seu trabalho realizou a otimização de pórticos planos com o intuito de reduzir os custos econômicos. O menor custo foi obtido com uma resistência do concreto intermediária. Em geral, para pórticos de 1 pavimento e múltiplos vãos, as formas apresentaram maior influência nos custos totais, seguidos do aço e concreto. No entanto se fosse reutilizar as formas teria-se redução dos custos gerais.

No estudo desenvolvido por Oliveira (2017), foi realizado a otimização multiobjetivo de estruturas de concreto armado, objetivando a redução dos custos e dos deslocamentos, baseado no posicionamento ótimo de pilares e na variação das seções transversais. A otimização foi possível através da integração da linguagem de programação C#, entre o software *Robot* e algoritmo *NSGA II*. Os resultados obtidos apontam que a metodologia adotada pode servir como auxílio na concepção estrutural.

Eleftheriadis, Duffour e Mumovic (2018), também realizaram a otimização estrutural multiobjetivo, porém para uma edificação de 10 pavimentos em concreto armado com lajes planas, isto é, sem a presença de vigas, levando em conta o custo e o carbono incorporado na construção, por meio do emprego de uma ferramenta BIM. Como resultado, obteve-se que a

proporção entre o custo e as emissões de carbono foram proporcionais para as lajes e pilares, tendo a partir da otimização, reduções de 50% nos reforços da laje, em comparação ao projeto real, no entanto teve-se significativo aumento das seções transversais dos pilares. Em relação as emissões de carbono incorporadas na estrutura, essas foram reduzidas em torno de 16 a 19%, evidenciando dessa forma, que as emissões de carbono incorporadas ao edifício podem ser reduzidas por meio da otimização do projeto estrutural.

Cerè, Zhao e Rezgui (2019), otimizaram uma edificação de concreto armado de 7 andares com o objetivo de reduzir os deslocamentos da estrutura, por meio da integração entre os softwares *Matlab* e *Robot*. Tendo esse estudo por objetivo identificar o motivo do colapso dessa edificação e fornecer uma ferramenta que visa reduzir a quantidade de cálculos.

Gan *et al.*, (2019), empregaram a modelagem paramétrica e a otimização estrutural por meio de um algoritmo genético, para um edifício de concreto armado de 34 andares, visando reduzir o custo e as emissões de carbono. Primeiramente realizou-se a modelagem paramétrica da estrutura e na sequência a otimização simultânea da topologia estrutural e os elementos estruturais. Os resultados demonstram que houve redução dos custos e das emissões entre 18 a 24%.

Negrin, I., Negrin, A. e Chagoyén (2019), realizaram a otimização de estrutural de um edifício em concreto armado, considerando o custo das vigas, pilares e fundações, por meio da integração entre os softwares *Matlab* e *SAP2000*. Os resultados evidenciam que o método de otimização por enxame de partículas mostrou-se mais eficiente que os algoritmos genéticos, todavia os melhores resultados foram obtidos com a hibridização dos dois métodos obtendo-se uma economia superior a 10%. Como parâmetros para projetos os autores sugerem a relação entre o comprimento do vão e a altura de vigas entre 15 e 17,5, para os pilares de canto e externo recomendam adotar seções retangulares na direção dos maiores vãos das vigas, para pilares centrais adotar seções quadradas se houver simetria na estrutura, e para as fundações as mesmas ponderações aplicadas para os pilares. De forma geral, foi possível reduzir o custo econômico em 13%.

Mavrokapnidis, Mitropoulou e Lagaros (2019), realizaram um estudo diferente aos demais, pelo qual afirmam que a seleção do tipo de sistema estrutural não influi diretamente nos impactos ambientais operacionais, ou seja, de utilização. Entretanto, os impactos relacionados à fase de construção, em termos de energia incorporada, ao comparar os sistemas estruturais de aço e concreto, os primeiros apresentaram quase o dobro de energia e emitem quantidades duplas de CO<sub>2</sub> em comparação aos sistemas de concreto. Para edifícios altos, em

torno de 60 andares, do ponto de vista ambiental o uso do concreto tende a ser a melhor opção em comparação ao aço.

No trabalho realizado por Chen *et al.* (2019), foi feita a otimização multiobjetivo de pórticos espaciais, em função do custo (custo do concreto, armadura e formas) das vigas e dos pilares, ou seja, a partir da obtenção do custo ótimo da viga e do pilar, foi obtido o custo mínimo para toda a estrutura. Para isso foi utilizado o *Matlab* acoplado aos Algoritmos Genéticos. Uma das conclusões foi que ao manter a largura das vigas iguais as dos pilares, houve aumento do custo em 2% em relação a manter as larguras entre vigas e pilares diferentes.

Outro trabalho sobre otimização de pilares foi realizado por Choi *et al.*(2019), no qual desenvolveram um modelo de design verde multiobjetivo aplicado no projeto de mega pilares (300 a 650m de altura) de concreto armado e aço, para um edifício, pelo qual foi possível reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> e o custo simultaneamente, considerando as fases de projeto e construção. Como parâmetros de projeto, as variáveis com maior influência ao otimizar o pilar quando a carga axial é predominante, são a resistência do aço e a resistência a compressão do concreto. E quando os momentos fletores são predominantes, deve-se aumentar a resistência do aço e o diâmetro das barras de aço.

Botis e Cerbu (2020), apresentaram um método teórico de redução da torção de edifícios em concreto armado de múltiplos andares, por meio da minimização da distância entre o Centro de Massa e o Centro de Rigidez. Para isso, foi realizada a otimização empregando a função *fminsearch* disponível no software *Matlab*, e para verificar os resultados da otimização utilizou-se a função do Gradiente Reduzido Generalizado, disponível no *Solver do Excel*. Já a análise estrutural foi realizada por meio do software *ETABS*.

Afzal *et al.*(2020) realizaram uma pesquisa de revisão sobre a otimização projetos de estruturas de concreto armado para o mínimo impacto ambiental. A referida revisão refere-se a estudos que datam de 1974 a 2018. Em 1974, havia apenas uma publicação e em 2018 foram encontradas 38 publicações, conforme os critérios de pesquisa adotados no estudo. Dentre esses, poucos se referem a otimização de estruturas tridimensionais e complexas, sendo uma área que pode ser mais explorada. Além disso, os autores afirmam que a inclusão de aspectos ambientais torna a otimização do projeto estrutural de concreto armado mais sustentável e ecologicamente correta.

### 2.3.1 Métodos de otimização

Existem diversas maneiras de classificar os tipos de otimização, os quais podem ser: otimização paramétrica, que consiste em manter a forma da estrutura e alterar as dimensões,

otimização de forma na qual em um elemento pode-se alterar os contornos internos e externos, e a otimização topológica consiste em retirar material de regiões de uma estrutura que não possuem função estrutural relevante

Em relação aos métodos de otimização estes podem ser baseados em determinísticos e probabilísticos, o primeiro é um método, em geral de convergência mais rápida, porém pode-se ter maior dificuldade para encontrar o ótimo global. Em contrapartida, as soluções encontradas pelos métodos probabilísticos, tendem a evitar mínimos locais, mas apresentam custo computacional maior, em consequência das inúmeras avaliações da função objetivo.

Um dos métodos probabilísticos são os Algoritmos Genéticos, que tem sido uma técnica muito empregada nos últimos anos e apresenta resultados eficientes (BEZERRA, 2017). Além de ser um método consagrado, este já se encontra programado em algumas ferramentas computacionais, fato pelo qual também foi motivo de escolha para utilização nesse trabalho.

### 2.3.2 Algoritmos Genéticos

O Algoritmo Genético (AG) foi proposto por John Holland no ano de 1975 e é baseado na mecânica da seleção natural e na genética natural. Esse método aponta que indivíduos de uma mesma espécie possuem chances de sobrevivência diferentes, todavia, somente os indivíduos que apresentam as melhores características de adaptação serão capazes de se manterem vivos e transmitir sua genética para seus descendentes (GOLDBERG, 1989).

Em razão dos AGs utilizarem conceitos da genética, é necessária uma explicação sobre alguns termos, com a finalidade de melhor compreender o processo computacional:

- Cromossomo: ou indivíduo, é um conjunto de genes que representa uma solução do problema;
- Gene: uma característica que compõem um indivíduo;
- População: Conjunto de indivíduos (soluções);
- Geração: número de iterações, ou seja, repetições que o AG executa;
- Operações genéticas: operações que o algoritmo realiza sobre cada um dos indivíduos.

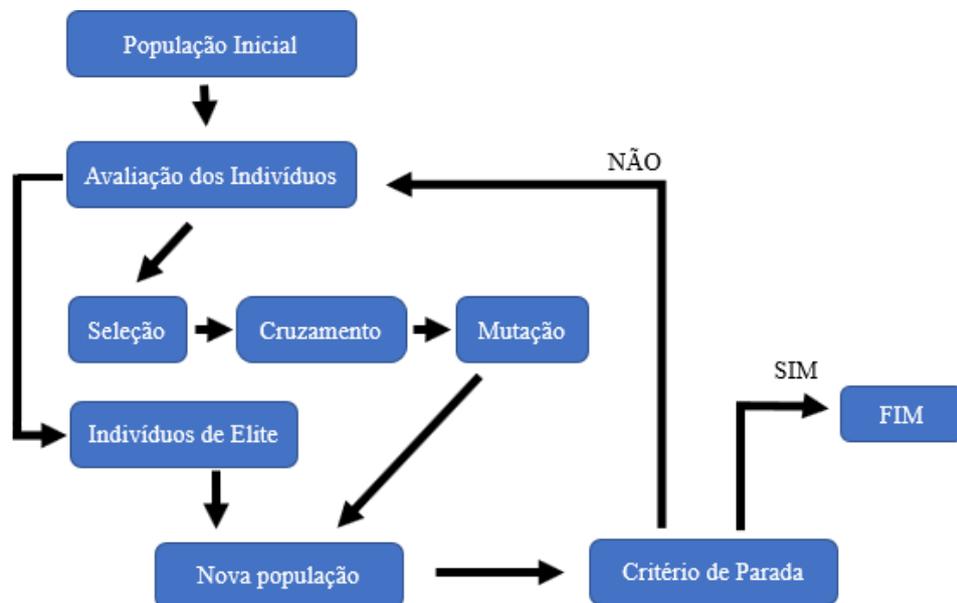
O funcionamento do método consiste inicialmente na criação de uma população inicial, na sequência avalia-se os indivíduos que compõem essa população. O(s) melhor(es) indivíduo(s) são mantidos para a próxima geração. Os demais indivíduos passam pelo processo de seleção, e na sequência pelo cruzamento, gerando novos indivíduos e alguns desses sofrem mutação. Posteriormente a aplicação dos operadores genéticos, os novos indivíduos compõem uma nova população. Então é realizada a verificação de atendimento de critério de parada, caso algum critério seja atendido a otimização é finalizada, se não, o processo reinicia a partir da

avaliação dos indivíduos até que seja atingido o critério de parada, o qual pode ser por diversos motivos, entre eles:

- Tolerância de aproximação dos resultados;
- Solução encontrada;
- Tempo limite excedido.

Para melhor compreensão, na Figura 1, está representado de forma esquemática o funcionamento do Algoritmo Genético (AG).

Figura 1: Fluxograma geral de funcionamento do Algoritmo Genético



Fonte: Autoria Própria

Com relação ao processo de cruzamento, seleciona-se dois indivíduos (pais) e recombina-se o material genético dos dois pais, gerando um novo indivíduo (filho) ou novos filhos, nesse caso uma ou duas novas soluções. E no processo de mutação, em um único indivíduo ocorre a troca de algumas características.

### 2.3.3 Software *Matlab*

Existem diversos softwares com linguagem de programação distintas, nos quais é possível programar inúmeros métodos de otimização. O *Matlab*, nesse sentido, possui um diferencial em que alguns métodos de otimização já se encontram integrados ao programa como os Algoritmos Genéticos, que podem ser acessados pelo *Toolbox* ou pelas linhas de programação.

Além desse diferencial, o *Matlab* é um software interativo de alta performance para cálculos numéricos, e também é capaz de realizar a programação de outros métodos de otimização, entre outras finalidades. E assim como o *Robot*, possui suporte “COM”.

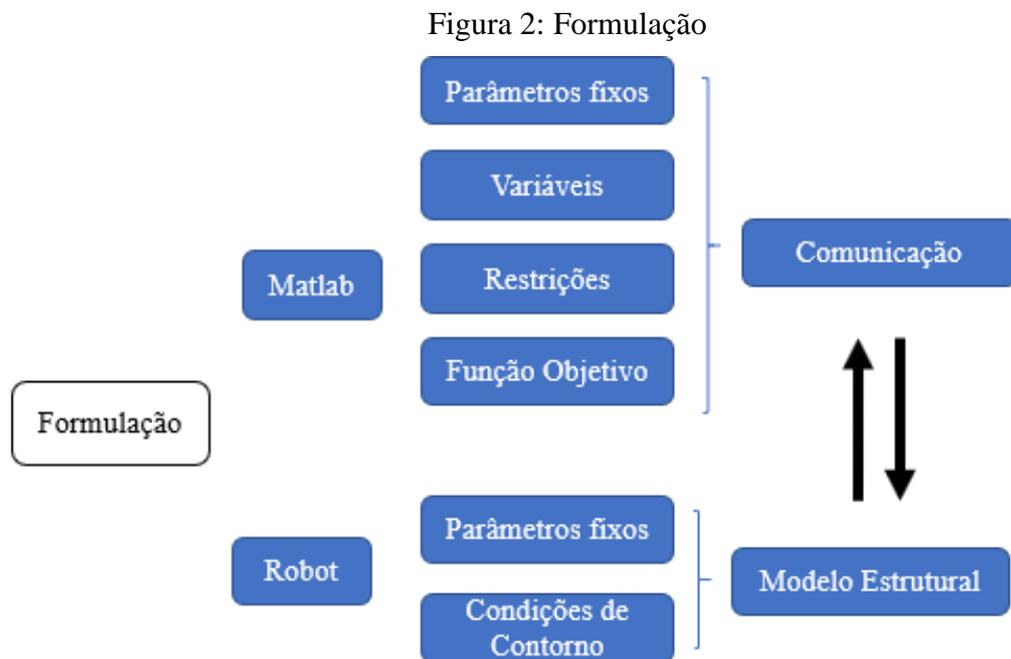
### 3. FORMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

#### 3.1 Formulação

Com base nos objetivos propostos, o presente estudo consiste na otimização estrutural de edificações em concreto armado contemplando vigas, pórticos planos simples, pórticos planos compostos e pórticos espaciais. O sistema estrutural adotado para os pórticos planos é formado por vigas e pilares, e os pórticos espaciais são formados por vigas, pilares e lajes.

