

Universidade Federal do Espírito Santo
Centro Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

PAULO AUGUSTO TONINI ARPINI

**OTIMIZAÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂ DE
SISTEMAS DE PISOS MISTOS VIA
ALGORITMOS METAHEURÍSTICOS**

Vitória
2022

PAULO AUGUSTO TONINI ARPINI

Otimização da emissão de CO₂ de sistemas de pisos mistos via algoritmos metaheurísticos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Estruturas de Aço, Concreto e Mistos.

Orientador: Prof. Dr. Élcio Cassimiro Alves

Vitória

2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

T663o Tonini Arpini, Paulo Augusto, 1993-
Otimização da emissão de CO2 de sistemas de pisos mistos via algoritmos metaheurísticos / Paulo Augusto Tonini Arpini. - 2022.
100 f. : il.

Orientador: Élcio Cassimiro Alves.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Engenharia de estruturas. 2. Otimização estrutural. I. Cassimiro Alves, Élcio. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

OTIMIZAÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂ DE SISTEMAS DE PISOS MISTOS VIA ALGORITMOS METAHEURÍSTICOS

Paulo Augusto Tonini Arpini

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Estruturas.

Aprovada no dia **29 de julho** por:

Prof. Dr. Élcio Cassimiro Alves
Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais
Orientador – UFES

Profa Dra. Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani
Doutora em Engenharia de Estruturas
Examinadora Interna – UFES

Prof. Dr. Moacir Kripka
Doutor em Engenharia Civil
Examinador Externo - UPF-RS

Vitória – ES, julho de 2022

RESUMO

Desde a Revolução Industrial iniciada no século XVII, a emissão de gases que fomentam o efeito estufa, em especial o CO₂, aumentaram significativamente. Neste trabalho, foi realizado a otimização de um sistema composto por vigas mistas de aço e concreto principais e secundárias e pilares de aço. Para a rotina de otimização foram utilizados o algoritmo genético e a otimização por enxame de partículas. Para a comparação entre os algoritmos, foram modelados três exemplos numéricos retirados de trabalhos anteriormente publicados na literatura. Além dos exemplos numéricos, foi modelado um teste de convergência com o intuito de verificar a confiança dos exemplos. Os resultados mostraram uma melhor adaptação da otimização por enxame de partículas frente aos resultados obtidos pelo algoritmo genético.

Palavras-chave: Mecânica computacional. Otimização estrutural. Algoritmo genético. *Particle Swarm Optimization (PSO)*

ABSTRACT

Since the Industrial Revolution started in the XVII century, the emission of greenhouse gases, especially CO₂, has increased significantly. In this work, the optimization of a system composed of main and secondary steel and concrete mixed beams and steel pillars was carried out. For the optimization routine, the genetic algorithm and the particle swarm optimization (PSO) were used. For the comparison between the algorithms, three numerical examples taken from works previously published in the literature were modeled. In addition to the numerical examples, a convergence test was modeled in order to verify the confidence of the examples. The results showed a better adaptation of the particle swarm optimization (PSO) compared to the results obtained by the genetic algorithm.

Keywords: Computational mechanics. Structural optimization. Genetic Algorithm. Particle Swarm Optimization (PSO)

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - COMPARAÇÃO ENTRE ECONOMIAS LINEAR E CIRCULAR.....	8
FIGURA 2 - RESUMO DO IMPACTO AMBIENTAL DESDE A PRODUÇÃO ATÉ A RECICLAGEM DO AÇO.	9
FIGURA 3 - EUROPEAN CHANNEL SHEAR	12
FIGURA 4 - FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO GENÉTICO.....	15
FIGURA 5 - FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO <i>PSO</i>	17
FIGURA 6 - TIPOS MAIS USUAIS DE VIGAS MISTAS	23
FIGURA 7 - LARGURA EFETIVA B_e	25
FIGURA 8 - TENSÕES EM VIGAS MISTAS EM MOMENTOS POSITIVOS.....	28
FIGURA 9 - TENSÕES COM LIGAÇÃO COMPLETA E LINHA NEUTRA NO PERFIL.....	29
FIGURA 10 - TENSÕES COM LIGAÇÃO PARCIAL DA VIGA MISTA	31
FIGURA 11 - TENSÕES COM MOMENTO NEGATIVO	34
FIGURA 12 - LAJE MISTA COM <i>STEEL DECK</i>	38
FIGURA 13 - DADOS GEOMÉTRICOS DA SOLDA	42
FIGURA 14 - FORMAS DE LIGAÇÃO VIGAS-PILARES	48
FIGURA 15 – TELAS ENTRADA DE DADOS DO <i>SOFTWARE</i> PÓRTICO MISTO	50
FIGURA 16 – TELA EMISSÃO/CUSTO DO <i>SOFTWARE</i> PÓRTICO MISTO	50
FIGURA 17 – TELA RESULTADOS DO <i>SOFTWARE</i> PÓRTICO MISTO	50
FIGURA 18 – TELA ESTRUTURA DO <i>SOFTWARE</i> PÓRTICO MISTO	51
FIGURA 19 - CONVERGÊNCIA DO ALGORITMO GENÉTICO	53
FIGURA 20 - CONVERGÊNCIA DO ALGORITMO <i>PSO</i>	53
FIGURA 21 - GEOMETRIA ESTUDADA POR POITRAS, CORMIER E NABOLLE (2018)	54
FIGURA 22 - GEOMETRIA ÓTIMA DO PISO PARA O EXEMPLO 01 ENCONTRADA PELO AG E <i>PSO</i>	55
FIGURA 23 - COMPARAÇÃO ENTRE EMISSÃO E CUSTO – EXEMPLO 01	61
FIGURA 24 - EMISSÃO DE CO_2 PARA CADA F_{ck} – ALGORITMO GENÉTICO	61
FIGURA 25 - EMISSÃO DE CO_2 PARA CADA F_{ck} – <i>PSO</i>	62
FIGURA 26 - PORCENTAGEM DE OTIMIZAÇÃO ALGORITMO GENÉTICO - EXEMPLO 01	64
FIGURA 27 - PORCENTAGEM DE OTIMIZAÇÃO <i>PSO</i> - EXEMPLO 01	64
FIGURA 28 - SOLUÇÃO ENCONTRADA POR POITRAS <i>ET AL.</i> (2011).....	66
FIGURA 29 – DISPOSIÇÃO DAS VIGAS APRESENTADA PELO ALGORITMO GENÉTICO (A) E <i>PSO</i> (B)	67
FIGURA 30 - COMPARAÇÃO ENTRE EMISSÃO E CUSTO - EXEMPLO 02.....	72
FIGURA 31 - EMISSÃO DE CO_2 PARA CADA F_{ck} EXEMPLO 02 – ALGORITMO GENÉTICO	73
FIGURA 32 - EMISSÃO DE CO_2 PARA CADA F_{ck} EXEMPLO 02 – <i>PSO</i>	73
FIGURA 33 - PORCENTAGEM DE OTIMIZAÇÃO ALGORITMO GENÉTICO - EXEMPLO 02	74
FIGURA 34 - PORCENTAGEM DE OTIMIZAÇÃO <i>PSO</i> - EXEMPLO 02	75
FIGURA 35 - GEOMETRIA PROPOSTA DO EXEMPLO 03	76
FIGURA 36 - GEOMETRIA ÓTIMA DO EXEMPLO 03 DOS ALGORITMOS PROPOSTOS NESTE TRABALHO.....	77

FIGURA 37 - COMPARAÇÃO ENTRE EMISSÃO E CUSTO - EXEMPLO 03.....	82
FIGURA 38 - EMISSÃO DE CO ₂ PARA CADA F_{ck} EXEMPLO 03 – ALGORITMO GENÉTICO	82
FIGURA 39 - EMISSÃO DE CO ₂ PARA CADA F_{ck} EXEMPLO 03 – <i>PSO</i>	83
FIGURA 40 - PORCENTAGEM DE OTIMIZAÇÃO ALGORITMO GENÉTICO - EXEMPLO 03	84
FIGURA 41 - PORCENTAGEM DE OTIMIZAÇÃO <i>PSO</i> - EXEMPLO 03	85