Para realizar a otimização foi utilizado dois softwares, o *Matlab* e o *Robot*. Visto que o *Matlab* é responsável pela otimização propriamente dita, e o *Robot* pelo cálculo e dimensionamento estrutural.

Para a formulação do problema foram considerados dados de entrada, parâmetros variáveis, funções objetivo e restrições de projeto. Na sequência são descritas essas etapas envolvidas no desenvolvimento do trabalho, bem como a implementação computacional. Para melhor compreender o processo da formulação, na Figura 2 encontra-se um fluxograma.



Fonte: Autoria Própria

##### 3.1.1 Dados de Entrada

Os dados de entrada são as características mantidas inalteradas em cada processo de otimização de um projeto. Para esse estudo, inicialmente foi criado o modelo estrutural no *Robot*, no qual são definidos os parâmetros fixos, sendo eles:

- $f_{ck}$  – Resistência característica do concreto;
- $f_{yk}$  – Tensão característica de escoamento do aço;
- $g$  - Carga Permanente
- $q$  – Carga Distribuída;
- $E_s$  – Módulo de elasticidade do aço;
- Comprimento do vão
- Condições de Contorno

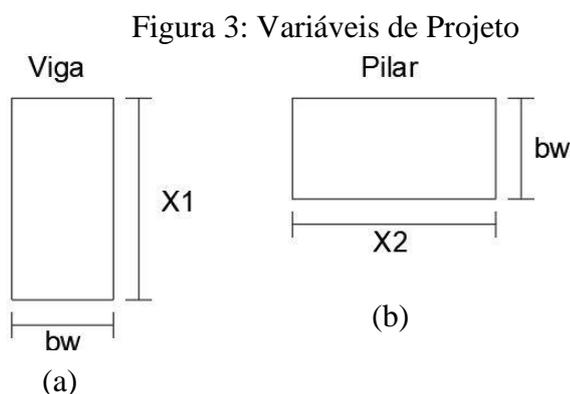
E no *Matlab* são mantidos inalterados os seguintes parâmetros:

- $C_s$  – Custo referente à massa de aço;
- $C_c$  – Custo referente ao volume de concreto;
- $C_f$  – Custo referente à área de forma
- $b_w$  – Largura da Viga e do Pilar;

### 3.1.2 Variáveis de Projeto

As variáveis de projeto (Figura 3) otimizadas, foram:

- $X_1$  - Altura da Viga
- $X_2$  – Altura do Pilar



Fonte: Autoria Própria

Quando analisou-se somente uma viga, adotou-se uma única variável de projeto, ou seja,  $X_1$ . Já para análise de pórticos empregou-se as duas variáveis  $X_1$  e  $X_2$ , e dependendo do pórtico agrupou-se alguns pilares e vigas, e também em alguns casos foi considerado no cálculo mais de 2 variáveis. Todas essas ponderações serão descritas nos exemplos.

### 3.1.3 Funções Objetivo

O objetivo do problema abordado consiste em minimizar o custo econômico e ambiental dos elementos estruturais em concreto armado, levando em conta as áreas de aço, volume de concreto e área das formas. Além de garantir que as seções transversais dos elementos resistam

aos esforços solicitantes que atuam na estrutura, bem como não ultrapassem os deslocamentos verticais máximos preconizados na NBR 6118 (ABNT, 2014).

As Equações 5 e 6 representam a função objetivo das vigas em relação ao custo econômico e ambiental, respectivamente, e as Equações 7 e 8 representam a função objetivo do custo econômico e ambiental para pórticos:

$$f_{vigaCE}(X) = (V_{conc\ viga} * Cc) + (P_{slongV} * CsCA50) + (P_{stV} * CsCA60) + (A_{fviga} * Cf) \quad (5)$$

$$f_{vigaCA}(X) = (V_{conc\ viga} * Cca) + (P_{slongV} * CsCA50a) + (P_{stV} * CsCA60a) + (A_{fviga} * Cfa) \quad (6)$$

$$f_{pórticoCE}(X) = (V_{conc\ pilar} * Cc) + (P_{slongP} * CsCA50) + (P_{stP} * CsCA60) + (A_{fpilar} * Cf) + (V_{conc\ viga} * Cc) + (P_{slongV} * CsCA50) + (P_{stV} * CsCA60) + (A_{fviga} * Cf) \quad (7)$$

$$f_{pórticoCA}(X) = (V_{conc\ pilar} * Cca) + (P_{slongP} * CsCA50a) + (P_{stP} * CsCA60a) + (A_{fpilar} * Cfa) + (V_{conc\ viga} * Cca) + (P_{slongV} * CsCA50a) + (P_{stV} * CsCA60a) + (A_{fviga} * Cfa) \quad (8)$$

Sendo:

- *f<sub>vigaCE</sub>*- Formulação final do processo de otimização de vigas, Custo Econômico (CE);
- *V<sub>conc viga</sub>*- Volume de concreto das vigas (m<sup>3</sup>);
- *Cc*- Custo do concreto (m<sup>3</sup>);
- *P<sub>slongV</sub>*- Peso das armaduras longitudinais das vigas (kg);
- *CsCA50*- Custo unitário de aço CA50 (kg);
- *CsCA60*- Custo unitário de aço CA60 (kg);
- *P<sub>stV</sub>*- Peso das armaduras transversais das vigas (kg);
- *A<sub>fviga</sub>*- Área de formas das vigas (m<sup>2</sup>);
- *Cf*- Custo das formas (m<sup>2</sup>);
- *f<sub>vigaCA</sub>*- Formulação final do processo de otimização de vigas, Custo Ambiental (CA);
- *f<sub>pórticoCE</sub>*- Formulação final do processo de otimização de pórticos, Custo Econômico;
- *V<sub>conc pilar</sub>*- Volume de concreto dos pilares (m<sup>3</sup>);
- *P<sub>slongP</sub>*- Peso das armaduras longitudinais dos pilares (kg);
- *P<sub>stP</sub>*- Peso das armaduras transversais dos pilares (kg);
- *A<sub>fpilar</sub>*- Área de formas dos pilares (m<sup>2</sup>);
- *f<sub>pórticoCA</sub>*- Formulação final do processo de otimização de pórticos, Custo Ambiental;
- *OBS.:* demais nomenclaturas terminadas com “a”, representam os custos ambientais, exemplo *Cca*= Custo ambiental do concreto (KgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>).

Referente as considerações de cálculo para as vigas, foi adotado a armadura teórica longitudinal máxima obtida no *Robot*, no caso a maior armadura negativa longitudinal obtida

foi empregada em toda a extensão da viga, a mesma ponderação emprega-se para as armaduras positivas. Essa determinação pode gerar maiores custos de materiais, porém pode-se reduzir o tempo de montagem dessas vigas no canteiro de obras, além disso, reduzir o tempo de processamento dos cálculos. Para as armaduras transversais também foi considerada a armadura teórica mais elevada em todo o vão. E quando se fez necessário no cálculo das armaduras negativas foi considerado 2 barras de 5.0mm, o que equivale a 0,40 cm<sup>2</sup> de área de aço, como armadura construtiva.

Para os pilares também foi utilizada a armadura máxima teórica para o cálculo das armaduras longitudinais e para as armaduras transversais.

Vale ressaltar, que não foi possível otimizar os elementos estruturais considerando o detalhamento completo de cada um, pois essa parte ainda não está acessível pela *API* do *Robot*.

### 3.1.4 Restrições

Restrições do sistema de apoio (engastadas) foram impostas na base do edifício, uma vez que apenas o comportamento da superestrutura é investigado. E as ligações entre vigas e pilares foram mantidas como nós rígidos no modelo estrutural de pórticos, para efeito de estudos.

Referente aos limites de largura das vigas e pilares foram empregues restrições diferentes para os pórticos e para as vigas, esses valores encontram-se no item seguinte. Os limites de flechas, as taxas de armaduras máximas e mínimas foram definidos diretamente no *Matlab*, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014). E as combinações de cálculo utilizadas no *Robot* foram:

- Para o Estado Limite Último (ELU) foi adotado a combinação última normal para o esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de concreto armado conforme Equação 10:

$$Fd = 1,4g + 1,4q \quad (10)$$

- Para o Estado Limite de Serviço (ELS), em específico para cálculo de flecha em vigas, adotou-se a combinação quase permanente de acordo com a Equação 11:

$$Fd, ser = 1,0g + 0,3q \quad (11)$$

Demais cálculos foram realizados de acordo com Eurocode 2/2014, pois no *Robot* não está implementada a Norma Brasileira de Dimensionamento e Cálculo estrutural. Outro ponto a se destacar, que nesse estudo não se considerou a verificação da linha neutra em vigas, nem as restrições quanto ao cisalhamento.

### 3.2 Implementação Computacional

Para o processo de otimização utilizou-se o software *Matlab* o qual foi integrado ao software *Robot Structural Analysis* para obtenção dos resultados, de acordo com as funções objetivo definidas. Para este estudo a otimização foi realizada por meio dos algoritmos genéticos.

Para iniciar o processo de otimização, foram criados 3 arquivos no *Matlab*:

- Cálculo: “chama” a função objetivo e as restrições. Contêm os parâmetros de otimização do algoritmo genéticos;
- Função Objetivo: função de otimização propriamente dita;
- Restrições: apresenta todo processo de interligar os softwares *Matlab* e *Robot*, além das restrições de cálculo que não estão previamente configuradas no *Robot*.

A função do algoritmo genético adotada está representada na Equação 12, na qual todos os parâmetros relacionados ao método de otimização podem ser modificados.

$$[x, fval, exitflag, output] = ga(FObjetivo, nvars, [], [], [], [], lb, ub, Restr, options) \quad (12)$$

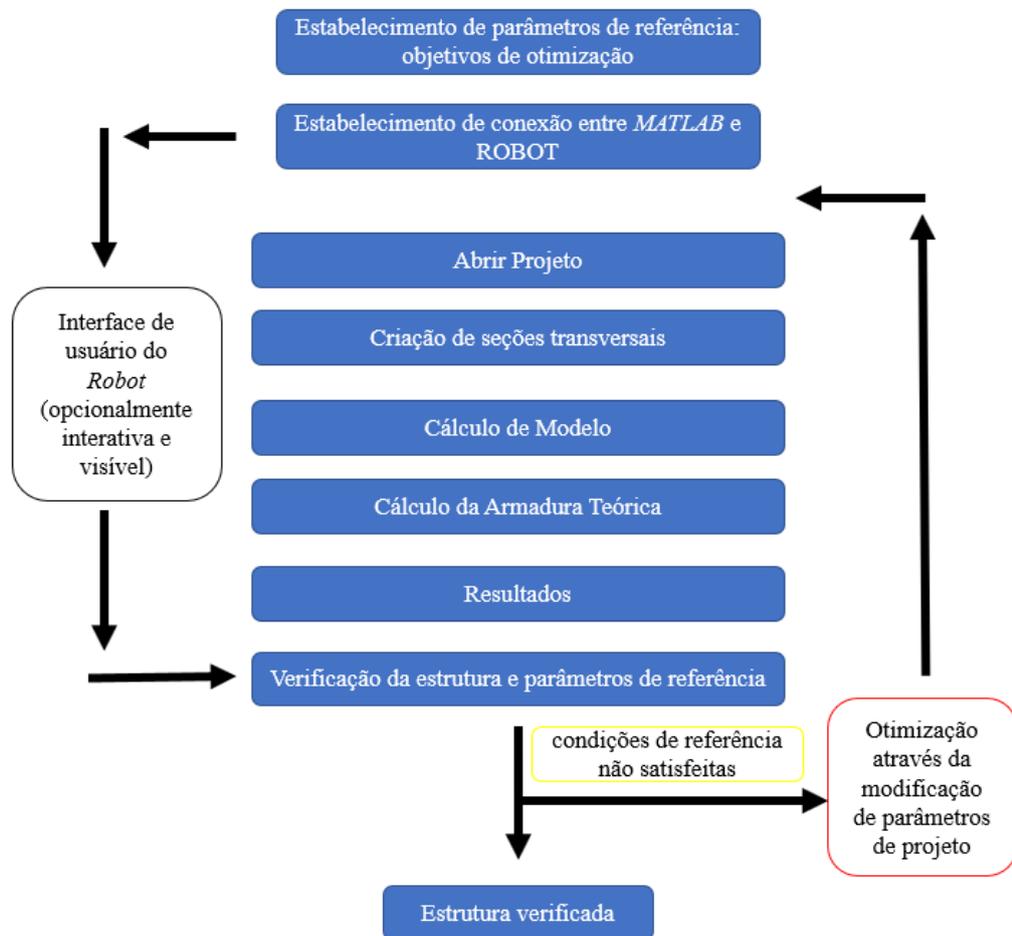
De acordo com Equação 12, os valores entre colchetes representam os valores finais do processo da otimização, sendo ( $x$ ) o valor ótimo das variáveis ou de uma variável, ( $fval$ ) representa o valor da função objetivo, o ( $output$ ) informa alguns dados de saída como o número de gerações, e o ( $exitflag$ ) informa o critério de parada, podendo ser:

- 0 → algoritmo para por ter alcançado o número máximo de gerações;
- 1 → (ideal) algoritmo para por não haver mudança significativa nos resultados em relação a função objetivo;
- -2 → Nenhum ponto viável encontrado
- Entre outros valores (-5 a 5) que podem ser encontrados na documentação do *Matlab*.

Os dados entre parênteses apresentam as informações para que a otimização aconteça. Para esse processo foram utilizados a função objetivo ( $FObjetivo$ ), número de variáveis que se deseja otimizar ( $nvars$ ), limite inferior ( $lb$ ) e superior ( $ub$ ) das variáveis, restrições de cálculo ( $Restr$ ), opções do algoritmo genético ( $options$ ) e caso alguma informação não seja necessária deve-se inserir espaços em branco entre colchetes.

Após a criação dos 3 arquivos e a modelagem de um modelo estrutural no *Robot*, é iniciado o processo de otimização, o qual está brevemente esquematizado na Figura 4.

Figura 4: Metodologia geral da otimização por meio do *Robot* e *Matlab*



Fonte: Autoria Própria

De acordo com a Figura 4, as opções de tornar a interface do usuário do *Robot* visível e interativa são arbitrárias, pois a conexão com a *API* já permite que todas as operações subsequentes sejam executadas em segundo plano. E quando a interface do usuário do *Robot* estiver visível e interativa, qualquer operação executada em um dos dois ambientes (ou seja, *Matlab* e *Robot*) refletirá no outro.