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PRINCIPAIS ESTUDOS SOBRE OTIMIZAÇÕES ESTRUTURAIS	21
TABELA 2 - EMISSÃO DE CO ₂ NA PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	41
TABELA 3 - EMISSÃO DE CO ₂ NA PRODUÇÃO DO AÇO	41
TABELA 4 - CUSTO DOS MATERIAIS.....	42
TABELA 5 - PERFIS SELECIONADOS PELOS ALGORITMOS	55
TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO EXEMPLO 01 COM F_{ck} DE 20 MPA	56
TABELA 7 - EMISSÃO DE CO ₂ DO EXEMPLO 01 PARA F_{ck} DE 20 MPA E ALGORITMO GENÉTICO E <i>PSO</i>	57
TABELA 8 - CONSIDERAÇÕES CONSTRUTIVAS DO EXEMPLO 01 PARA DIFERENTES F_{ck} DO CONCRETO E ALGORITMO GENÉTICO	58
TABELA 9 - CONSIDERAÇÕES CONSTRUTIVAS DO EXEMPLO 01 PARA DIFERENTES F_{ck} DO CONCRETO E <i>PSO</i>	59
TABELA 10 - CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO EXEMPLO 02 COM F_{ck} DE 20 MPA E ALGORITMO GENÉTICO	67
TABELA 11 - EMISSÃO DE CO ₂ DOS ELEMENTOS DO EXEMPLO 02 PARA F_{ck} DE 20 MPA, AG E <i>PSO</i>	68
TABELA 12 - CONSIDERAÇÕES CONSTRUTIVAS DO EXEMPLO 01 PARA DIFERENTES F_{ck} DO CONCRETO E ALGORITMO GENÉTICO	69
TABELA 13 - CONSIDERAÇÕES CONSTRUTIVAS DO EXEMPLO 01 PARA DIFERENTES F_{ck} DO CONCRETO E <i>PSO</i>	70
TABELA 14 – CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS ENCONTRADOS PARA O PROBLEMA EXEMPLO 02 PARA O ALGORITMO GENÉTICO	77
TABELA 15 - EMISSÃO DE CO ₂ DO EXEMPLO 03 PARA 25 MPA.....	78
TABELA 16 - CONSIDERAÇÕES CONSTRUTIVAS DO EXEMPLO 03 PARA DIFERENTES F_{ck} DO CONCRETO PELO ALGORITMO GENÉTICO	79
TABELA 17 - CONSIDERAÇÕES CONSTRUTIVAS DO EXEMPLO 03 PARA DIFERENTES F_{ck} DO CONCRETO PELO <i>PSO</i> ..	80

LISTA DE SÍMBOLOS

- $\delta_{adm,s}$: Flecha admissível das vigas secundárias;
- $\delta_{adm,p}$: Flecha admissível das vigas principais;
- α_E : Relação entre o módulo de elasticidade do aço e do concreto;
- $\alpha_{int,p}$: Grau de interação das vigas principais;
- $\alpha_{int,s}$: Grau de interação das vigas secundárias;
- $\alpha_{min,s}$: Grau de interação mínimo das vigas secundárias;
- $\alpha_{min,p}$: Grau de interação mínimo das vigas principais;
- γ_{cs} : Coeficiente para ponderação da resistência do conector;
- $\delta_{t,p}$: Flecha total das vigas principais;
- $\delta_{t,s}$: Flecha total das vigas secundárias;
- η_i : Grau de interação;
- λ_0 : Índice de esbeltez reduzido;
- $\rho_{aço}$: Massa específica do aço;
- σ_{td} : Tensão de tração na face inferior do perfil de aço;
- σ_{cd} : Tensão de compressão na face superior da laje de concreto;
- χ : Fator de redução associado à resistência à compressão do aço;
- A_a : Área da seção transversal do perfil de aço;
- A_{ac} : Área comprimida da seção do perfil de aço;
- A_{at} : Área tracionada da seção do perfil de aço;
- A_{cs} : Área transversal do conector de cisalhamento *stud bolt*;
- A_{af} : Área da mesa superior do perfil de aço;
- A_{aw} : Área da alma do perfil de aço;
- A_g : Área bruta da seção transversal do perfil;
- AG : Algoritmo genético;
- A_{laje} : Área retangular da laje;
- A_{pilar} : Área da seção transversal do pilar;
- A_s : Área de aço da armadura de costura;
- A_{sl} : Área da armadura longitudinal dentro da largura efetiva;
- a : Altura da linha neutra medida a partir da laje de concreto;
- b : Largura efetiva;
- b_{fc} : Largura da mesa comprimida do perfil de aço;
- C_{ad} : Força resistente de cálculo da região comprimida do perfil de aço;

C_{cd} : Força resistente de cálculo da espessura comprimida da laje;

$CO_{2(concreto)}$: Emissão da laje de concreto

$CO_{2(fôrma)}$: Emissão das fôrmas de *steel deck*

$CO_{2(pilar)}$: Emissão dos pilares de aço

$CO_{2(tela)}$: Emissão da tela de fissuração

$CO_{2(vigas)}$: Emissão de todas as vigas já com conectores

d : Altura total do perfil I genérico;

E_a : Módulo de elasticidade do aço;

$E_{aço}$: Emissão de CO_2 do aço;

E_{conc} : Emissão de CO_2 do concreto;

E_{tela} : Emissão de CO_2 da tela de fissuração;

E_{sd} : Emissão de CO_2 do *steel deck*;

E_c : Módulo de elasticidade do concreto;

F_{hd} : Força de cisalhamento de cálculo entre o componente de aço e a laje;

f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto à compressão;

f_{ck} : Resistência à compressão do concreto

f_{sd} : Resistência de cálculo ao escoamento do aço da armadura;

f_{ucs} : Resistência à ruptura do aço do conector;

f_y : Resistência do aço à tração;

f_{yd} : Resistência de cálculo ao escoamento do aço;

$H_{v,Rd,s}$: Força de cisalhamento solicitante de cálculo das vigas secundárias;

$H_{v,Sd,s}$: Força de cisalhamento solicitante de cálculo das vigas secundárias

$H_{v,Rd,p}$: Força de cisalhamento solicitante de cálculo das vigas principais;

$H_{v,Sd,p}$: Força de cisalhamento solicitante de cálculo das vigas principais;

h_c : Altura da parte comprimida da alma;

h_F : Altura das nervuras do *steel deck*;

h_p : Altura do pórtico;

h_w : Comprimento da alma perfil I genérico;

$h_{w,s}$: Comprimento da alma das vigas secundárias;

$h_{w,p}$: Comprimento da alma das vigas principais;

L_e : Comprimento destravado;

\mathbf{l}_b : Vetor limite do limite inferior das variáveis;

$M_{Ga,Sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo devido as ações atuantes antes da resistência do concreto atingir $0,75f_{ck}$;

$M_{L,Sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo devido as ações atuantes após da resistência do concreto atingir $0,75f_{ck}$;

M_{Rd} : Momento fletor resistente de cálculo;

M_{Rd}^- : Momento fletor resistente na região negativa;

$M_{Rd,s}$: Momento fletor solicitante de cálculo das vigas secundárias;

$M_{Rd,p}$: Momento fletor solicitante de cálculo das vigas principais;

$M_{Rd,0,s}$: Momento fletor resistente de cálculo das vigas secundárias antes da cura;

$M_{Rd,0,p}$: Momento fletor resistente de cálculo das vigas principais antes da cura;

M_{Sd} : Momento fletor solicitante de cálculo;

$M_{Sd,p}$: Momento fletor solicitante de cálculo das vigas principais;

$M_{Sd,s}$: Momento fletor solicitante de cálculo das vigas secundárias;

$M_{Sd,0,s}$: Momento fletor solicitante de cálculo das vigas secundárias antes da cura;

$M_{Sd,0,p}$: Momento fletor solicitante de cálculo das vigas principais antes da cura;

$M_{x,Sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo na direção x;

$M_{x,Rd}$: Momento fletor resistente de cálculo na direção x;

$M_{y,Sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo na direção y;

$M_{y,Rd}$: Momento fletor resistente de cálculo na direção y;

$N_{c,Rd}$: Esforço normal resistente de cálculo dos pilares;

$N_{c,Sd}$: Esforço normal solicitante de cálculo dos pilares;

n : Número de conectores tipo *stud bolt* das vigas secundárias;

n_p : Número de conectores tipo *stud bolt* das vigas principais;

n_{vigas} : Número de vigas secundárias interiores;

PSO : *Particle Swarm Optimization* (Otimização por Enxame de Partículas)

$p_{fôrma}$: Peso da fôrma de *steel deck*;

Q : Fator de redução associado à flambagem local do perfil I;

$Q_{Rd,SD}$: Carga de cálculo que o *steel deck* resiste;

$Q_{Sd,SD}$: Carga de cálculo que solicita o *steel deck*;

R : Raio de concordância entre mesa e alma;

R_g : Coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores;

R_p : Coeficiente para consideração da posição do conector;

T_{ad} : Força resistente de cálculo da espessura tracionada do perfil de aço;

T_{ds} : Força resistente de tração de cálculo nas barras da armadura longitudinal;

t_c : Altura da laje de concreto acima do topo da fôrma de aço;

t_f : Espessura da mesa;

t_w : Comprimento da alma perfil I;

$t_{w,s}$: Espessura da alma das vigas secundárias;

$t_{w,p}$: Espessura da alma das vigas secundárias;

\mathbf{u}_b : Vetor limite do limite superior das variáveis;

$V_{aço}$: Volume do perfil de aço da viga principal;

V_c : Volume do conector *stud bolt*;

$V_{Rd,s}$: Esforço cortante resistente de cálculo das vigas secundárias;

$V_{Sd,s}$: Esforço cortante solicitante de cálculo das vigas secundárias;

$V_{Rd,p}$: Esforço cortante resistente de cálculo das vigas principais;

$V_{Sd,p}$: Esforço cortante solicitante de cálculo das vigas principais;

W_a : Módulo de resistência elástico inferior do perfil de aço;

W_{ef} : Módulo de resistência elástico inferior da seção mista com conexão parcial;

$(W_{tr})_i$: Módulo de resistência elástico inferior da seção mista;