Se os resultados e as verificações cumprirem os objetivos, nenhuma análise adicional será necessária, caso contrário, serão feitos ajustes personalizados nos parâmetros do projeto e o processo será repetido iterativamente até a completa satisfação dos mesmos.

### 3.2.1 Conexão com o *Robot*

Para estabelecer a conexão entre os softwares é necessário a criação, no *Matlab*, de um elemento da classe *RobotApplication*, o qual fornece acesso ao núcleo do programa (*Robot*), permitindo o gerenciamento de janelas, projetos abertos, entre outros. O gerenciador de projetos pode ser acessado por meio objeto da classe *RobotProject*, pelo qual é possível criar um projeto

e manipular. Para acessar modelo estrutural deve-se utilizar o comando *RobotStructure*, presente no *Robot Project*. Por meio desse, torna-se possível a manipulação da geometria, executar a análise e obter os resultados desejados, um exemplo de acesso ao Robot está esquematizado na Figura 5 (figuras semelhantes a essa, representam partes da programação realizada no *Matlab*).

Figura 5: Exemplo de acesso ao *Robot* em um projeto

```
Robot=actxserver ('Robot.Application');
Robot.Interactive=1;%1 robot mostra o que está sendo feito, 0--> não mostra
set (Robot,'Visible',1); %1 robot abre, 0--> robot não abre
Robot.Project.Open ('C:\Users\Fabio\Desktop\Mestrado-matérias\Robot\teste4m.rtd')
invoke (Robot.Project.Preferences);
Robot.Project.Structure
```

Fonte: A autoria Própria

#### 4.2.1.1 Criação de seção transversal

As seções transversais são criadas por meio de *Labels*, utilizando o objeto *RobotStructure*, e atribuídas as barras (vigas e pilares). Na Figura 6 exemplifica-se esse processo para uma viga com seção transversal de 0,14x0,30 m.

Figura 6: Criação de Seção Transversal

```
%Seção de barras
LabelSection=Robot.Project.Structure.Labels.Create('I_LT_BAR_SECTION', "V1_14x30");
Section=LabelSection;
Section.Data.ShapeType=('I_BSST_CONCR_BEAM_RECT');
Concrete=Section.Data
Section.Data.Concrete.SetValue('I_BSCDV_BEAM_RECT_B', 0.14)
Section.Data.Concrete.SetValue('I_BSCDV_BEAM_RECT_H', 0.30)
Robot.Project.Structure.Labels.Store(LabelSection)
Robot.Project.Structure.Bars.Get(1).SetLabel ('I_LT_BAR_SECTION', "V1_14x30");
```

Fonte: A autoria Própria

#### 4.2.2.1 Execução da análise

Para executar a análise do projeto utiliza-se o objeto da classe *RobotCalcEngine*, o qual também é acessado pelo *RobotProject*, juntamente com o método *Calculate*, conforme indicado na Figura 7.

Figura 7: Executar análise

```
%Calcular estrutura
Robot.Project.CalcEngine.Calculate
```

Fonte: A autoria Própria

#### 4.2.3.1 Resultado de esforços

Após efetuada a análise do projeto, os resultados são obtidos pelo objeto da classe *RobotStructure*, juntamente com o comando *Results*. Um exemplo de obtenção do momento fletor em uma viga está representado na Figura 8.

Figura 8: Momento Fletor

```
%Momento Fletor
Myl=Robot.Project.Structure.Results.Bars.Forces.Value(1,11,0).My./1000
```

Fonte: Autoria Própria

#### 4.2.4.1 Obtenção da armadura teórica

Para ter-se acesso aos resultados da armadura teórica, foi utilizado o objeto da classe *ConcrReinfEngine*. Na Figura 9, está representado sua aplicação, bem como os membros presentes no dimensionamento, os casos de carregamento, e quantidade de pontos definidos para o cálculo da armadura de uma viga ao longo do elemento estrutural.

Figura 9: Configuração para obtenção de armadura

```
RCEngine=Robot.Kernel.ConcrReinfEngine
MemberEngine=RCEngine.MemberRequiredReinf
BarParams=MemberEngine.Params
BarParams.BeamPointsType=('I_CBCPDT_POINT_COUNT')
BarParams.BeamPointsValue = (5)
Robot.Project.Structure.Selection
BarParams.CasesULS.FromText("11")
BarParams.CasesSLS.FromText("12")
BarParams.Members.FromText("1 2 3");
%calcula
MemberEngine.Calculate
```

Fonte: Autoria Própria

Para obter-se a área de armadura teórica, foi necessário a utilização de códigos (Quadro 1) encontrados nos fóruns de discussão da *Autodesk/Robot*. Um exemplo dessa aplicação em uma viga está representado na Figura 10.

Quadro 1: Códigos para obtenção de armaduras

Descrição	Código
Armadura Longitudinal Superior Requerida	919
Armadura Longitudinal Inferior Requerida	920
Armadura Transversal Requerida	1947

Fonte: Autoria Própria

Figura 10: Exemplo de obtenção de armaduras teóricas

```

%resultado armadura Viga
%longitudinal
Robot.Project.Structure.Results.Any.Bar = 1;%barra 1
Robot.Project.Structure.Results.Any.CalcPoint = 5;%resultado no ponto 5
Robot.Project.Structure.Results.Any.ResultId = 919 %Armadura superior
Armsup=Robot.Project.Structure.Results.Any.ResultValue*10000
Robot.Project.Structure.Results.Any.CalcPoint = 3;%resultado no ponto 3
Robot.Project.Structure.Results.Any.ResultId = 920%Armadura inferior
Arminf=Robot.Project.Structure.Results.Any.ResultValue*10000
%transversal
Robot.Project.Structure.Results.Any.Bar = 1;%barra 1
Robot.Project.Structure.Results.Any.CalcPoint = 1;
Robot.Project.Structure.Results.Any.ResultId = 1947
armt=Robot.Project.Structure.Results.Any.ResultValue*7850*vao*(bw+ x(1))

```

Fonte: Autoria Própria

De acordo com a Figura 10, observa-se que é necessário selecionar o elemento estrutural, informar um ponto do elemento e qual tipo de armadura deseja-se obter. Para a obtenção das armaduras teóricas nos pilares segue-se a mesma lógica, porém é necessário informar apenas um ponto ao longo do elemento.

### 3.2.2 Configurações do computador

As configurações do computador a ser utilizado nos processos de otimização tendem a influenciar significativamente nos resultados (nesse estudo o processador teve maior influência), dessa forma abaixo está listado as configurações do computador utilizado nesse trabalho:

- Memória: 8GB
- Processador: Intel Core i7 3537U 2.0GHz
- Placa de vídeo dedicada: NVIDIA GEFORCE 740M 2GB
- HDD: 1TB+24GB(SSD)
- Sistema Operacional: Windows 10 Pro

### 3.3 Calibração do Programa

Com a finalidade de garantir que o processo de otimização esteja retornando os melhores resultados foi realizada a calibração do algoritmo genético. Para melhor compreensão do processo, abaixo estão listados parâmetros possíveis de serem alterados no *Matlab*:

- *ConstraintTolerance/TolCon* (Tolerância de restrição): tolerância em relação as restrições não lineares;
- *FunctionTolerance/TolFun* (Tolerância da função): tolerância entre os valores da função objetivo;

- *InitialPopulation* (Tamanho da População Inicial): quantidade de indivíduos que formam a primeira geração;
- *PopulationSize* (Tamanho da População): quantidade de indivíduos que formam todas as próximas gerações;
- *CrossoverFcn* (Função de Cruzamento): função para criar filhos;
- *CrossoverFraction* (Fração de Cruzamento): taxa de indivíduos que passam para o cruzamento;
- *EliteCount* (Contagem de Elite): estabelece quantos indivíduos vão permanecer na próxima geração;
- *InitialPenalty* (Penalidade Inicial): valor de penalização inicial dos resultados;
- *PenaltyFactor* (Fator de Penalidade): valor que atualiza a penalidade inicial;
- *MaxGenerations/Generations* (Máximas Gerações): número máximo de gerações permitidas;
- *SelectionFcn* (Função de Seleção): tipo de função que seleciona os pais para cruzamento;
- *MutationFcn* (Função de Mutação): tipo de função que realiza a mutação (possível especificar a taxa de mutação);

Primeiramente, otimizou-se uma viga biapoiada com apenas uma variável adotando-se as configurações *default* do algoritmo genético encontrados no *Matlab* (Quadro 2). Para essa situação, o tempo de processamento para otimizar a viga foi superior a 24 horas, o que inviabilizaria o projeto em si.

Quadro 2: Parâmetros *default* GA utilizados

Opção	Parâmetro
TolCon	1,00E-03
ToIFun	1,00E-06
PopulationSize	50
Initial Penalty	10
MigrationDirection	forward
MigrationFraction	0,2
MigrationInterval	20
Generations	100*(n° de variáveis)
PenaltyFactor	100
SelectionFcn	selectionstochunif
EliteCount	2(somente n° inteiro)
CrossoverFcn	crossoverscattered

Fonte: Autoria Própria

Diante desse resultado, alterou-se diversos parâmetros do algoritmo genético com a finalidade de reduzir o tempo computacional. Além disso, com o intuito de empregar no mínimo duas variáveis na calibração do programa, utilizou-se um pórtico plano que possui as mesmas características do trabalho realizado por Boito (2016). O pórtico plano (Figura 11) possui 4 m

de comprimento, e altura de 3 m, os carregamentos da viga são compostos por uma carga permanente de 16 KN/m e sobrecarga de 7 KN/m em todo o vão e peso próprio é calculado automaticamente pelo software. As variáveis adotadas foram a altura da viga e o comprimento do pilar (Figura 3), ambas variando de 0,20 a 1,00 m, o bw adotado foi de 0,20 m. Já os custos dos materiais englobando a mão de obra encontram-se no Quadro 3.

Figura 11: Exemplo do Pórtico Plano



Fonte: Autoria Própria

Quadro 3: Custo de Materiais 2016

Material	Unidade	Custo (R\$)
CA50	kg	10,04
CA60	kg	10,04
Formas	m <sup>2</sup>	59,00
C25	m <sup>3</sup>	333,47

Fonte: Adaptado de Boito (2016)

Após diversos testes, nos quais foram alterados os tipos de funções, penalidades, tolerâncias, entre outros itens do AG, sendo mantido como padrão para outras análises, todos aqueles representados no Quadro 4, exceto o tamanho da população e os indivíduos de elite.

Quadro 4: Parâmetros Adotados para o Algoritmo Genético

Opção	Parâmetro
TolCon	1,00E-03
TolFun	1,00E-06
PopulationSize	VAR
CrossoverFcn	0,8
CrossoverFraction	crossoverscattered
EliteCount	VAR
InitialPenalty	10
PenaltyFactor	10
Generations	10
SelectionFcn	selectiontournament,2
MutationFcn	mutationuniform, 0,05

Fonte: Autoria Própria

Conforme o Quadro 4, *TolCon* e *TolFun*, foram mantidos como *default* do *Matlab*, a população e os indivíduos de elite foram diferentes para a maioria dos exemplos, serão justificados no item seguinte. A taxa de crossover definida foi de 80%, as penalidades foram mantidas constantes, o número máximo de gerações permitidas foi fixado em 10, a forma de seleção dos indivíduos foi por meio do torneio (2 indivíduos) e taxa de mutação foi fixada em 5%.

Feito isso, foi analisado o pórtico plano, empregando os parâmetros do Quadro 4 e um indivíduo de elite. Os resultados da análise encontram-se no Quadro 5. Vale salientar que as variáveis foram arredondadas em múltiplos de 5 cm.

Quadro 5: Análise Pórtico Plano com vão de 4 m

PS	X1 (m)	X2 (m)	Custo (R\$)	Tempo(s)	Fcount
10	0,40	0,20	1146,90	923	560
10	0,35	0,40	1362,90	923	560
10	0,35	0,20	1137,70	903	560
10	0,40	0,35	1303,80	827	560
15	0,35	0,20	1137,70	1404	840
15	0,45	0,25	1221,60	1403	840
15	0,35	0,25	1216,60	1352	840
15	0,35	0,20	1137,70	1527	840
20	0,40	0,25	1190,00	1948	1120
20	0,40	0,25	1190,00	2298	1120
20	0,45	0,20	1174,40	2031	1120
20	0,35	0,20	1137,70	2119	1120
25	0,40	0,20	1146,90	2860	1400
25	0,40	0,25	1190,00	2803	1400
25	0,40	0,20	1146,90	2754	1400
25	0,35	0,20	1137,70	2698	1400
Valor ótimo					

Fonte: Autoria Própria

De acordo com o Quadro 5, foram realizados 4 cálculos repetidos para as populações de 10, 15, 20 e 25 indivíduos, em dias diferentes ou ao reiniciar o *Matlab* ou ao restaurar as configurações da geração dos números aleatórios, para evitar qualquer consideração do resultado anterior após cada nova análise, pois percebeu-se que toda vez que reiniciava o programa os resultados da otimização eram os mesmos que o anterior. Justifica-se isso, pelo motivo do algoritmo genético ser estocástico, em outras palavras, faz escolhas aleatórias (MATHWORKS, 2018).

Quanto ao número de gerações obteve-se 5 para todos os cálculos, e o valor de saída (*exitflag*) foi igual a 1, o que representa que os resultados estão certos, podendo este não ser necessariamente o melhor.

Também buscou-se saber dentre essas populações qual apresentaria a melhor média do custo e do tempo, os resultados encontram-se no Quadro 6.

Quadro 6: Média do custo e tempo

PS	Custo (R\$)	Tempo(s)
10	1237,83	894,00
15	1178,40	1421,50
20	1173,03	2099,00
25	1155,38	2778,75

Fonte: Autoria Própria

De acordo com o Quadro 6, a melhor média do custo é para a população de 25 indivíduos, no entanto o tempo de análise em comparação a população de 20, é de quase 11,33 minutos superior (32,38%), porém o custo econômico é de R\$ 17,65 a menos, o que representa 1,50%. Dessa forma, adotou-se como padrão a população de 20 indivíduos, bem como os demais parâmetros relacionados no Quadro 4.

## 4. ANÁLISES NUMÉRICAS E RESULTADOS

Com o objetivo de validar o procedimento empregado, neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para as vigas e pórticos analisados. Para os elementos estruturais, foi adotado um detalhamento simplificado, ou seja, não foi feito o escalonamento das armaduras. Além disso, como dito anteriormente foi considerado a armadura teórica fornecida pelo *Robot*.