$(W_{tr})_s$: Módulo de resistência elástico superior da seção mista;

y_t : Distância do centro geométrico da parte tracionada do perfil de aço até a face superior desse perfil;

y_c : Distância do centro geométrico da parte tracionada da parte comprimida do perfil de aço até a face superior desse perfil;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	RECICLAGEM FRENTE À EMISSÃO DE CO ₂	7
1.2	OBJETIVOS	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	SISTEMAS MISTOS	11
2.2	OTIMIZAÇÃO E ALGORITMOS META-HEURÍSTICOS	13
2.2.1	<i>Algoritmo Genético (AG)</i>	14
2.2.2	<i>Otimização por Enxame de Partículas (Particle Swarm Optimization)</i>	16
2.3	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL E SUSTENTABILIDADE	19
3	DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS MISTAS	23
3.1	<i>Pisos mistos</i>	23
3.1.1	<i>Conectores de cisalhamento</i>	23
3.1.2	<i>Largura efetiva</i>	25
3.1.2.1	<i>Limitações normativas</i>	26
3.1.3	<i>ELU em regiões de momento positivo</i>	27
3.1.3.1	<i>ELU em regiões de momento negativo</i>	33
4	ABORDAGEM METODOLÓGICA	38
4.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	38
4.2	FUNÇÃO OBJETIVO	39
4.3	VARIÁVEIS DE PROJETO	43
4.3.1	<i>Limite das Variáveis</i>	44
4.4	RESTRICÇÕES DO PROBLEMA	45
4.5	CARACTERÍSTICAS GERAIS	48
4.6	SOFTWARE PÓRTICO MISTO	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1	TESTE DE CONVERGÊNCIA	52
5.2	EXEMPLO 01 – POITRAS, CORMIER E NABOLLE (2018)	54
5.3	EXEMPLO 02 – POITRAS, LEFRANÇOIS E CORMIER (2011)	65
5.4	EXEMPLO 03 – FAKURY, SILVA E CALDAS (2016)	76
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87

6.1	CONCLUSÕES.....	87
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 RECICLAGEM FRENTE À EMISSÃO DE CO₂

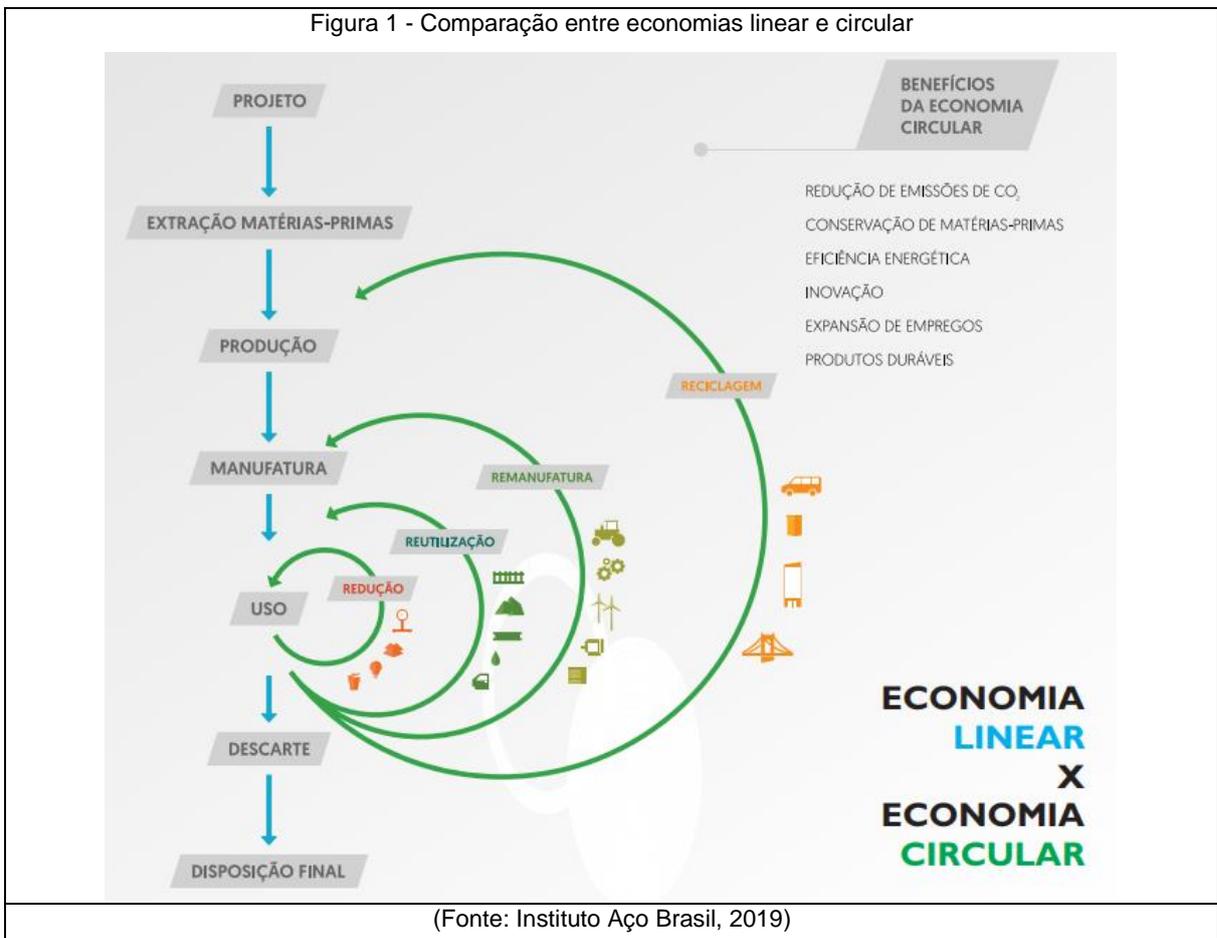
Desde a revolução industrial, o aquecimento global se intensificou, conseqüentemente as temperaturas ficaram em constante aumento. O aquecimento global é o processo no qual os oceanos terrestres e atmosfera aumentam de temperatura, o principal motivo para esse aumento é a queima de combustíveis fósseis e a liberação de principalmente CO₂ (dióxido de carbono) e CH₄ (metano).

Nos últimos tempos a redução da emissão de CO₂ se tornou uma necessidade clara à Terra, a fim de suprir uma parte dessa necessidade nasce O Acordo de Paris (2016), um tratado assinado em 2016, que prevê sérias medidas de redução da emissão de gases causadores do efeito estufa a partir de 2020. Neste cenário de sustentabilidade, a construção civil tem um papel crucial pela sua área de abrangência, assim um algoritmo/rotina que otimize parâmetros que meçam a sustentabilidade de uma construção se mostra como uma grande importância ambiental e oportunamente econômica.

O concreto é o segundo material mais utilizado no mundo, atrás apenas da água. A emissão de CO₂ proveniente do ciclo produtivo do concreto é responsável por 5% de todo o CO₂ gerado pelo homem na Terra (WBCSD, 2009). Flower *et al.* (2007) também citam que o consumo de concreto é da ordem de 1 tonelada ao ano por cada ser humano vivo. Ou seja, o grande consumo mundial de concreto, a alta emissão a cada m³ produzido e baixa taxa de reaproveitamento faz do concreto o principal problema para a redução dos gases aquecimento global na construção civil. As estruturas mistas de aço e concreto surgem como uma forma de reduzir a quantidade de concreto utilizado, além disso a capacidade de reciclagem do aço, sem a perda de qualidade também favorecem a redução da emissão. Essa reciclagem constante do aço, pode ser entendido como um conceito chamado economia circular. Esse conceito propõe a eliminação da noção de resíduos, mantendo os materiais em utilização pelo maior tempo possível. A Figura 1 mostra que a diferença entre as economias linear e circular é a inserção

de 4 estágios para a total eliminação de resíduos: redução, reutilização, reciclagem e remanufatura.

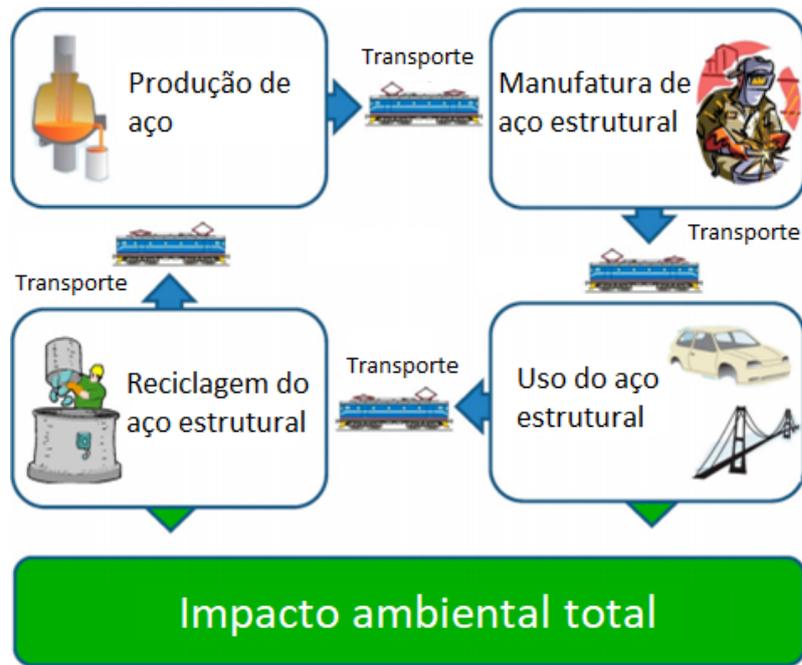
Figura 1 - Comparação entre economias linear e circular



Para a investigação do impacto ambiental de determinado produto utiliza-se a avaliação de ciclo de vida (ACV) que é uma compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida NBR ISO 14040 (2009).