A título de parâmetro de comparação, para o carregamento das vigas (Exemplos 1, 2 e 3), considerou-se as mesmas cargas empregadas no trabalho realizado por Medeiros e Kripka (2013), uma carga permanente de 16 KN/m e sobrecarga de 7 KN/m em todo o vão, com o intuito de abranger uma faixa de carregamentos que vigas usuais de edificações estão submetidas. Enquanto que o peso próprio é calculado pelo software. Essas ponderações são as mesmas empregadas no trabalho de Boito (2016), utilizada na calibração do programa.

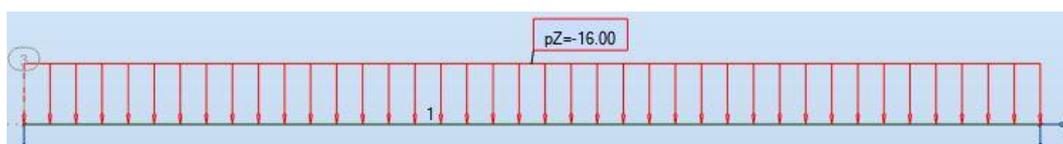
Para cada solução encontrada nos Exemplos 1, 2, 3, 4 e 5 foram efetuados apenas um cálculo em virtude do tempo computacional elevado para realizar uma análise (principalmente para os dois últimos exemplos).

### 4.1 Exemplo 1

O primeiro exemplo consiste em analisar os efeitos do comprimento do vão em relação ao custo econômico ótimo para uma viga biapoiada (Figura 12) para diferentes resistências características do concreto ( $f_{ck}$ 's) considerando:

- comprimento variando entre 3 a 10 metros, com incremento de 1 metro a cada novo cálculo;
- $b_w = 0,15$  m;
- $X_1$  variável de projeto (contínua): Altura da seção (Figura 3a), variando entre 0,20 a 1,20 metros;
- Adotou-se 10 indivíduos (AG).

Figura 12: Exemplo de Viga Biapoiada



Fonte: Autoria Própria

Os custos dos materiais sem contabilizar as despesas com a mão de obra, foram obtidos do trabalho realizado por Medeiros e Kripka (2013), conforme apresentado no Quadro 7.

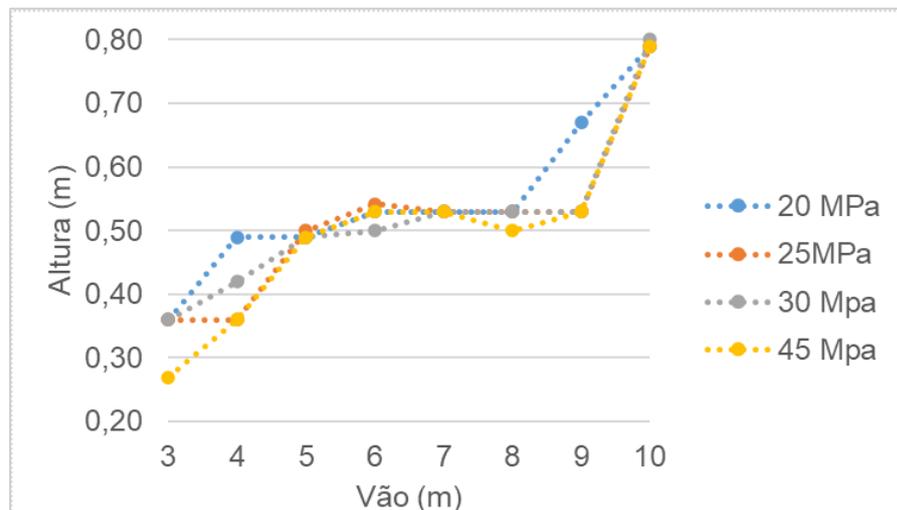
Quadro 7: Custos de materiais (2013) sem considerar mão de obra

Material	Unidade	Custo (R\$)
CA50	kg	3,97
CA60	kg	3,89
Formas	m <sup>2</sup>	8,68
C20	m <sup>3</sup>	213,07
C25	m <sup>3</sup>	233,55
C30	m <sup>3</sup>	252,70
C45	m <sup>3</sup>	303,71

Fonte: Adaptado de Medeiros e Kripka (2013)

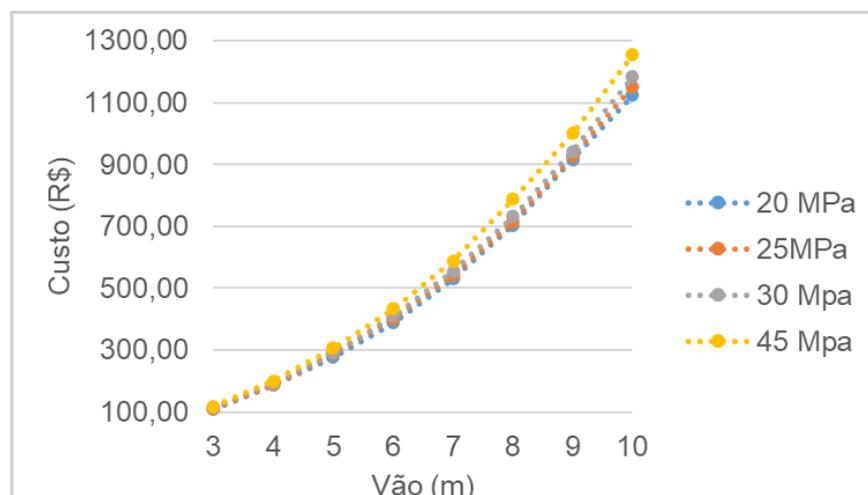
Na Figura 13 estão representados os resultados obtidos do processo de otimização, levando em conta a relação entre altura das vigas e o vão para os fck's adotados. E na Figura 14, estão representados os custos obtidos para a viga em análise.

Figura 13: Viga Biapoiada : Altura x Vão, para diferentes fck's



Fonte: Autoria Própria

Figura 14: Viga Biapoiada: Custo x Vão, para diferentes fck's



Fonte: Autoria Própria

De acordo com a Figura 13, percebe-se que conforme aumentou o vão as alturas das vigas não aumentaram de forma linear, e correu apenas duas oscilações para o fck de 25 MPa no vão de 6m e no vão de 8m para o fck de 45 MPa. Além disso, a maioria das alturas ficaram abaixo de 60 cm, dispensando o emprego de armadura de pele, isso pode ser explicado por causa do aço ser responsável pela maior contribuição no custo total da viga.

Ao analisar a Figura 14, percebe-se que o custo para ambos os vãos e resistências apresentaram valores crescentes e similares, mas para a resistência de 45 MPa os custos foram maiores, por isso, normalmente as vigas de concreto com um fck maior levam a estruturas mais onerosas, não compensando sua utilização do ponto de vista econômico.

Ao comparar os resultados obtidos nesse trabalho [Huppes (2021)] para as vigas biapoiadas em relação aos resultados encontrados por Medeiros e Kripka (2013) (Quadros 8, 9, 10 e 11), percebe-se que houve diferenças percentuais significativas principalmente para as alturas das vigas, sendo a maior de 39,08%, e a maior diferença obtida para os custos foi de 15,58%. Em geral, os custos foram praticamente superiores em todas as análises, exceto para o fck de 20 MPa no vão de 8 metros.

Quadro 8: Fck 20 MPa, Medeiros e Kripka (2013) x Huppes (2021)

Vão (m)	Medeiros e Kripka (2013)		Huppes (2021)		Diferença	
	Altura (m)	Custo (R\$)	Altura (m)	Custo (R\$)	Altura (%)	Custo (%)
3	0,35	96,58	0,36	108,60	2,86	12,45
4	0,45	166,11	0,49	186,27	8,89	12,14
5	0,56	255,17	0,49	275,74	-12,50	8,06
6	0,59	367,09	0,53	389,26	-10,17	6,04
7	0,60	525,29	0,53	529,66	-11,67	0,83
8	0,82	707,89	0,53	703,13	-35,37	-0,67
9	0,92	896,82	0,67	917,15	-27,17	2,27
10	1,02	1109,87	0,79	1123,80	-22,55	1,26

Fonte: Autoria Própria

Quadro 9: Fck 25 MPa, Medeiros e Kripka (2013) x Huppes (2021)

Vão (m)	Medeiros e Kripka (2013)		Huppes (2021)		Diferença	
	Altura (m)	Custo (R\$)	Altura (m)	Custo (R\$)	Altura (%)	Custo (%)
3	0,33	97,40	0,36	111,16	9,09	14,13
4	0,43	167,41	0,36	187,62	-16,28	12,07
5	0,53	257,01	0,50	287,12	-5,66	11,72
6	0,59	367,23	0,54	401,26	-8,47	9,27
7	0,59	512,49	0,53	541,52	-10,17	5,66
8	0,78	708,16	0,53	716,00	-32,05	1,11
9	0,87	896,67	0,53	926,92	-39,08	3,37
10	0,97	1109,10	0,79	1151,70	-18,56	3,84

Fonte: Autoria Própria

Quadro 10: Fck 30 MPa, Medeiros e Kripka (2013) x Huppés (2021)

Vão (m)	Medeiros e Kripka (2013)		Huppés (2021)		Diferença	
	Altura (m)	Custo (R\$)	Altura (m)	Custo (R\$)	Altura (%)	Custo (%)
3	0,31	R\$ 98,48	0,36	113,82	16,13	15,58
4	0,40	R\$ 169,05	0,42	191,83	5,00	13,48
5	0,50	R\$ 259,27	0,49	291,87	-2,00	12,57
6	0,59	R\$ 369,68	0,50	411,07	-15,25	11,20
7	0,60	R\$ 509,44	0,53	553,92	-11,67	8,73
8	0,75	R\$ 710,51	0,53	731,83	-29,33	3,00
9	0,84	R\$ 899,30	0,53	943,63	-36,90	4,93
10	0,93	R\$ 1.111,93	0,80	1183,60	-13,98	6,45

Fonte: Autoria Própria

Quadro 11: Fck 45 MPa, Medeiros e Kripka (2013) x Huppés (2021)

Vão (m)	Medeiros e Kripka (2013)		Huppés (2021)		Diferença	
	Altura (m)	Custo (R\$)	Altura (m)	Custo (R\$)	Altura (%)	Custo (%)
3	0,26	103,70	0,27	118,53	3,85	14,30
4	0,34	177,65	0,36	200,63	5,88	12,94
5	0,42	271,88	0,49	306,75	16,67	12,83
6	0,50	386,75	0,53	432,80	6,00	11,91
7	0,57	522,61	0,53	588,89	-7,02	12,68
8	0,63	727,58	0,50	787,58	-20,63	8,25
9	0,70	918,94	0,53	1001,50	-24,29	8,98
10	0,78	1133,84	0,79	1253,80	1,28	10,58

Fonte: Autoria Própria

Na maior parte das análises, mesmo quando as diferenças das alturas foram menores que 3%, os custos ainda foram superiores chegando a 12,45%, o que significa que o *Robot* tende a aumentar o consumo de aço nas vigas em comparação ao programa de otimização desenvolvido por Medeiros e Kripka (2013).

Em relação a porcentagem de contribuição dos materiais no custo total da viga, o aço representou em média 58%, seguido pelo concreto com 27% e as formas com 15%. No Quadro 12 encontram-se a representatividade média de cada material por fck, na contribuição dos custos totais da viga.

Quadro 12: Contribuição percentual média dos materiais no custo total das vigas

Fck (MPa)	Aço	Concreto	Formas
20	58%	26%	16%
25	59%	26%	15%
30	58%	28%	15%
45	57%	30%	13%
Geral	58%	27%	15%

Fonte: Autoria Própria

Outro ponto importante a se destacar foi o tempo de otimização, que variou de 964 a 3358 segundos por análise, tendo como média geral aproximadamente 25 minutos. A oscilação de tempo justifica-se por ter ocorrido maior número de gerações em certas análises, variando de cinco até oito gerações.

## 4.2 Exemplo 2

O segundo exemplo refere-se em analisar os efeitos do comprimento do vão em relação ao custo econômico e ambiental ótimo para um pórtico plano simples (já ilustrado na calibração do algoritmo, Figura 11) considerando:

- Comprimento variando entre 3 a 10 metros, com incremento de 1 metro a cada novo cálculo;
- Altura do pórtico igual a 3 metros;
- $b_w = 0,20$  m;
- $X_1$  e  $X_2$  variáveis de projeto (Figura 3), variando entre 0,20 a 1,00 m;
- $f_{ck} = 25$ MPa;
- Arredondamento das variáveis, em múltiplos de 5 cm.

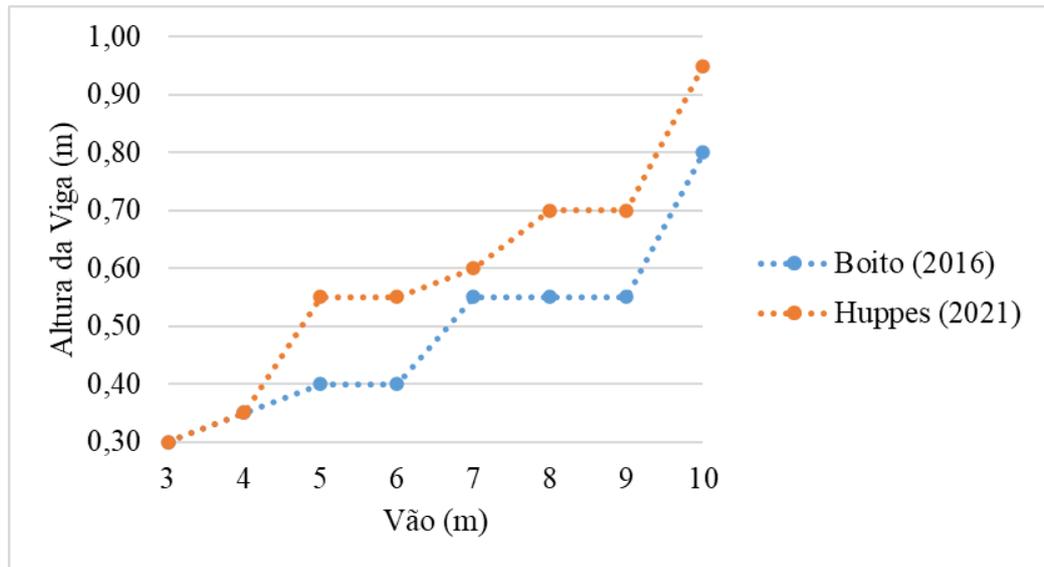
Os custos dos materiais foram obtidos do trabalho realizado por Boito (2016) conforme já elencado no Quadro 3. No quadro 13, estão representados os resultados ótimos obtidos para as alturas das vigas, comprimento dos pilares e custos. Com a finalidade de comparar os resultados com aqueles obtidos por Boito (2016), nas Figuras 15 e 16 estão representados os resultados ótimos obtidos para as alturas das vigas e custo econômico do pórtico respectivamente.