Andersson *et al.* (2017) fez um estudo dos impactos ambientais relacionado a fabricação de aço com base em ACV's de siderúrgicas suecas. A Figura 2 mostra quais etapas, desde o processo produtivo até a reciclagem, são levadas em consideração numa ACV. Dessa forma, os coeficientes que são relacionados a emissão, advindos de uma ACV representam a emissão de toda a vida do material.

Figura 2 - Resumo do impacto ambiental desde a produção até a reciclagem do aço.



(Fonte: ANDERSSON *et al.* 2017)

Segundo Teles e Gomes (2010) a otimização possui vantagens em vários aspectos como a diminuição do tempo dedicado ao projeto, a possibilidade de tratamento simultâneo de uma grande quantidade de variáveis e de restrições e redução de custo. Porém, existem desvantagens como aumento do tempo computacional, a convergência tende a ser lenta em funções descontínuas e a presença de muitos pontos ótimos locais.

A otimização de estruturas, através de algoritmos meta-heurísticos tem um importante papel nos trabalhos de minimização de custos em problemas de mecânica computacional. Algoritmos genéticos em especial se mostram muito eficazes nessas otimizações. De acordo com George (2002), os algoritmos genéticos veem o aprendizado como uma competição num universo de possíveis soluções para um problema. O critério é uma função chamada de aptidão ou adequação que avalia se cada solução contribuirá para a próxima geração de soluções.

Como nos últimos anos, os problemas ambientais se mostraram um fator alarmante na sociedade, a junção de uma otimização que levasse em conta a minimização das emissões de CO₂ e não apenas os custos envolvidos, se mostra muito relevante.

1.2 OBJETIVOS

Apresentar e aplicar a formulação do problema de otimização de um sistema de piso misto de aço e concreto tomando como função objetivo a minimização das emissões de CO₂. Neste sistema foram consideradas as lajes mistas de aço e concreto, os pilares, as vigas secundárias e principais, além de todas as armaduras que compõem a estrutura.

Entre os objetivos específicos podem-se citar:

- Formular o problema de otimização de pisos mistos de aço e concreto com indicadores de sustentabilidade;
- Analisar o impacto da resistência à compressão do concreto na solução do problema de otimização;
- Implementar rotina que gere automaticamente o piso com as vigas principais e secundárias, pilares e lajes;
- Analisar exemplos de validação e aplicações da formulação proposta;
- Fazer uma análise comparativa entre os algoritmos de otimização (Algoritmo Genético (AG) e Dispersão de Partículas (PSO)) de forma a avaliar a eficiência das soluções.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMAS MISTOS

Sistemas mistos se tornaram indispensáveis à construção civil nos últimos tempos. Uma estrutura constituída por sistemas mistos se destaca pela rapidez na execução, redução do peso da estrutura, aumento da rigidez, melhor proteção contra incêndio e resistência à corrosão (QUEIROZ *et al.*,2012). Da mesma forma Erdal, Tunca e Ozcelik (2020) apontam que entre outros benefícios, o tamanho dos vãos e custos de fundação reduzidos são as principais vantagens em se usar um sistema misto. Nesse trabalho foram realizados testes experimentais em seis vigas mistas com perfil I e biapoiadas com diferentes carregamentos. Os dimensionamentos foram realizados através de um simples algoritmo de busca global, nele foram consideradas quatro variáveis de projeto: os perfis de aço, a espessura da laje de concreto, número de conectores de cisalhamento e a tela soldada.

Baran e Topkaya (2012) realizaram um estudo experimental para a comparação de pinos soldados europeus (*European Channel Shear*) – ECS (Figura 3) com os valores encontrados na norma que especifica essas estruturas. Para isso foram realizados 15 testes *push-out* para a análise do comportamento dos pinos. As comparações das resistências obtidas foram feitas com os valores obtidos através da norma que especifica as estruturas de aço na América do Norte. Essa comparação mostrou que as normas são muito conservadoras aos resultados experimentais. A simplicidade na soldagem se mostra como a principal vantagem apresentada pelo ECS.

Figura 3 - European Channel Shear



(Fonte: BARAN e TOPKAYA, 2012)

Análises mais elaboradas sobre sistema de pisos mistos são realizadas no estudo de Favarato *et al* (2019), no qual foi apresentada uma metodologia de análise de estados limites últimos de lajes treliçadas pré-moldadas com perfil U conformado a frio. Entre outras conclusões, foi percebido que a forma em aço formado a frio condiciona o comprimento máximo do vão sem escoramento desses tipos de laje. Foi desenvolvida uma ferramenta computacional para avaliar a resistência por meio da entrada de dados relacionados à geometria, cargas de serviço e materiais, que permite realizar um estudo paramétrico com geometrias pré-definidas para obter, como resultado, tabelas de vãos e cargas.

Nessa mesma linha Guo *et al.* (2018) fizeram um estudo da resistência ao cisalhamento de estruturas mistas de aço e concreto com ênfase nas telas de aço postas dentro do concreto. Foram realizados 16 experimentos onde corpos de prova, que eram estruturas mistas, foram submetidos a esforços de cisalhamento. Os Estados Limites Últimos considerados foram flexão excessiva, cisalhamento total da laje e o esmagamento dos conectores de cisalhamento. Após a comparação dos resultados experimentais com valores teóricos calculados, foi ratificada a precisão dos métodos de cálculos.

Behnam e Kaveh (2012) implementaram a otimização do custo de um sistema de piso e laje mista através dos algoritmos *Charged System Search* (CSS) e *Enhanced Charged System Search* (E-CSS). A função objetivo é o custo do sistema estrutural e inclui os materiais e custo da construção. Foram realizadas comparações entre os dois algoritmos propostos e uma versão do *Harmony Search* (HS), a *Improved*

Harmony Search (IHS) em exemplos de laje mista lisa e laje nervurada unidirecional. Em todos os exemplos o CSS e E-CSS se mostram mais eficazes e precisos nos resultados. Zula *et al.* (2016) realizaram a otimização de um sistema composto por piso e viga mista. O método de otimização foi através do algoritmo de Programação não-linear Inteira Mista (MINLP). O dimensionamento foi realizado através do Eurocode 4 (2004) e os resultados ótimos incluíram os custos mínimos produzidos da estrutura, as resistências do concreto e aço além das dimensões. Nessa mesma linha Jia *et al.* (2019) fez um estudo experimental do comportamento de vigas mistas de lajes tubulares submetidas a flexão e a eventual otimização dos principais parâmetros construtivos. Nesse trabalho, nove lajes simplesmente apoiadas foram carregadas até a falha ou o desenvolvimento de fissuras. Entre outras conclusões foi observado que a uma menor resistência à compressão do concreto aumenta a ductilidade dos tubos de aço que formam a laje.

2.2 OTIMIZAÇÃO E ALGORITMOS META-HEURÍSTICOS

A otimização é o estudo de problemas em que se busca minimizar ou maximizar uma função escolhendo sistematicamente os valores das variáveis contidas num conjunto permitido. Os métodos baseados em gradiente convergem rapidamente para uma solução, mas como Kaveh (2014) salienta, que esse método não se mostra eficiente, pelo elevado nível de erro (convergência para mínimos locais) em funções e restrições não-lineares. Dentre os diferentes algoritmos baseado em meta-heurísticas mais utilizados para a otimização estrutural, pode-se destacar: o algoritmo genético, o *Harmonic Search*, o Algoritmo da Colônia de Formigas, o Algoritmo da Colmeia de Abelhas. Esses métodos procuram de maneiras diferentes dentro do domínio da solução as soluções ótimas particulares. Esses algoritmos são mais apropriados para encontrar soluções em regiões não-lineares. Como observa Gandomi *et al.* (2013), algoritmos meta-heurísticos geralmente têm um melhor desempenho que os heurísticos simples, pois naqueles há um tratamento particular na exploração da solução para evitar a errônea detecção de mínimos locais como globais. Algoritmos meta-heurísticos são algoritmos estocásticos com busca randômica e exploração das soluções. A randomização é uma maneira eficaz de se afastar de mínimos locais e se atentar aos mínimos globais. Portanto, os algoritmos meta-heurísticos são adequados para modelagem não linear e otimização global.

Otimização de estruturas de aço foram analisadas por Degertekin (2008) através do algoritmo *Harmonic Search (HS)* proposto por Geem, Kim e Loganathan (2001) que é baseado no processo de improvisação de músicos de jazz, onde é buscada uma harmonia perfeita entre todos os componentes da função objetivo. A comparação do *HS* frente ao Algoritmo Genético e Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization*) – ACO, que originalmente foi proposto por Dorigo e Di Caro (1999), se mostrou melhor adaptado à medida que a altura dos pórticos dos exemplos aumentava. Com uma pequena mudança, Hasançebi *et al.* (2010) apresentaram o *Adaptive Harmonic Search (AHS)* uma nova formulação para o algoritmo. Esse novo método proposto se mostrou mais eficiente que o *HS* padrão e manteve uma alta precisão em relação a uma solução ótima anteriormente proposta às simulações submetidas.

Alguns algoritmos meta-heurísticos têm a sua base em fenômenos da natureza. Bakhshpoori e Kaveh (2016) propuseram um algoritmo para problemas de otimização estrutural, chamado *Water Evaporation Optimization (WEO)* que é inspirado na evaporação de um minúsculo grupo de moléculas de água. Foram considerados exemplos de treliças e os resultados da otimização demonstraram competitividade de desempenho para problemas de otimização estrutural com variáveis contínuas. Yang e Gandomi (2012) implementaram, em 8 problemas de otimização estrutural, um algoritmo baseado no comportamento de ecolocalização de morcegos. A eficácia dos resultados do *Bat Algorithm (BA)* foi testada numa comparação com as respostas de outros algoritmos, a citar AG, *HS* e *PSO (Particle Swarm Optimization)*. Em todos os resultados o BA se mostrou mais eficiente.

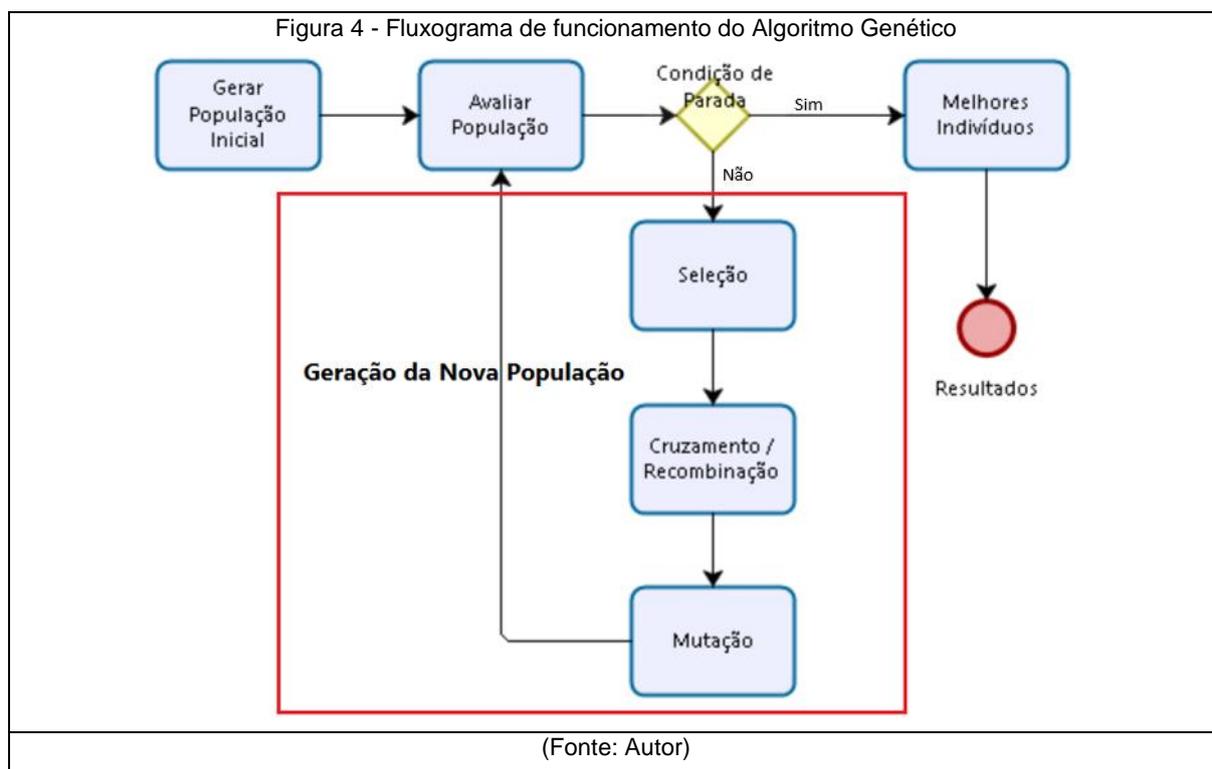
Com o auxílio de redes neurais e *Machine Learning*, Shariati *et al.* (2019) realizaram um estudo para prever o comportamento de conectores de cisalhamentos num sistema de pisos compostos para diferentes temperaturas. A rede neural foi alimentada com o resultado do comportamento dos conectores de cisalhamento para diferentes carregamentos e diversas temperaturas.

2.2.1 Algoritmo Genético (AG)

O algoritmo genético (AG) proposto por Holland (1962) apresenta as condições necessárias para a otimização de problemas com altas taxas de não-linearidade. Ele é baseado na teoria evolucionária de Charles Darwin, que entre outras conclusões mostrou que a adaptabilidade é o que difere a sobrevivência e a extinção de uma espécie.

Trazendo ao mundo computacional o AG realiza mudanças, através de mecanismos de mutação, seleção, recombinação e cruzamento, em uma população inicial qualquer, para esse se adaptar às restrições que são

impostas para sua existência. O seu funcionamento pode ser visto no fluxograma da Figura 4.



De Medeiros *et al.* (2018) apresenta uma formulação para a otimização de custos de vigas mistas de aço e concreto utilizando o algoritmo genético. Os elementos incluídos na análise, foram a viga de aço, os conectores de cisalhamento e o concreto utilizado. Um estudo adicional foi realizado para investigar os efeitos dos carregamentos e vãos na otimização do custo dessas vigas. Os resultados nos exemplos apresentados apontaram que houve uma redução substancial no custo, do modelo com o algoritmo genético.

Na utilização de algoritmos genéticos, o trabalho de Senouci e Al-Ansari (2009) apresenta uma formulação para a otimização de custos de vigas mistas de aço e concreto. Os elementos incluídos na análise, foram a viga de aço, os conectores de cisalhamento e o concreto utilizado. Um estudo adicional foi realizado para investigar os efeitos dos carregamentos e vãos na otimização do custo dessas vigas. Os resultados nos exemplos apresentados apontaram que houve uma redução substancial no custo, do modelo com o algoritmo genético.

De Lazzari, Alves e Calenzani (2020) realizaram otimizações estruturais com o AG. Nesse trabalho foi apresentada a formulação do dimensionamento otimizado de pórticos espaciais com perfis I e H em primeira ordem. Foram propostos 3 exemplos

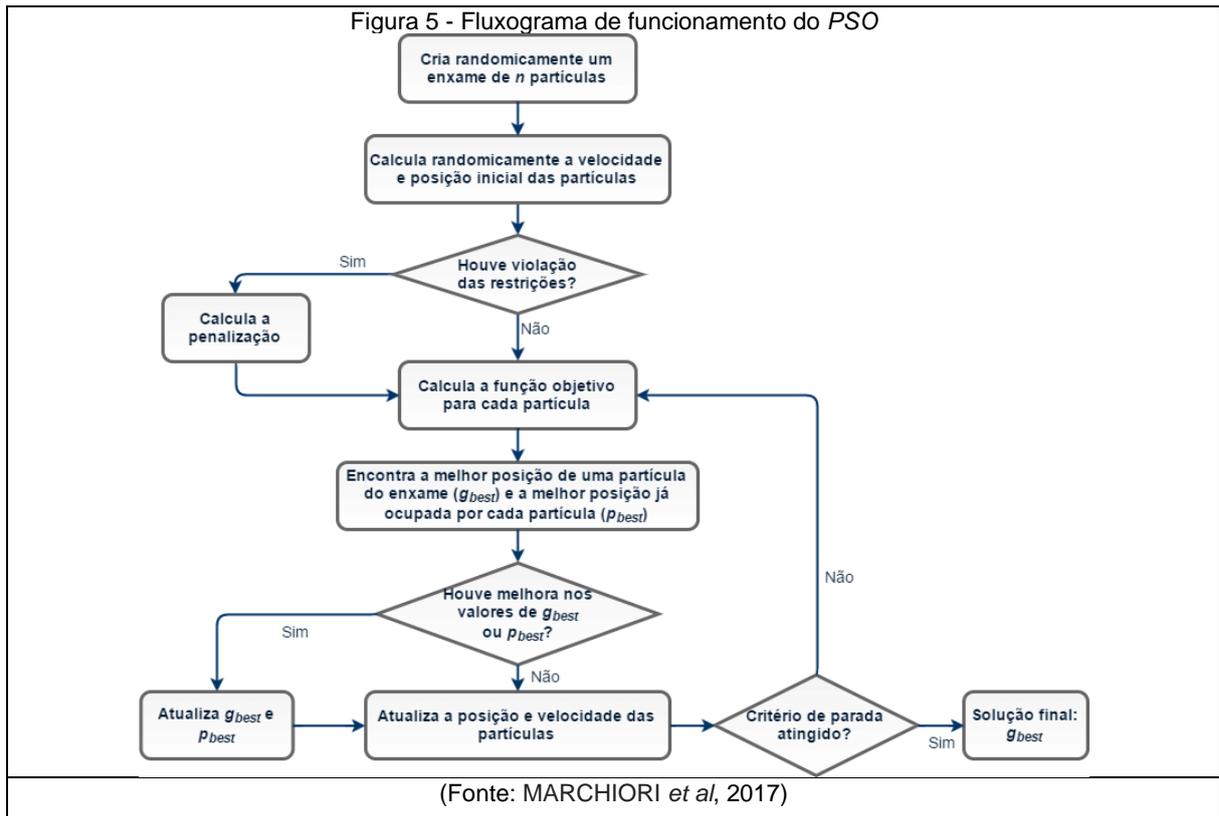
para validação e comparação dos resultados com o CYPE 3D. Dessa maneira, mostrou-se que o resultado encontrado pelo software desenvolvido utilizando o AG foi 37% mais leve em comparação com o CYPE 3D.