Quadro 13: Dimensões e custo otimizados do Pórtico Plano simples

Vão (m)	Altura da Viga (m)	Comprimento do Pilar (m)	Custo (R\$)
3	0,30	0,20	895,24
4	0,35	0,20	1137,70
5	0,55	0,25	1599,40
6	0,55	0,25	1941,50
7	0,60	0,25	2443,80
8	0,70	0,25	3149,60
9	0,70	0,20	3705,10
10	0,95	0,20	4427,40

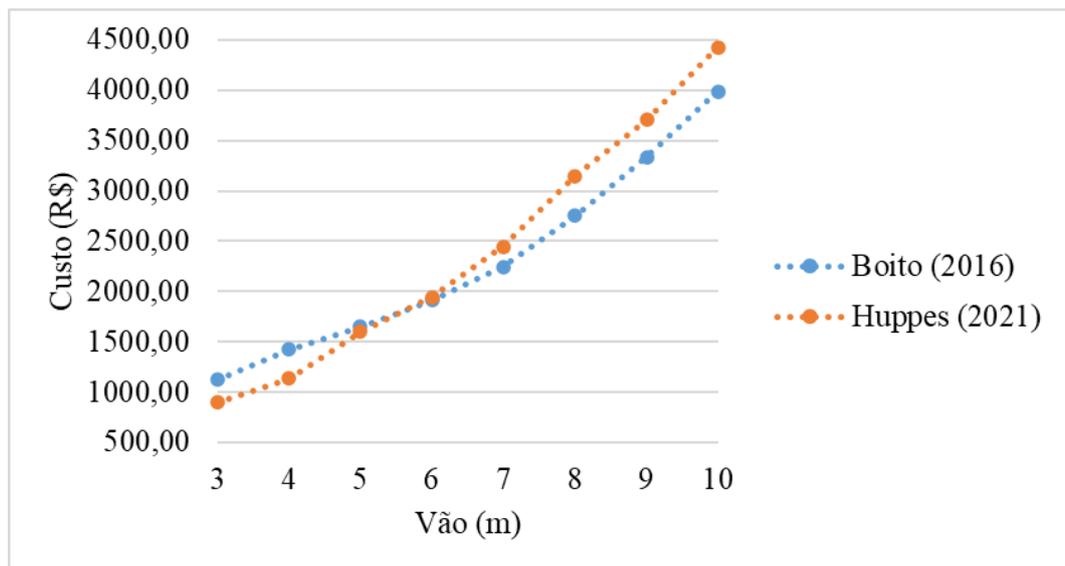
Fonte: Autoria Própria

Figura 15: Altura da viga otimizada - Pórtico Plano



Fonte: Autoria Própria

Figura 16: Custo ótimo do Pórtico Plano



Fonte: Autoria Própria

Observa-se que na Figura 15 (Huppés 2021), entre os vãos de 3 a 5 metros as alturas das vigas aumentaram conforme o comprimento do vão, da mesma forma que entre os vãos de 6 a 8 metros e no vão de 10 metros obteve-se a maior altura. Com relação às alturas ótimas para as vigas encontradas no trabalho de Boito (2016), ao comparar com os obtidos nesse trabalho, apenas nos vãos de 3 e 4 metros, obteve-se as mesmas alturas, nos demais vãos as alturas foram superiores.

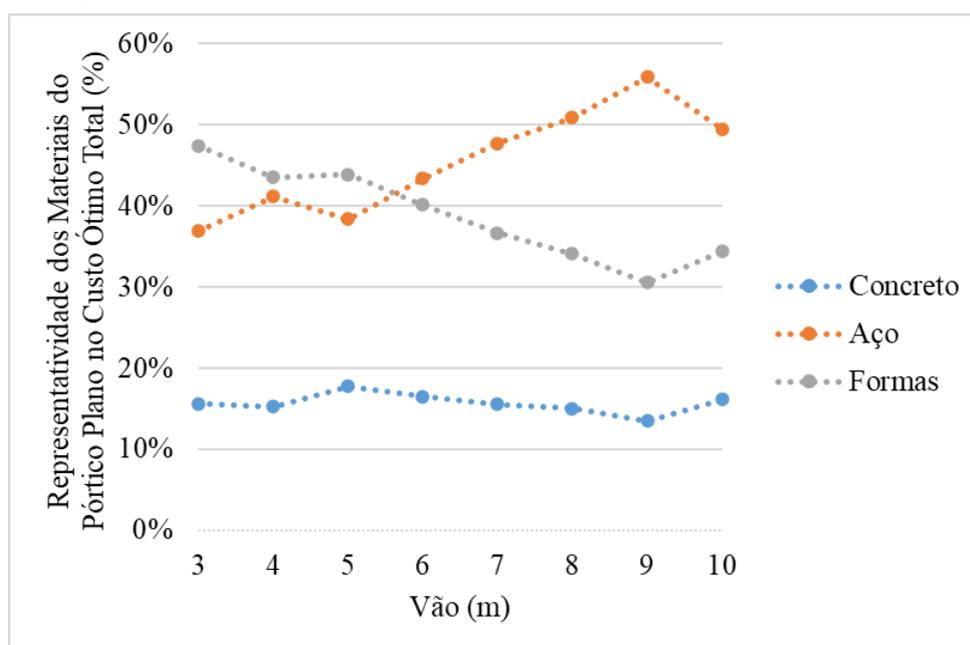
Em conformidade com a Figura 16, os custos do pórtico aumentaram conforme o comprimento do vão. Ao comparar esses custos com aqueles elencados no trabalho de Boito

(2016), os custos foram superiores entre os vãos de 6 a 10 metros, onde neste trabalho teve-se maior consumo de aço, como pode ser observado na Figura 17. A maior diferença de custos foi de R\$ 438,89 no vão de 10 metros, e a maior diferença percentual do custo (20,47%) obteve-se no vão de 3 metros, essa diferença pode ser referente ao menor consumo de aço e maior consumo de formas.

Um fator que dificultou os comparativos dos resultados, foi a inexistência de dados sobre a otimização das seções dos pilares, além de que no trabalho de Boito (2016) também foram otimizadas as barras que compõem os pilares. Sendo assim, podem haver diferenças significativas nos resultados em específico para vãos acima de 6 metros, nos quais tende a ter maior consumo de aço, tanto para as vigas como para os pilares.

Em geral, a média de contribuição dos materiais no custo total do pórtico plano foi de 45% para o aço, seguido pelas formas com 39% e o concreto com 16%.

Figura 17: Representatividade dos Materiais no Pórtico Plano simples



Fonte: Autoria Própria

A respeito do tempo de otimização do pórtico, variou de 2007 a 5999 segundos por cada análise, tendo como média geral aproximadamente 52 minutos. E o número de gerações variou de cinco a sete.

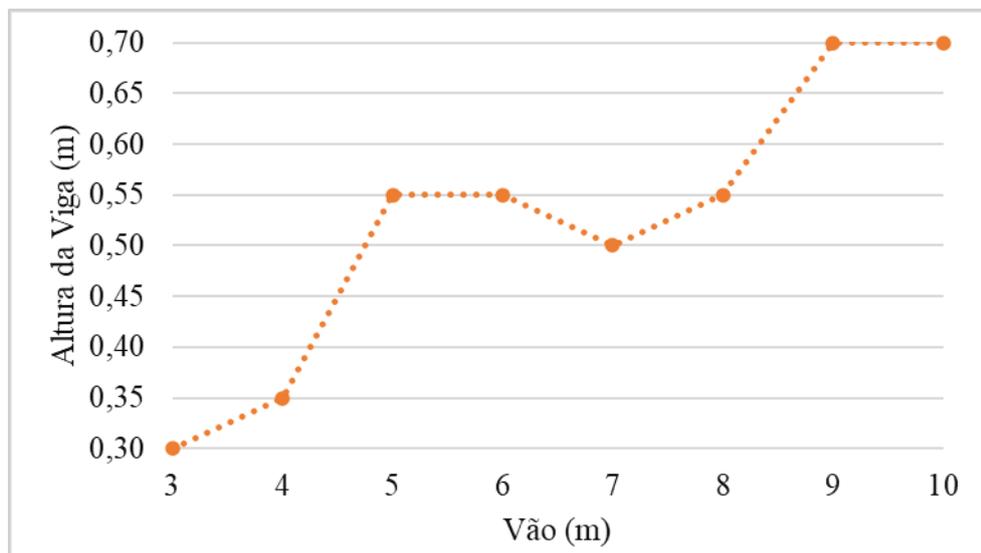
Com a finalidade de comparar os custos econômicos com os ambientais para esse exemplo, foi utilizado os valores de emissões de CO<sub>2</sub> do aço, concreto e formas, obtidos no trabalho de Santoro e Kripka (2020), os quais encontram-se no Quadro 14, cujos dados de emissões são para a região sul do país, em específico para cidade de Passo Fundo – Rio Grande do Sul.

Quadro 14: Emissões de CO<sub>2</sub>

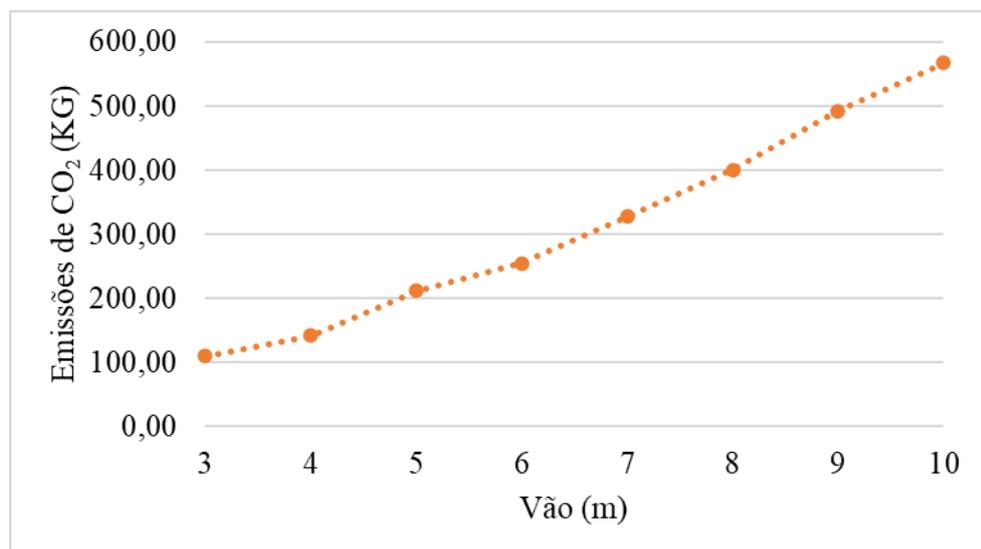
Material	Unidade	Emissões de CO <sub>2</sub>
CA50	KgCO <sub>2</sub> /kg	1,05
CA60	KgCO <sub>2</sub> /kg	1,05
Formas	KgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	1,78
C25	KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	149,26

Fonte: Adaptado de Santoro e Kripka (2020)

Nas Figuras 18 e 19 encontram-se os valores ótimos obtidos para as alturas das vigas e o custo total do pórtico plano, nessa sequência, considerando as emissões de CO<sub>2</sub>.

Figura 18: Altura ótima das vigas considerando as emissões de CO<sub>2</sub> - Pórtico Plano

Fonte: Autoria Própria

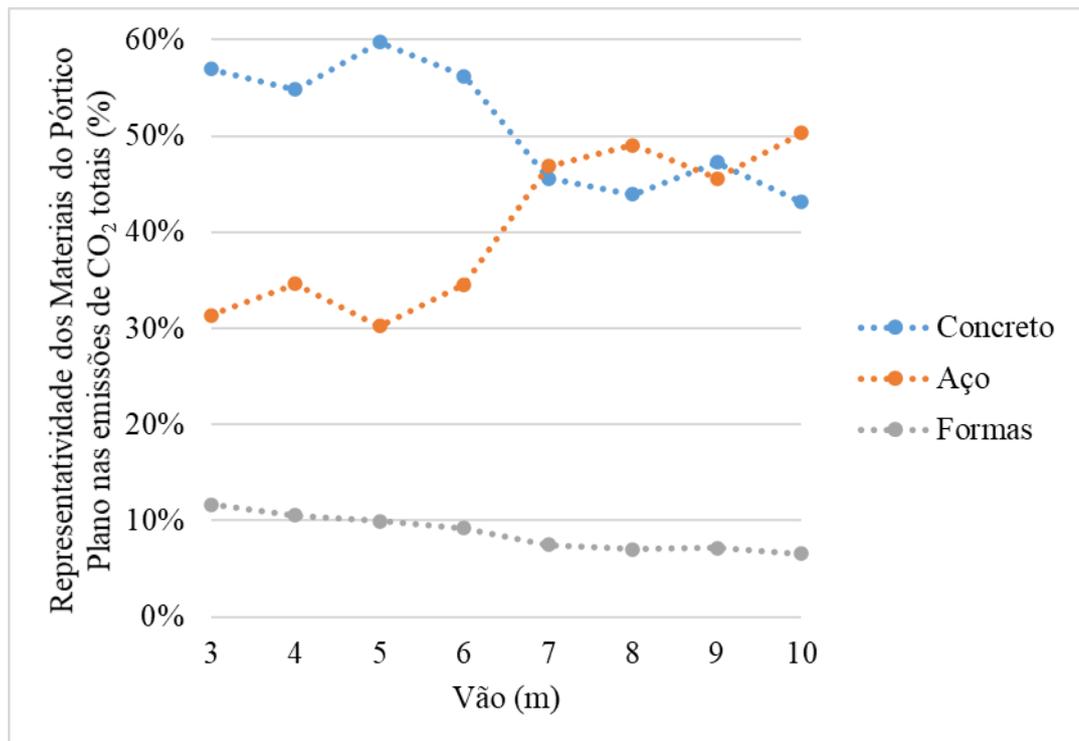
Figura 19: Emissões de CO<sub>2</sub> para o Pórtico Plano

Fonte: Autoria Própria

Ao analisar as alturas ótimas encontradas na Figura 18, percebe-se que no vão de 7 metros ocorreu uma descontinuidade no gráfico, podendo ser explicado pelo fato do concreto aumentar substancialmente as emissões de CO<sub>2</sub>, sendo que nesse vão o aço representou maior contribuição em comparação as emissões totais, conforme pode-se observado na Figura 20. Quanto as emissões de CO<sub>2</sub>, estas aumentaram conforme o comprimento do vão.

Na Figura 20 encontram-se a representatividade dos materiais do referido pórtico, levando em conta as emissões de CO<sub>2</sub>, na qual verifica-se que para os vãos entre 3 e 6 metros e no vão de 9 metros o concreto teve maior contribuição. De forma geral, a contribuição média dos materiais foi de 9% para as formas, seguido concreto e do aço com 51% e 40% respectivamente. Ao comparar as representatividades dos materiais considerando as emissões de CO<sub>2</sub> em relação ao custo econômico total, constata-se que para o custo econômico o aço e as formas possuem maior contribuição, já para as emissões o concreto e o aço apresentam maior contribuição no custo total.

Figura 20: Representatividade dos materiais no Pórtico Plano: Emissões de CO<sub>2</sub>



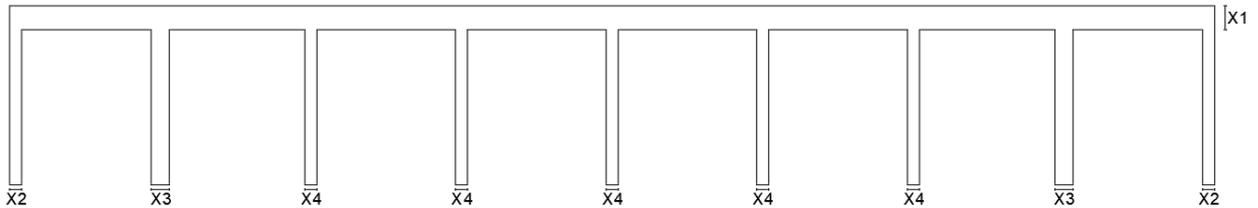
Fonte: Autoria Própria

### 4.3 Exemplo 3

O terceiro exemplo consiste em analisar a influência da quantidade de vãos em um pórtico plano de 20 metros de comprimento e 3 metros de altura (Figura 21), em relação ao custo econômico ótimo, considerando:

- De 3 a 11 pilares, com vãos igualmente espaçados;
- $b_w = 0,20$  m;
- $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  e  $X_4$  (Figura 21) variando entre 0,20 a 1,00 m;
- Custos dos materiais os mesmos do Exemplo 2, encontrados no Quadro 13.
- $F_{ck} = 25$  MPa

Figura 21: Exemplo de Pórtico Plano de Múltiplos Vãos



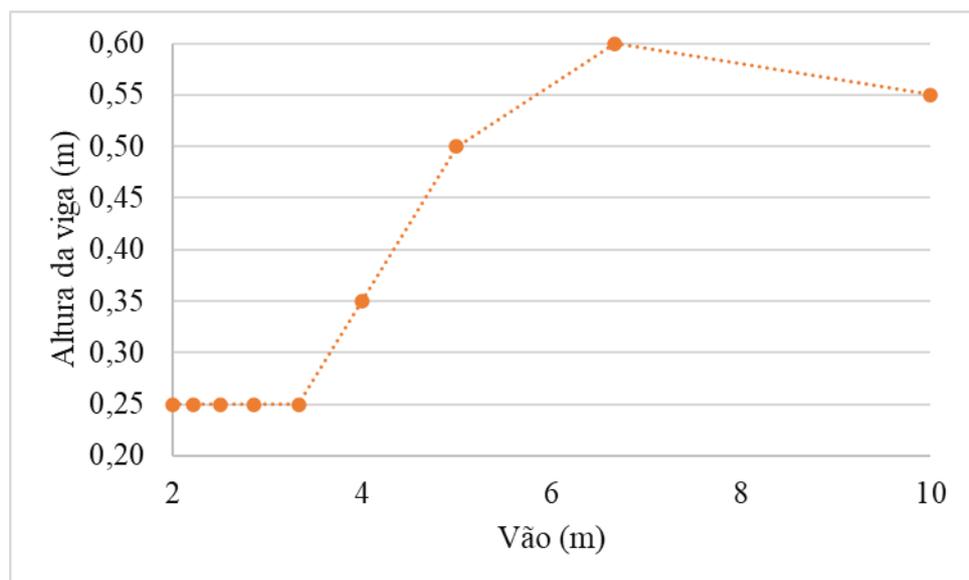
Fonte: Autoria Própria

Além disso, foram adotados os seguintes critérios para os pórticos:

- Pórticos Planos com 5 a 11 pilares:
  - foi aumentado o tamanho da população de 20 para 40 indivíduos e considerado 2 indivíduos de elite;
- Pórticos Planos com 3 e 4 pilares:
  - considerou-se 3 variáveis ( $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ ), população de 30 indivíduos e 1 indivíduo de elite.

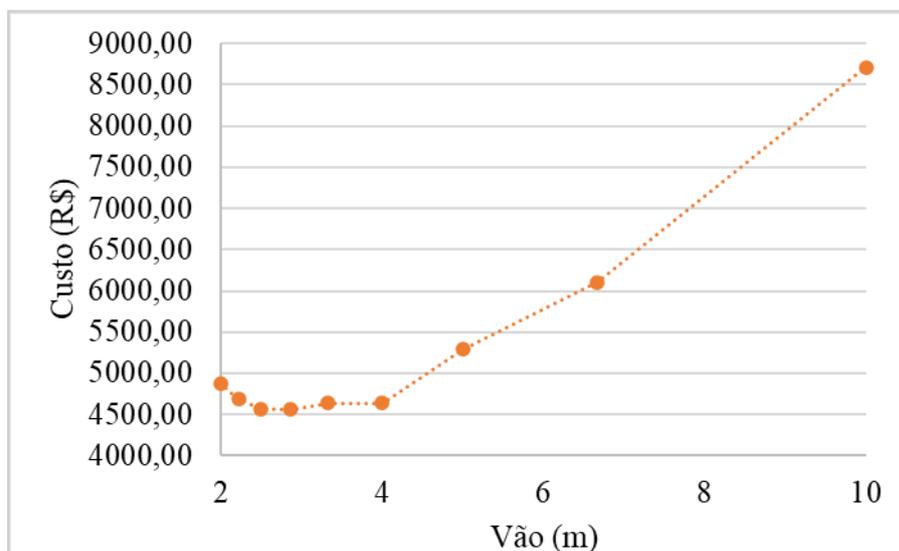
Nas Figuras 22 e 23 encontram-se os resultados ótimos das alturas das vigas e dos custos do pórtico plano de múltiplos vãos.

Figura 22: Altura ótima das vigas para Pórticos Planos de Múltiplos Vãos



Fonte: Autoria Própria

Figura 23: Custo ótimo do Pórtico Plano de Múltiplos Vãos



Fonte: Autoria Própria

De acordo com a Figura 22, nos vãos de 2,00; 2,22; 2,50; 2,86 e 3,33 metros as alturas das vigas foram constantes. No vão de 10m ocorreu uma descontinuidade no gráfico, nos demais vãos a altura da viga aumentou conforme o comprimento do vão.

Conforme a Figura 23, os menores custos foram obtidos no pórtico plano com 7 vãos de 2,86 m de comprimento cada, seguido do pórtico com 8 vãos e 2,5 m de comprimento cada. Ao comparar os custos (Quadro 15) com o trabalho de Boito (2016), verifica-se que no pórtico com vãos de 4,00 m obteve-se a menor diferença percentual, igual a -2,98% o que equivale a R\$ 142,70. Nos vãos igualmente espaçados em 2,00; 2,22; 2,50 metros também foi obtido menores custos em relação ao trabalho de Boito (2016), e nos demais vãos os custos foram superiores, tendo as maiores diferenças percentuais nos pórticos com vãos de 6,67 e 10 metros.

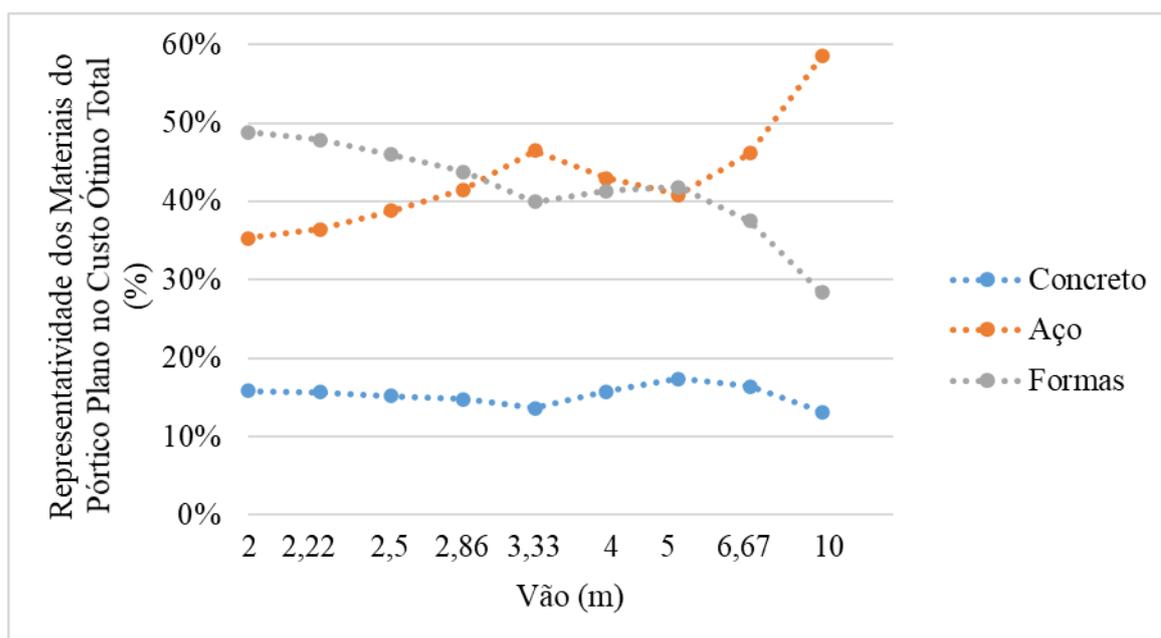
Quadro 15: Comparativo da altura da viga e do custo total para o Pórtico Plano de Múltiplos Vãos, Boito (2016) x Huppés (2021)

Vão	Boito (2016)		Huppés (2021)		Diferença	
	Altura (m)	Custo (R\$)	Altura (m)	Custo (R\$)	Altura (%)	Custo (%)
2,00	0,25	4995,02	0,25	4879,00	0,00	-2,32
2,22	0,30	4806,03	0,25	4682,50	-16,67	-2,57
2,50	0,30	4636,06	0,25	4568,60	-16,67	-1,46
2,86	0,35	4516,76	0,25	4559,60	-28,57	0,95
3,33	0,35	4442,57	0,25	4640,40	-28,57	4,45
4,00	0,40	4782,70	0,35	4640,00	-12,50	-2,98
5,00	0,45	4901,25	0,50	5288,80	11,11	7,91
6,67	0,55	5306,84	0,60	6104,50	9,09	15,03
10,00	0,75	7510,35	0,55	8715,30	-26,67	16,04

Fonte: Autoria Própria

Acerca da representatividade dos materiais sobre o custo ótimo total do pórtico plano de múltiplos vãos (Figura 24), observa-se que o concreto representou a menor contribuição no custo total do pórtico tendo como média 15%, o aço representou 43% e as formas 42%. Pode-se pontuar, ainda que, nos vãos de 2,00; 2,22; 2,50; 2,86 e 5,00 m as formas apresentaram maior parcela de contribuição no custo total e nos demais vãos o aço apresentou maior contribuição no custo total do pórtico.

Figura 24: Representatividade dos Materiais no Pórtico Plano de Múltiplos Vãos



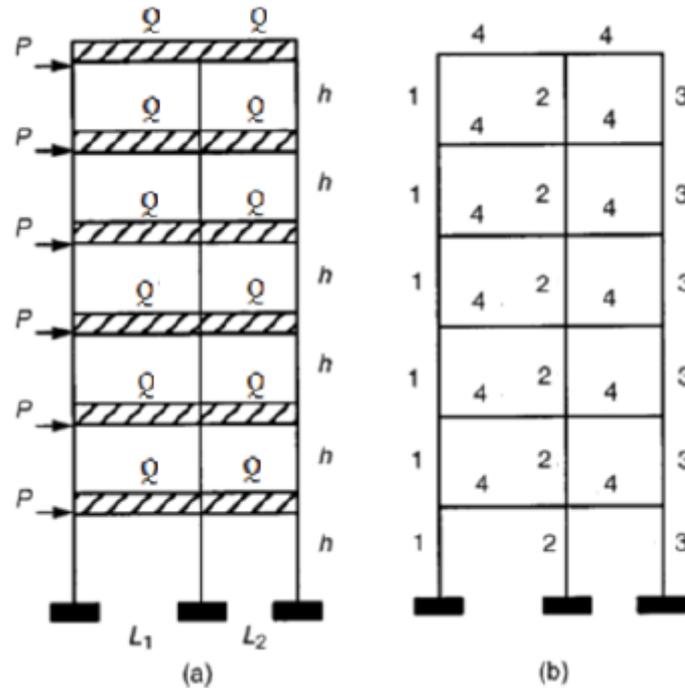
Fonte: Autoria Própria

No que se refere ao tempo de otimização do pórtico plano de múltiplos vãos, a média foi de aproximadamente 342 minutos, as análises variaram de 10559 a 56342 segundos e o número de gerações obtidas oscilou cinco a oito.

#### 4.4 Exemplo 4

O Exemplo quatro refere-se a otimização de um pórtico plano de 6 andares e 2 vãos conforme representado na Figura 25. O modelo estrutural foi retirado do trabalho de Boscardin (2017) o qual foi adaptado de Akin e Saka (2012). E visa comparar o método de otimização adotado nesse trabalho.

Figura 25: Pórtico Plano com 6 pavimentos e 2 vãos



Fonte: Boscardin (2017)

O pórtico é composto de 2 vãos, sendo  $L_1$ , o maior vão com 6 metros e  $L_2$  com 4 metros. A altura entre pavimentos é de 4 metros, o carregamento distribuído sobre as vigas ( $Q$ ) é de 30 KN/m, e também há um carregamento horizontal ( $P$ ) de 10 KN aplicado em cada andar da estrutura. O  $f_{ck}$  empregado em toda a estrutura foi de 20 MPa e a resistência característica ao escoamento do aço adotado foi de 415 MPa. Os custos dos materiais encontram-se no Quadro 16.