Posteriormente, Breda, Pietralonga e Alves (2020) apresentam um estudo sobre otimização de piso misto utilizando AG, considerando como variável de projeto as vigas secundárias que compõem o piso, a forma *steel deck*, os conectores de cisalhamento e a malha de aço que compõe a laje.

Alves e Ramos (2021) utilizaram o Algoritmo Genético para a formulação do problema de otimização de vigas mistas casteladas de aço e concreto. Também foram analisados de forma numérica os modos de colapso preponderantes de vigas mistas com interação completa. Os resultados obtidos foram que, em todos os exemplos, os ELU foram a plastificação da abertura do perfil e a plastificação do perfil por flexão, além do mais encontrou-se uma redução do peso do perfil de 21% com o auxílio do AG.

2.2.2 Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization*)

A otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization - PSO*) proposta primeiramente por Kennedy e Eberhart (1995) apresenta um método de otimização de funções não-lineares e contínuas. O método foi apresentado inicialmente através da simulação de um modelo social simplificado. Esse método tem base no comportamento coletivo de sistemas descentralizados que se *auto-organizam* e geram novas configurações. Uma das vantagens observadas nessa metaheurística é a resiliência à extremos locais. A base teórica do algoritmo *PSO* pode ser visto no fluxograma da Figura 5.



Poli (2008) salienta que os algoritmos que usam dispersão de partículas são inspirados em bandos de pássaros, enxame de abelhas ou cardumes de peixes, nesses algoritmos uma série de entidades simples, as partículas, são colocadas no espaço de parâmetros de algum problema ou função, e cada uma avalia a aptidão em relação às restrições em sua localização atual. Os membros com que uma partícula pode interagir são chamados de sua vizinhança. Na versão canônica do *PSO*, cada partícula é movida por duas forças elásticas, uma atraindo-a com magnitude aleatória para o local mais adequado até agora encontrado e outra que a atrai com magnitude aleatória para a melhor localização encontrada por qualquer uma das partículas do enxame total.

Após três anos da primeira proposição do *PSO*, Eberhart e Shi (1998) propuseram um trabalho no qual o Algoritmo Genético e *PSO* foram objeto de comparação, nesse artigo foi avaliado como cada algoritmo funciona e sugere maneiras nas quais o desempenho pode ser melhorado incorporando recursos de um algoritmo ao outro.

A modificação do *PSO* também é alvo de estudo para melhorar o desempenho do algoritmo frente a mínimos locais e tempo de busca das soluções ótimas. Nessa linha o estudo realizado por Kaveh e Talatahari (2012) no qual é proposto um

algoritmo metaheurístico híbrido entre o *PSO* e o *Charged System Search (CSS)*, que é inspirado nas leis da eletrostática de Coulomb e Gauss, para a otimização de estruturas espaciais em aço. Três exemplos foram modelados com novo algoritmo e se mostraram mais econômicos comparado aos algoritmos sem modificação.

Ratnaweera *et al* (2004) propuseram um novo parâmetro de automação para a busca de estratégias, afim de melhor o desempenho do algoritmo após um número pré-definido de gerações. Essa modificação proposta no método, mostrou uma significativa melhora na taxa de velocidade com que as soluções convergiam para mínimos globais.

Barbosa e Lemonge (2008) propuseram um método de penalidade das soluções não viáveis denominado Método de Penalidade Adaptativa (*APM*), de forma a melhorar os critérios de busca e convergência do algoritmo para a solução ótima. O método baseia-se em penalizar as soluções não viáveis do problema de otimização recursivamente em cada geração do processo.

Carvalho *et al.* (2018) propuseram uma variação do *PSO* denominado *Craziness Based Particle Swarm Optimization (CRPSO)*. Nesta variação os autores demonstram uma melhoria no processo de convergência e de resultados ao variarem os coeficientes utilizados para o cálculo das novas posições das partículas e das velocidades em cada iteração do processo.

Na linha de otimização estrutural com o algoritmo *PSO*, o trabalho de Poitras, Cormier e Nabolle (2018) buscou estabelecer uma relação entre as soluções ótimas de sistemas de pisos compostos por vigas mistas de aço e concreto e o grau de interação entre o aço e o concreto. Os resultados mostraram que o *PSO* pode encontrar a configuração de piso ideal, minimizando a massa total ou custo e satisfazendo todos os critérios de restrições.

Algumas outras aplicações do *PSO* em otimização estrutural podem ser vistas em diversos trabalho da literatura. Pode-se citar as aplicações em: treliças planas e espaciais realizadas por Perez e Behdinan (2007), Plevris e Papadrakakis (2011) e Kaveh e Zolghadr (2014); pórtico planos isostáticos realizado por Di Cesare e Domaszewski (2019) e por Jiang *et al* (2019) e em barragens de concreto realizado por Li *et al.*(2011).

2.3 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL E SUSTENTABILIDADE

Trazendo à tona a otimização de parâmetros de sustentabilidade em estruturas, Paya-Zaforteza *et al.* (2009), realizaram um trabalho onde é otimizado o custo e as emissões de CO₂ de 6 pórticos planos de concreto armado com o algoritmo do Recozimento Simulado, que faz analogia a um processo de resfriamento da metalurgia. Nesse estudo encontrou-se que a melhor solução ambiental foi apenas 2,77% mais cara que a melhor solução econômica, enquanto essa melhor solução econômica representa um acréscimo de 3,80% nas emissões de CO₂.

Camp e Huq (2013) fizeram um estudo onde o objetivo era a redução de CO₂ emitido pelo concreto em pórticos de concreto armado. Para isso, foi utilizado um algoritmo de otimização híbrido chamado *Big Bang-Big Crunch* (BB-BC). Proposto primariamente por Erol e Eksin (2006), este algoritmo se baseia na teoria de evolução e expansão do universo iniciado no Big Bang e a seu eventual colapso chamado Big Crunch. Em todos os exemplos o BB-BC se mostrou mais eficiente, diminuindo em até 5,2% a emissão de CO₂ se comparado ao Algoritmo Genético.

Lanikova, Štěpánek e Simůnek (2014) utilizaram o método de Monte Carlo para otimizar a emissão de CO₂ e SO₂ modificando a forma da seção de estruturas de concreto. Para a validação do método e análise dos resultados foi dimensionado um pilar de concreto, os resultados foram que o método utilizado conseguiu diminuir as emissões dos gases supracitados em até 11% em relação à forma convencional de produção.

Yeo e Potra (2015) também realizaram testes de otimização de estruturas de concreto armado. Os resultados encontrados, mostraram que a otimização do impacto ambiental se dá através da adição na quantidade relativa de aço dentro das seções transversais dos membros. Outro resultado importante é que o uso do modelo de otimização proposto para pequenas estruturas mostra uma diferença entre emissões de cerca de 10%, esse número aumenta à medida que as dimensões das estruturas também aumentam.

García-Segura e Yepes (2016) apresentaram a otimização dos custos e das emissões de CO₂ de pontes rodoviárias de concreto protendido pós-tensionado, para isso foi realizado uma formulação do problema numa análise por elementos finitos.

Os resultados mostraram que a otimização dos custos e do impacto ambiental foram semelhantes e achou-se uma redução média de 2,34 kg de CO₂ a cada € 1 economizado.

Também relacionando a otimização dos custos, Kaveh, Izadifard e Mottaghi (2020) faz um estudo, onde é investigado a relação entre o custo ótimo e a menor quantidade de CO₂ emitida para pórticos de concreto armado. Foram utilizados os algoritmos *Enhanced Colliding Bodies Optimization* (ECBO), *Enhanced Vibrating Particles System* (EVPS) e *Particle Swarm Optimization* (PSO) para a comparação das soluções ótimas. Os resultados mostraram que o ECBO apresentou uma maior capacidade de pesquisa e conseqüentemente resultou em melhores soluções para os exemplos propostos.

Nesta mesma linha, Lagaros (2018) discute em seu trabalho se, no ponto de vista econômico e ambiental, os estudos para a busca de otimização estrutural valem a pena. É destacado que a discussão sobre a utilização de materiais com menores impactos ambientais se torna a base para a formação de futuras gerações de engenheiros estruturais.

Em exemplos com algoritmos voltados à otimização da emissão, Medeiros e Kripka (2014) dão ênfase aos danos ambientais causados pelo transporte e fabricação de insumos de concreto armado. Deste modo, foi feito um estudo para a otimização dos custos monetários e ambientais de colunas de concreto armado, retangulares, submetidas a cargas de compressão e flexão através do HS. As emissões ambientais foram determinadas através da análise do ciclo de vida do concreto.

No trabalho de Tormen *et al.* (2020) é realizada a formulação para a otimização com o uso do HS da emissão de CO₂ em vigas mistas de aço e concreto biapoiadas. É realizado um estudo sobre as soluções otimizadas para diferentes vãos com uma interação mínima de 40%. As conclusões apontaram que o aumento da espessura e da largura das mesas dos perfis de aço proporcionaram um aumento da inércia e, conseqüentemente, a melhoria da capacidade de resistência e economia de material. Em relação ao grau de interação e ao número de conectores, verificou-se que, em geral, o custo pouco se alterou nessa variação.

Nesta mesma linha, Santoro e Kripka (2020) apresentam a formulação do problema de otimização para vigas de concreto armado bem como a previsão da emissão de CO₂ para diferentes composições de concreto com a resistência a compressão variando de 20 até 50 MPa. Neste estudo são apontados que em relação à emissão de CO₂ há uma redução nos custos para soluções com concretos menos resistente além disso é concluído que as eventuais reduções nas dimensões da seção transversal das vigas tendo como base uma maior resistência do concreto podem não mostrar resultados satisfatórios em relação aos impacto ambiental e custo financeiro.

Arpini e Alves (2021) fizeram um estudo, no qual o algoritmo genético foi utilizado para otimização de um sistema de piso misto, entretanto os pilares estavam submetidos apenas à força de compressão. Foi verificado que com o auxílio do AG foi possível uma redução de até 12,7% da emissão total da estrutura.

Arpini *et al.* (2022) fizeram um estudo de sistemas de piso, onde foi avaliado o impacto da resistência do concreto na otimização das lajes *steel deck*, vigas principais e secundária, além das armaduras que compõem a laje. Neste estudo foi verificado que nem sempre a melhor solução do ponto de vista da emissão do CO₂ é a melhor solução do ponto de vista econômico.

Assim, é possível perceber poucas pesquisas na parte de otimização através de algoritmos genéticos relacionados ao impacto ambiental associado à construção civil, que é o principal objetivo desta pesquisa.

A Tabela 1 mostra a comparação deste trabalho em relação aos estudos semelhantes encontrados.

Tabela 1 - Principais estudos sobre otimizações estruturais

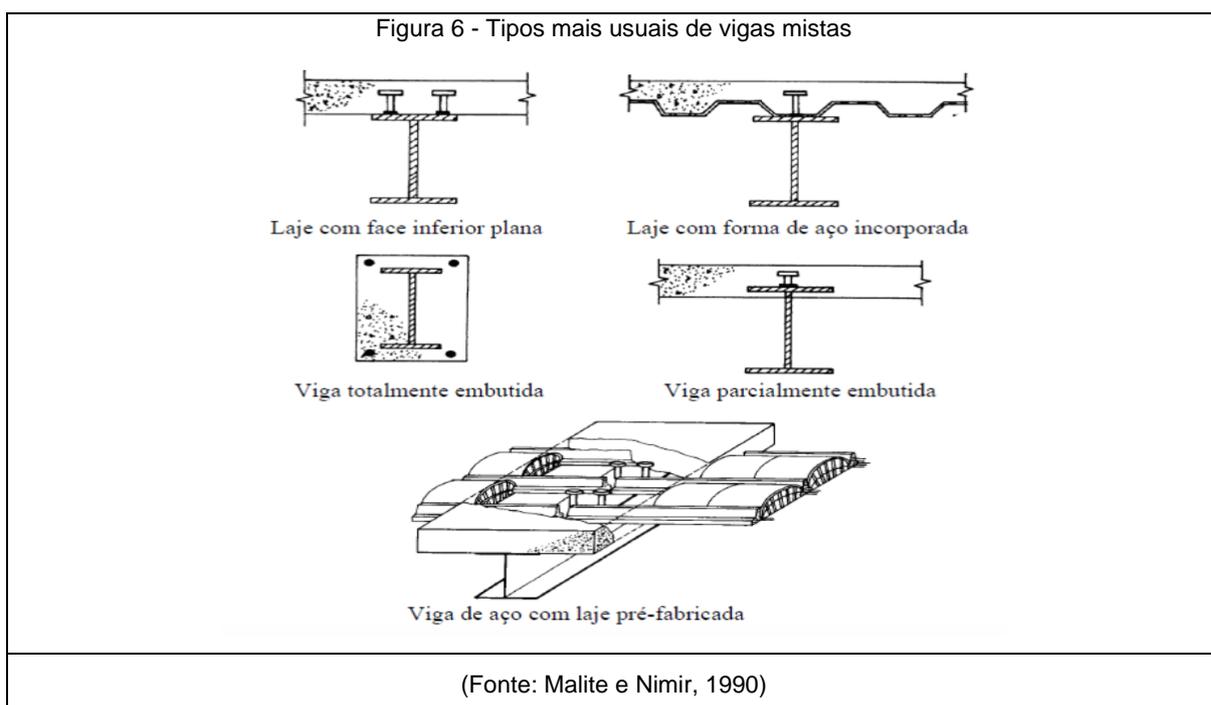
Autor (ano)	Algoritmos baseados em Metaheurísticas	Otimização com PSO	Otimização com AG	Estruturas Mistas de aço e concreto	Otimização do Impacto Ambiental	Otimização dos Custos
Degertekin (2008)	X		X			X
Paya-Zaforteza <i>et al.</i> (2009)	X				X	
Senouci e Al-Ansari (2009)	X		X	X		X

Postras <i>et al.</i> (2011)	X		X	X		X
Baran e Topkaya (2012)				X		X
Behnam e Kaveh (2012)	X	X	X	X		X
Kaveh e Talatahari (2012)	X	X				
Yang (2012)	X			X		X
Camp e Huq (2013)	X	X	X		X	
Kripka e De Medeiros (2014)	X	X			X	X
Lanikova, Štěpánek e Simůnek (2014)	X	X			X	
Yeo e Potra (2015)		X				X
Bakhshpoori e Kaveh (2016)	X					
García-Segura e Yepes (2016)		X			X	X
Zula <i>et al.</i> (2016)	X			X		X
Carvalho <i>et al.</i> (2018)	X	X				
De Medeiros <i>et al.</i> (2018)	X		X	X		X
Guo <i>et al.</i> (2018)				X		X
Lagaros (2018)	X			X	X	
Postras, Cormier e Nabolle (2018)	X	X		X		X
Di Cesare e Domaszewski (2019)	X	X				X
Favarato <i>et al.</i> (2019)				X		X
Shariati <i>et al.</i> (2019)	X			X		
Breda <i>et al.</i> (2020)	X		X	X		X
De Lazzari, Alves e Calenzani (2020)	X	X	X			X
Erdal <i>et al.</i> (2020)	X			X		X
Kaveh, Izadifard e Mottaghi (2020)	X	X			X	
Santoro e Kripka (2020)	X				X	X
Tormen <i>et al.</i> (2020)	X			X	X	X
Arpini e Alves (2021)	X		X	X	X	
Alves e Ramos (2021)	X	X	X	X		X
Arpini <i>et al.</i> (2022)	X		X	X	X	X
Este trabalho	X	X	X	X	X	X

3 DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS MISTAS

3.1 Pisos mistos

O sistema de pisos mistos é composto por vigas mistas, que são elementos estruturais originados da união de uma viga de aço com uma laje de concreto, da qual a ligação é feita entre a mesa superior do perfil e a laje por meio de conectores de cisalhamento. Com isso é possível uma interação entre os dois materiais para resistir aos esforços solicitantes. Segundo Malite e Nimir (1990) a utilização da ação mista é interessante porque, com um pequeno custo adicional necessário para se efetuar a devida ligação entre aço e concreto, pode-se obter redução de peso e de dimensões das vigas. No Brasil, a NBR 8800 (2008), no anexo O é responsável por regulamentar o projeto de vigas mistas. A Figura 6 mostra os tipos mais usuais de vigas mistas.



3.1.1 Conectores de cisalhamento

As vigas mistas possuem características de resistência baseadas na interação do perfil metálico com a laje de concreto armado. Porém, existem esforços de cisalhamento em ambas as direções que precisam ser combatidos, visto que as forças de atrito presente não são consideradas no cálculo da resistência da peça.

Sendo assim, é necessário o uso de conectores de cisalhamento para absorver os esforços de cisalhamento e impedir o afastamento vertical entre a laje e a viga de aço. Os conectores são importantes para que o conjunto de viga e laje atue como uma seção mista, e não como elementos independentes, ou seja, evita o deslizamento entre a viga e laje.

Os conectores podem ser classificados como flexíveis e rígidos. O conceito de rigidez está relacionado com a capacidade de restrição ao escorregamento imposta pela ligação viga de aço e laje de concreto. Os conectores tipo pino com cabeça são os mais utilizados dentre os flexíveis, devido a facilidade de fabricação. Além disso, apresentam a mesma resistência em todas as direções. A característica estrutural mais importante dos conectores de cisalhamento é a relação existente entre a força transmitida pelo conector e o escorregamento relativo na interface aço-concreto, determinando um comportamento predominantemente dúctil. A resistência do conector de cisalhamento tipo pino com cabeça é determinada pela Equação (1).