Quadro 16: Custos dos Materiais 2017

Material	Unidade	Custo (R\$)
CA50	kg	7,10
CA60	kg	7,10
Formas	m <sup>2</sup>	54,00
C20	m <sup>3</sup>	735,00

Fonte: Adaptado de Boscardin (2017)

A otimização foi realizada considerando o agrupamento dos elementos estruturais conforme a Figura 25b, 3 grupos de pilares e 1 grupo de viga (variáveis arredondadas em múltiplos de 5 cm). Os resultados otimizados para as seções transversais dos pilares e vigas, bem como o custo total encontram-se no Quadro 17, juntamente com os resultados obtidos por Boscardin (2017). Vale ressaltar que onde está descrito a área de aço longitudinal dos pilares,

transformou-se as bitolas em área de aço, pois no trabalho da referida autora, foi realizada a otimização das barras, sendo assim, havia mais de um tipo de bitola comercial na seção transversal. Nesse trabalho apenas considerou-se a área de aço teórica.

Quadro 17: Resultados ótimos para o pórtico de 6 pavimentos e 2 vãos Boscardin (2017) x Huppés (2021)

Autor	Altura viga (m)	Seção Pilares (m)	Custo Vigas (R\$)	Custo Pilares (R\$)	Custo total (R\$)	Área de aço long. (pilares) cm <sup>2</sup> /m
Boscardin (2017)	0,40	0,60x0,20	10129,50	15256,73	25386,23	8,20
		0,60x0,20				6,60
		0,55x0,20				4,80
Huppés (2021)	0,50	0,20x0,20	11331,98	14875,72	26207,70	3,20
		0,95x0,20				7,57
		0,25x0,20				8,72

Fonte: Autoria Própria

Conforme pode ser observado no Quadro 17, a altura da viga nesse trabalho foi 0,10 m superior, as seções transversais dos pilares de extremidade foram menores e a área de aço longitudinal para dois agrupamentos de pilares foi superior ao trabalho realizado por Boscardin (2017). Salienta-se ainda, que o custo das vigas nesse trabalho foi maior e o custo dos pilares foram menores. Porém, o custo total do pórtico foi R\$ 821,47 superior, o que equivale a 3,24%.

Caso fossem adotadas as dimensões otimizadas do trabalho da autora, no *Robot* obteriam--se os seguintes custos para o pórtico (Quadro 18):

Quadro 18: Custo do pórtico plano de 6 pavimentos considerando as seções otimizadas do trabalho de Boscardin (2017).

Custo Vigas (R\$)	Custo Pilares (R\$)	Custo total (R\$)
14539,00	16291,00	30830,00

Fonte: Autoria Própria

De acordo com o Quadro 18, os custos totais do pórtico foram de R\$ 30830,00, ao comparar com o custo total obtido por Boscardin (2017), teve-se um aumento de R\$ 5443,77, ou seja, mais de 21%. O que significa, que o *Robot*, nesse caso, considerou uma quantidade de aço maior para os elementos estruturais.

Na maior parte dos casos, para o processo de otimização, as diferenças nos resultados relacionam-se com os critérios de cálculo das armaduras no *Robot* e também pela autora ter realizado a otimização das armaduras dos pilares.

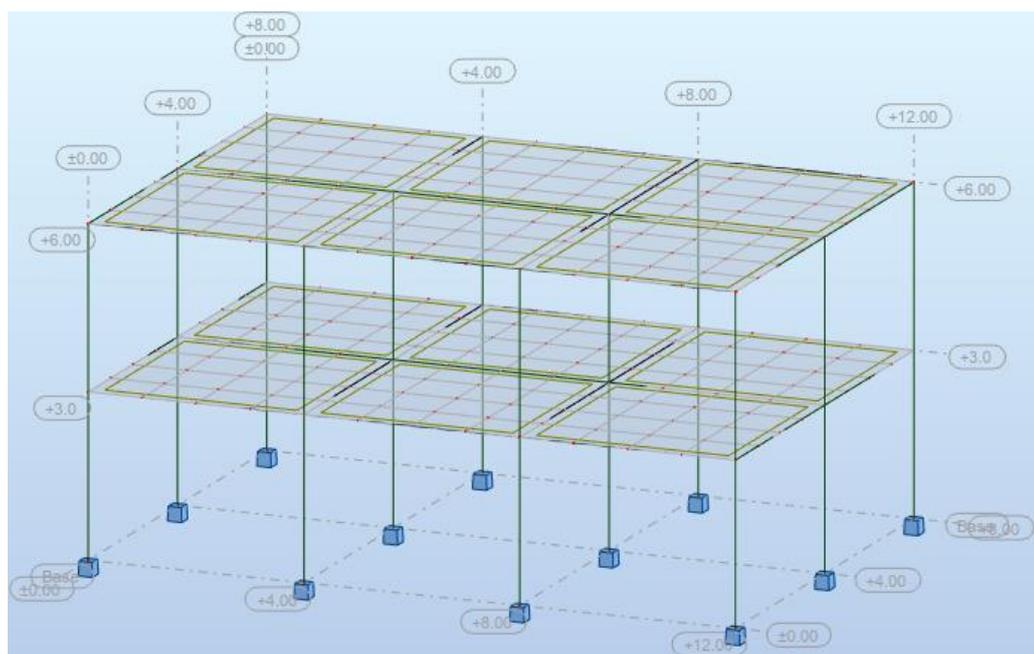
Com relação ao tempo de otimização, teve-se aproximadamente 40,52 horas, ocorreram 7 gerações e 3120 cálculos da função.

#### 4.5 Exemplo 5

O Exemplo 5 consiste na otimização estrutural de um pórtico espacial de concreto armado (Figura 26), levando em conta o custo econômico e as emissões de CO<sub>2</sub>. A planta baixa do pórtico com indicação dos agrupamentos dos elementos estruturais encontra-se na Figura 27. O pórtico possui vãos de 4 m, altura entre pavimentos igual a 3 m, largura das vigas e pilares foram fixados em 19 cm, com a finalidade da alvenaria ficar embutida na estrutura. As lajes possuem 10 cm de espessura, e os carregamentos adotados foram os seguintes:

- Carregamento de parede sobre as vigas: 5,73 KN/m
- Carga permanente: 1,48KN/m<sup>2</sup>
- Sobrecarga de utilização: 1,50 KN/m<sup>2</sup>

Figura 26: Pórtico Espacial

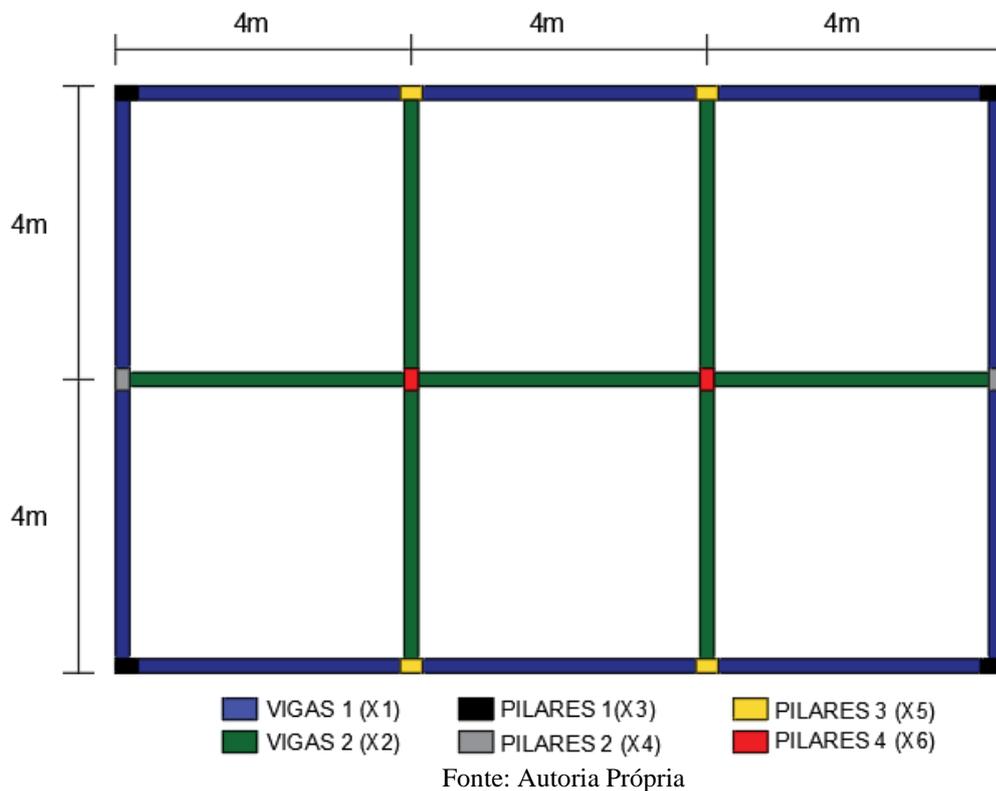


Fonte: Autoria Própria

As variáveis de projeto (arredondadas em múltiplos de 1 cm) foram as alturas das vigas dos agrupamentos 1 e 2, e os comprimentos dos pilares dos agrupamentos 1, 2, 3 e 4, ambas as variáveis estão representadas na Figura 27. Em razão, de ter sido considerado 6 variáveis, foram realizadas algumas alterações na configuração do algoritmo genético, adotou-se uma população de 60 indivíduos e 3 indivíduos de elite, as demais configurações foram mantidas constantes conforme o exemplo da calibração.

Salienta-se ainda, que as lajes foram empregadas somente para distribuir os carregamentos nas vigas, dessa forma, as mesmas não estão inclusas nos custos econômicos e ambientais do pórtico espacial em análise. No entanto seu dimensionamento foi verificado, atendendo os critérios normativos.

Figura 27: Planta baixa do Pórtico Espacial



Os custos econômicos dos materiais aço, formas e concreto foram obtidos do estudo realizado por Santoro e Kripka (2020) e encontram-se no Quadro 19. Já os custos ambientais ( $\text{CO}_2$ ), encontram-se no Exemplo 2, no Quadro 14.

Quadro 19: Custos econômicos dos materiais

Material	Unidade	Custo (R\$)
CA50	kg	3,82
CA60	kg	4,15
Formas	$\text{m}^2$	28,05
C25	$\text{m}^3$	350,00

Fonte: Adaptado de Santoro e Kripka (2020)

Para o pré-dimensionamento da estrutura, adotou-se as prescrições de Pinheiro, Muzardo e Santos (2007). Sendo assim, para a altura das vigas adotou-se 1/10 do vão, resultando em 0,40 m para ambas, para os pilares foi realizado o pré-dimensionamento pela

área de influência, resultando em pilares com as seguintes dimensões: pilares de canto e extremidade 0,19x0,19 m; pilares centrais 0,19x0,20 m.

No Quadro 20, está representado o custo econômico do pórtico espacial, bem como as dimensões das variáveis otimizadas (em metros) e o tempo de processamento.

Quadro 20: Custo econômico do Pórtico Espacial

Cálculo	Altura X1	Altura X2	Comp. X3	Comp. X4	Comp. X5	Comp. X6	Custo (R\$)	Tempo (s)
1	0,22	0,36	0,19	0,19	0,19	0,33	14655,00	318157

Fonte: Autoria Própria

Conforme o Quadro 20, o custo do pórtico espacial é de R\$ 14.655,00. O tempo de processamento foi de 318157 segundos, o que corresponde a 88 horas e 23 minutos.

Ao comparar o custo otimizado com os custos da estrutura pré-dimensionada (Quadro 21), teve-se redução dos custos totais em 7,23%, o que equivale a R\$ 1142,80. Pode-se pontuar, ainda, que o consumo de aço aumentou na otimização e os custos do concreto e das formas diminuíram. Dessa forma, o custo do concreto e das formas, influenciaram mais do que o aço no custo total do pórtico espacial.

Quadro 21: Pórtico Espacial: Otimização x Pré-dimensionamento

Custos de Materiais (R\$)	Pré-dimensionamento	Otimização	Diferença (%)
Concreto	4535,30	3532,50	-22,11
Aço	5944,20	6650,20	11,88
Formas	5318,30	4472,30	-15,91
Custo total	15797,80	14655,00	-7,23

Fonte: Autoria Própria

Com o intuito de comparar os custos obtidos na otimização, foi modelado no software *Eberick* o pórtico espacial com as dimensões otimizadas. No *Eberick* foram realizadas configurações no dimensionamento das armaduras de forma que não houvesse escalonamento das barras longitudinais das vigas, e para os estribos foi adotado o caso mais crítico para todos os vãos das vigas. Para as armaduras longitudinais dos pilares considerou-se o caso mais crítico para cada prumada. As combinações de cálculo foram feitas de acordo as configurações adotadas nesse trabalho. Nos Quadros 22 e 23 encontram-se os resultados comparativos, englobando as formas, aço e concreto, considerando os custos econômicos e o quantitativo de materiais, respectivamente.

Quadro 22: Custos dos Materiais: Otimização x *Eberick*

<b>Custos de Materiais (R\$)</b>	Otimização	Eberick	Diferença (%)
Concreto	3532,50	3535,00	0,07
CA50	5306,14	4116,93	-22,41
CA60	1343,76	1120,50	-16,61
Formas	4472,30	4473,98	0,04
<b>Custo total</b>	<b>14654,70</b>	<b>13246,40</b>	<b>-9,61</b>

Fonte: Autoria Própria

Quadro 23: Quantitativo de Materiais: Otimização x *Eberick*

<b>Quantitativos de Materiais</b>	Otimização	Eberick	Diferença (%)
Concreto (m <sup>3</sup> )	10,09	10,10	0,10
CA50 (kg)	1389,04	1077,73	-22,41
CA60 (kg)	323,80	270,00	-16,61
Formas (m <sup>2</sup> )	159,44	159,50	0,04

Fonte: Autoria Própria

De acordo com os Quadros 22 e 23, o custo do concreto e das formas foram similares ao *Eberick*, justificasse a diferença pela questão do arredondamento das casas decimais. Em relação ao aço teve-se maior diferenças para o CA50, seguido do CA60, isso significa que o *Robot* calculou uma quantidade de armaduras longitudinais e estribos superior ao *Eberick*. Já em relação ao custo total a diferença foi de 9,61%, correspondendo a R\$ 1408,60.

Como forma de melhorar o entendimento dos resultados, no Quadro 24, está representado a armadura longitudinal teórica e armadura longitudinal efetiva, obtida no *Robot* e no *Eberick*, tanto para os pilares como para as vigas. E no Quadro 25 está representada a amadura transversal obtida nas vigas e pilares.

Quadro 24: Comparativo armadura longitudinal: Otimização x *Eberick*

<b>Armadura Longitudinal (cm<sup>2</sup>/m)</b>			
	Otimização	Eberick	Diferença (%)
Vigas 1 (0,19x0,22)	8,45	6,92	-18,11
Vigas 2 (0,19x0,36)	10,94	6,47	-40,86
Pilares 1 (0,19x0,19)	12,68	9,82	-22,56
Pilares 2 (0,19x0,19)	4,38	3,14	-28,31
Pilares 3 (0,19x0,19)	3,43	3,14	-8,45
Pilares 4 (0,19x0,33)	3,47	3,14	-9,51

Fonte: Autoria Própria

Quadro 25: Comparativo armadura transversal: Otimização x Eberick

Armadura transversal (Kg/m)			
	Otimização	Eberick	Diferença (%)
Vigas 1 (0,19x0,24)	1,68	2,05	22,02
Vigas 2 (0,19x0,39)	2,55	0,52	-79,61
Pilares 1 (0,19x0,19)	0,62	0,69	11,89
Pilares 2 (0,19x0,21)	0,62	0,86	39,46
Pilares 3 (0,19x0,21)	0,62	0,86	39,46
Pilares 4 (0,19x0,36)	0,84	1,22	44,66

Fonte: Autoria Própria

Uma das justificativas sobre as diferenças nas armaduras longitudinais das vigas (Quadro 24), é pelo fato de que no *Robot*, os momentos fletores nas vigas foram superiores aos encontrados no *Eberick*, principalmente sobre os pilares internos e nos vãos (análise feita nos softwares, sugere-se para futuros estudos analisar a possibilidade de minorar a combinação de cálculo no *Robot*), conseqüentemente a quantidade de aço foi superior. Para os pilares os momentos fletores no *Robot*, na maior parte dos casos também foram superiores ao *Eberick*.

Quanto a armadura transversal (Quadro 25), para o agrupamento das Vigas 1 teve-se uma diferença de 22,02%, em virtude do *Eberick* ter calculado estribos de 4 ramos. No agrupamento das vigas 2 teve-se a maior diferença, ou seja, no *Robot* os estribos estavam com espaçamentos inferiores ao *Eberick*. Para os agrupamentos dos pilares, o *Eberick* calculou estribos com espaçamentos inferiores ao *Robot*, principalmente para os agrupamentos 2, 3 e 4.

De forma geral, a comparação entre os resultados obtidos na otimização em relação ao *Eberick*, como visto tende a apresentar menor quantitativo de armadura longitudinal e maior quantitativo de armadura transversal, principalmente para os pilares.

Com o intuito de analisar os custos ambientais (CO<sub>2</sub>), o mesmo pórtico espacial foi otimizado. No Quadro 26, encontram-se os resultados ótimos das variáveis otimizadas (em metros), o custo e o tempo computacional.

Quadro 26: Custos Ambientais do Pórtico Espacial

Cálculo	Altura X1	Altura X2	Comp. X3	Comp. X4	Comp. X5	Comp. X6	Custo (KgCO <sub>2</sub> )	Tempo (s)
1	0,22	0,36	0,19	0,19	0,19	0,34	3589,50	338720

Fonte: Autoria Própria

De acordo com o Quadro 26, o custo ambiental foi de 3589,50 KgCO<sub>2</sub>. O tempo de processamento foi de 338720 segundos, o que equivale a 94 horas e 5 minutos.

Ao comparar as dimensões ótimas encontradas com a função do custo ambiental em relação a função do custo econômico (Quadro 27), percebe-se que somente uma variável em

comparação não apresentou o mesmo resultado. Dessa forma, para esse exemplo a estrutura de custo econômico ótimo tende a proporcionar um aumento de 0,23% das emissões de CO<sub>2</sub>, e a solução ótima do ponto de vista ambiental tende a aumentar o custo econômico em 0,05%, conforme pode ser observado no Quadro 28

Quadro 27: Comparativo das variáveis (m) KgCO<sub>2</sub> x R\$

Custo	Altura X1	Altura X2	Comp. X3	Comp. X4	Comp. X5	Comp. X6
KgCO <sub>2</sub>	0,22	0,36	0,19	0,19	0,19	0,34
R\$	0,22	0,36	0,19	0,19	0,19	0,33

Fonte: Autoria Própria

Quadro 28: Comparativo entre as estruturas de custo econômico e ambiental ótimo

Otimização	Resultado	
Estrutura de custo ambiental ótimo	3.589,50 KgCO <sub>2</sub>	R\$ 14.662,00
Estrutura de custo econômico ótimo	R\$ 14.655,00	3.597,60 KgCO <sub>2</sub>

Além da análise comparativa dos custos, foi realizado a comparação da representatividade dos materiais no custo total do pórtico espacial, tanto para o custo econômico como para o ambiental, conforme representado no Quadro 29.

Quadro 29: Representatividade dos Materiais no custo total do Pórtico Espacial

Material	R\$	KgCO <sub>2</sub>
Concreto	24%	42%
Aço	45%	50%
Formas	31%	8%

Fonte: Autoria Própria

Em conformidade ao Quadro 29, para o custo econômico, o aço correspondeu a 45% do custo total, seguido das formas e concreto com 31% e 24% respectivamente. Em contrapartida, para o custo ambiental o aço representou 50% do custo total, seguido do concreto com 42% e das formas com 8%.

Para o processo de otimização, tanto para os custos econômicos como para os ambientais, obteve-se 5 gerações e 3360 cálculos da função, e o *exitflag* foi igual a 1, ou seja, o algoritmo parou por não haver mudança significativa nos resultados em relação a função objetivo.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentada uma metodologia para buscar soluções ótimas para a concepção de projetos estruturais em concreto armado. Para isso, foi realizada a integração computacional entre o software *Matlab* e o programa de análise e dimensionamento estrutural, *Robot*. Como método de otimização foi utilizado o Algoritmo Genético.

Um das vantagens da utilização do *Robot* é a fácil modelagem estrutural e a *API*, pois qualquer alteração que deseja-se fazer no modelo estrutural é rápido, não necessitando a criação de um elemento bidimensional ou tridimensional na própria interface do programa de otimização.

Após a definição das restrições, dos parâmetros fixos e das funções objetivo, e execução da integração computacional, buscou-se obter as melhores dimensões para as seções transversais dos elementos estruturais analisados. Conforme os resultados obtidos, foram necessários alterar diversos parâmetros do algoritmo genético, com a finalidade de reduzir o tempo de otimização. No entanto, com essas alterações tem-se a possibilidade de não encontrar o melhor resultado (ótimo global), mas próximo ao ideal, especialmente se comparar com aqueles encontrados na literatura.

Em relação às dimensões das vigas biapoiadas, a maioria ficou com dimensões inferiores a 60 cm, isso pode ser explicado pelo fato de que a armadura de pele tende a aumentar os custos das mesmas.

Para os pórticos planos de um pavimento e vãos variáveis, a maior diferença percentual de custo em comparação ao trabalho de Boito (2016) foi para o vão de 3 metros. Ao analisar a representatividade dos materiais, constata-se que para o custo econômico o aço e as formas possuem maior contribuição no custo total, em contrapartida para as emissões de CO<sub>2</sub> o concreto e o aço apresentam maior contribuição.

Para os pórticos planos de múltiplos vãos e um pavimento, o menor custo foi obtido para vãos espaçados igualmente em 2,86 metros. Quanto a representatividade dos materiais as formas apresentaram maior contribuição no custo total do pórtico.

O pórtico plano de 2 vãos e 6 pavimentos, apresentou custo de 3,24% superior ao trabalho de Boscardin (2017), uma das explicações para essa diferença, se deve a otimização das armaduras dos pilares, pela referida autora.

Para o pórtico espacial teve-se redução de 7,23% no custo econômico, em relação ao pré-dimensionamento do mesmo. E ao comparar o resultado ótimo com o *Eberick*, obteve-se uma redução de 9,61%. Além disso, para o pórtico espacial considerando os custos ambientais

ótimos teve-se aumento de 0,05% dos custos econômicos, e levando em conta a estrutura de custo econômico ótimo, essa ocasionou o aumento de 0,23% das emissões de CO<sub>2</sub>.

De forma geral, nesse trabalho, o *Robot* apresentou maior quantitativo de aço nos elementos estruturais, em relação aos exemplos encontrados na literatura e também ao *Eberick*, tendo por consequência um maior custo econômico.

Ademais, como foi empregada a armadura teórica nos elementos estruturais, e não foi realizado a decalagem das amaduras, o resultado real tende a diferir significativamente. Dessa forma, seria necessário a consideração de um detalhamento conforme os projetos usuais.

Acerca do custo computacional, quanto maior for a quantidade de elementos estruturais por análise e também quanto maior a população, maior o tempo de processamento.

Em suma, a metodologia proposta não se destina a substituir o julgamento dos engenheiros por um procedimento automatizado, ao invés disso, fornece uma ferramenta que pode ser funcional para reduzir a quantidade de cálculos repetidos e permitir que o projetista investigue os aspectos técnicos e as soluções.

## 5.1 Sugestões para futuros trabalhos

Algumas propostas para dar seguimento nessa pesquisa, são:

- Buscar ajustar os parâmetros do algoritmo genético, com o intuito de aprimorar os resultados;
- Otimizar a estrutura, variando as vinculações entre vigas e pilares;
- Implementar na rotina de cálculo, a consideração de armadura dupla nas vigas, verificação da linha neutra e escolha das armaduras por bitolas comerciais.
- Otimizar os pórticos considerando um agrupamento de vigas e pilares automatizado.

## REFERÊNCIAS

- AFZAL, M. et al. Reinforced concrete structural design optimization: A critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, p. 120623, 2020.
- ALLWOOD, J. M.; CULLEN, J. M. **Sustainable Materials - With Both Eyes Open**. 2<sup>a</sup> ed. UIT Cambridge, 2012.
- ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. 3<sup>a</sup> ed. Rio Grande: Dunas, v.1., 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 6118:2014: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- BASTOS, E. A. **Otimização de seções retangulares de concreto armado submetidas à flexo-compressão oblíqua utilizando algoritmos genéticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- BEZERRA, L. A. **Emprego de algoritmos genéticos para otimização de vigas de concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, 2017.
- BOITO, D. **Aplicação do método da busca harmônica na otimização de pórticos planos de concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) Universidade de Passo Fundo, 2016.
- BOSCARDIN, J. T. **Otimização de pórticos planos em concreto armado considerando restrições de cardinalidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) Universidade de Passo Fundo, 2017.
- BOTIS, M. F.; CERBU, C. A method for reducing of the overall torsion for reinforced concrete multi-storey irregular structures. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 16, 2020.
- CAMP, C. V.; HUQ, F. CO<sub>2</sub> and cost optimization of reinforced concrete frames using a big bang-big crunch algorithm. **Engineering Structures**, v. 48, p. 363–372, 2013.
- CERÈ, G.; ZHAO, W.; REZGUI, Y. Structural Behavior Analysis and Optimization, Integrating MATLAB with Autodesk Robot. **Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering**, p. 379–386, 2019.
- CHEN, C. et al. Optimum cost design of frames using genetic algorithms. **Steel and Composite Structures**, v. 30, n. 3, p. 293–304, 2019.
- CHOI, J. et al. Multi-objective green design model to mitigate environmental impact of construction of mega columns for super-tall buildings. **Science of the Total Environment**, v. 674, p. 580–591, 2019.
- 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.

- GAN, V. J. L. et al. Parametric modelling and evolutionary optimization for cost-optimal and low-carbon design of high-rise reinforced concrete buildings. **Advanced Engineering Informatics**, v. 42, n. July, 2019.
- GHODDOSIAN, A. . et al. Topology optimisation of the discrete structures with the minimum growing ground structure method. **International Journal of Structural Engineering**, v. 9, n. 1, p. 38–49, 2018.
- GOLDBERG, D. . **Genetic Algorithms in Search, Optimization, Machine Learning**. Addison-Wesley, 1989.
- KATKHODA, A.; KNAAB, R. Optimization in the selection of structural systems for the design of reinforced concrete high-rise buildings in resisting seismic forces. **Energy Procedia**, v. 19, p. 269–275, 2012.
- KRIPKA, M.; MEDEIROS, G. F.; LEMONGE, A. C. C. Use of optimization for automatic grouping of beam cross-section dimensions in reinforced concrete building structures. **Engineering Structures**, v. 99, p. 311–318, 2015.
- MATHWORKS. Matlab. Documentation > Global Optimization Toolbox > Genetic Algorithm. 2018.
- MAVROKAPNIDIS, D.; MITROPOULOU, C. C.; LAGAROS, N. D. Environmental assessment of cost optimized structural systems in tall buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 24, n. March, p. 100730, 2019.
- MEDEIROS, G. F.; KRIPKA, M. Structural optimization and proposition of pre-sizing parameters for beams in reinforced concrete buildings. **Computers and Concrete**, v. 11, n. 3, p. 253–270, 2013.
- MEDEIROS, G. F.; KRIPKA, M. Optimization of reinforced concrete columns according to different environmental impact assessment parameters. **Engineering Structures**, v. 59, p. 185–194, 2014.
- NEGRIN, I.; NEGRIN, A.; CHAGOYÉN, E. Optimización metaheurística de conjuntos estructurales de hormigón armado. **Revista ingeniería de construcción**, v. 34, n. 2, p. 181–192, 2019.
- OLIVEIRA, J. I. F. **Otimização multiobjetivo aplicada à análise estrutural de edifícios**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- ONU (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS). População mundial deve ter mais 2 bilhões de pessoas nos próximos 30 anos. 2019.
- PARK, H. S. et al. Cost and CO<sub>2</sub> emission optimization of steel reinforced concrete columns in high-rise buildings. **Energies**, v. 6, n. 11, p. 5609–5624, 2013.
- PAYA-ZAFORTEZA, I. et al. CO<sub>2</sub>-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing. **Engineering Structures**, v. 31, n. 7, p. 1501–1508, 2009.
- PENADÉS-PLÀ, V.; GARCÍA-SEGURA, T.; YEPES, V. Accelerated optimization method

for low-embodied energy concrete box-girder bridge design. **Engineering Structures**, v. 179, n. June 2018, p. 556–565, 2019.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. Apostila- Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

RAO, S. S. **Engineering Optimization: Theory and Practice**. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. Minimizing environmental impact from optimized sizing of reinforced concrete elements. **Computers and Concrete**, v. 25, n. 2, p. 111–118, 2020.

WBCSD (WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT). Cement technology roadmap shows how the path to achieve CO2 reductions up to 24% by 2050. 2018.

YEO, D.; POTRA, F. A. Sustainable design of reinforced concrete structures through CO2 emission optimization. **Journal of Structural Engineering (United States)**, v. 141, n. 3, p. 1–7, 2015.



**UPF**  
UNIVERSIDADE  
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José  
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900  
(54) 3316 7000 - [www.upf.br](http://www.upf.br)