	$Q_{Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} \cdot E_c}}{\gamma_{cs}} \\ \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \end{array} \right. \quad (1)$	
--	---	--

Onde:

A_{cs} é a área transversal do conector de cisalhamento *stud bolt*;

f_{ck} é a resistência à compressão do concreto;

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

γ_{cs} é o coeficiente para ponderação da resistência do conector;

R_g é o coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores;

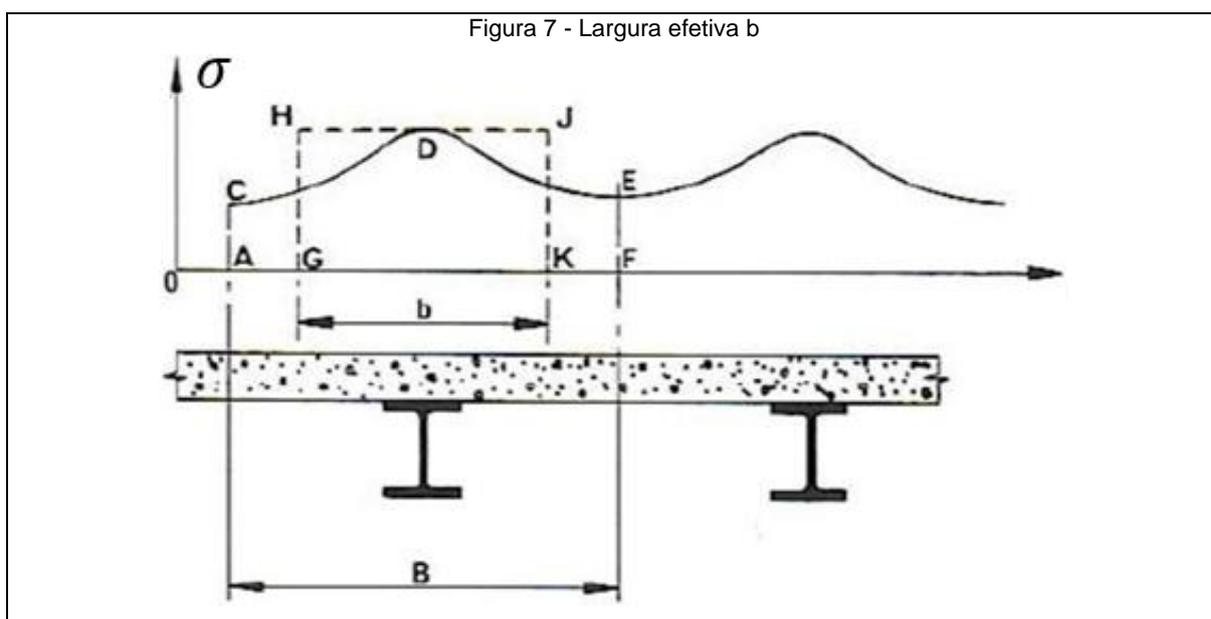
R_p é o coeficiente para consideração da posição do conector;

f_{ucs} é a resistência à ruptura do aço do conector;

3.1.2 Largura efetiva

A Teoria elementar da flexão em vigas admite que a variação de tensões normais da laje de concreto seja uniforme, porém isso não ocorre na realidade. As tensões normais na laje tendem a ser máximas sobre as vigas, onde ocorrem a ligação, em função da tensão de cisalhamento transmitida pelos conectores, e decrescem à medida que vão se afastando do eixo da viga. Para simplificar o cálculo de uma viga mista é necessário que se calcule uma largura fictícia, denominada largura efetiva, que quando multiplicada pela tensão máxima, fornece um valor equivalente ao real, dado pela distribuição não uniforme das tensões.

Fuzihara (2006) mostra que na teoria elementar da flexão em vigas se supõe que a variação transversal das tensões longitudinais na laje de concreto tem distribuição uniforme, mas isso não ocorre, e essa não uniformidade das tensões é devida ao efeito *shear lag*, ou seja, devido à deformabilidade da laje. A Figura 7 mostra que a tensão máxima ocorre no ponto D que é junto a ligação, e vai diminuindo à medida que se distancia do centro da viga, nos pontos C e E, assim, a largura total da laje não tem contribuição efetiva, levando ao conceito de largura colaborante ou efetiva. Para obter a largura efetiva, a largura real da mesa B é substituída por uma largura fictícia b , de maneira que a área GHJK seja igual à área ACDEF.



A largura efetiva da mesa de concreto para vigas mistas de aço e concreto são definidas de acordo com o menor dos seguintes valores.

Para Vigas biapoiadas:

- 1/8 do vão da viga mista, considerado entre linhas de centro dos apoios;
- metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente;
- distância da linha de centro da viga à borda de uma laje em balanço.

Para vigas mistas contínuas e semicontínuas:

- Nas regiões de momento positivo
 - 4/5 da distância entre apoios, para vãos externos
 - 7/10 da distância entre apoios, para vãos internos
- Nas regiões de momento negativo
 - 1/4 da soma dos vãos adjacentes

3.1.2.1 Limitações normativas

A norma limita a relação entre a altura e a espessura da alma (h/t_w) inferior ou igual a $5,7 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$. Caso, (h/t_w) seja menor ou igual a $3,76 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$ diz-se que as vigas são compactas e serão dimensionadas utilizando as propriedades plásticas da seção mistas. Se (h/t_w) foi maior que $3,76 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$ as vigas mistas são de alma cheia e serão dimensionadas com as propriedades elásticas da seção mista.

Onde:

h_w é a altura da alma do perfil de aço;

t_w é a espessura da alma;

E_a é o módulo de elasticidade do aço;

f_y é a resistência do aço à tração;

O grau de interação da viga mista de alma cheia é dado pela Equação (2).

	$\eta_i = \sum Q_{Rd}/F_{hd}$	(2)
--	-------------------------------	-----

O grau de interação tem seu valor limitado às seguintes situações:

Perfis com mesas de áreas iguais:

- $\eta_i = 1 - \frac{E}{578f_y} (0,75 - 0,03L_e) \geq 0,40$ para $L_e \leq 25m$;
- $\eta_i = 1$ para $L_e > 25m$ (Interação completa);

Perfis com a área da mesa inferior sendo menor ou igual a três vezes a área da mesa superior:

- $\eta_i = 1 - \frac{E_a}{578f_y} (0,30 - 0,015L_e) \geq 0,40$ para $L_e \leq 20 m$;
- $\eta_i = 1$ para $L_e > 20 m$ (Interação completa);

Onde:

F_{hd} é a força de cisalhamento de cálculo entre o componente de aço e a laje;

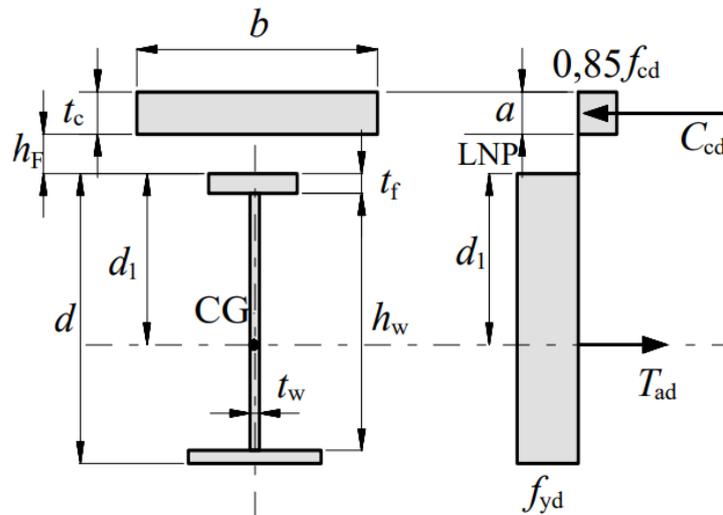
η_i é o grau de interação

L_e é o comprimento destravado

3.1.3 ELU em regiões de momento positivo

As vigas mistas secundárias do piso misto são dimensionadas como viga biapoiadas. Dessa forma, para vigas compactas, com interação completa e com linha neutra da seção plastificada passando na laje de concreto surgem as forças T_{ad} e C_{cd} no perfil de aço e no concreto, respectivamente. A Figura 8 mostra as tensões atuantes nas vigas mistas com essa configuração.

Figura 8 - Tensões em vigas mistas em momentos positivos



(Fonte: NBR 8800, 2008)

Dessa configuração, tem-se as Equações (3) e (4) para interação total e Linha Neutra Plástica passando na laje:

	$\sum Q_{Rd} \geq A_a f_{yd}$	(3)
	$0,85 f_{cd} b t_c \geq A_a f_{yd}$	(4)

Em que:

A_a é a área da seção transversal do perfil de aço;

b é a largura efetiva;

t_c é a altura da laje de concreto acima do topo da fôrma de aço;

f_{yd} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço;

f_{cd} é a resistência de cálculo do concreto à compressão;

Dessa forma, tem-se as Equações (5), (6), (7) e (8):

	$C_{cd} = 0,85 f_{cd} b a$	(5)
	$T_{ad} \geq A_a f_{yd}$	(6)
	$a = \frac{T_{ad}}{0,85 f_{cd} b} \leq t_c$	(7)
	$M_{Rd} = T_{ad} \left(d_1 + h_F + t_c - \frac{a}{2} \right)$	(8)

Onde:

C_{cd} é a força resistente de cálculo da espessura comprimida da laje;

T_{ad} é a força resistente de cálculo da espessura tracionada do perfil de aço;

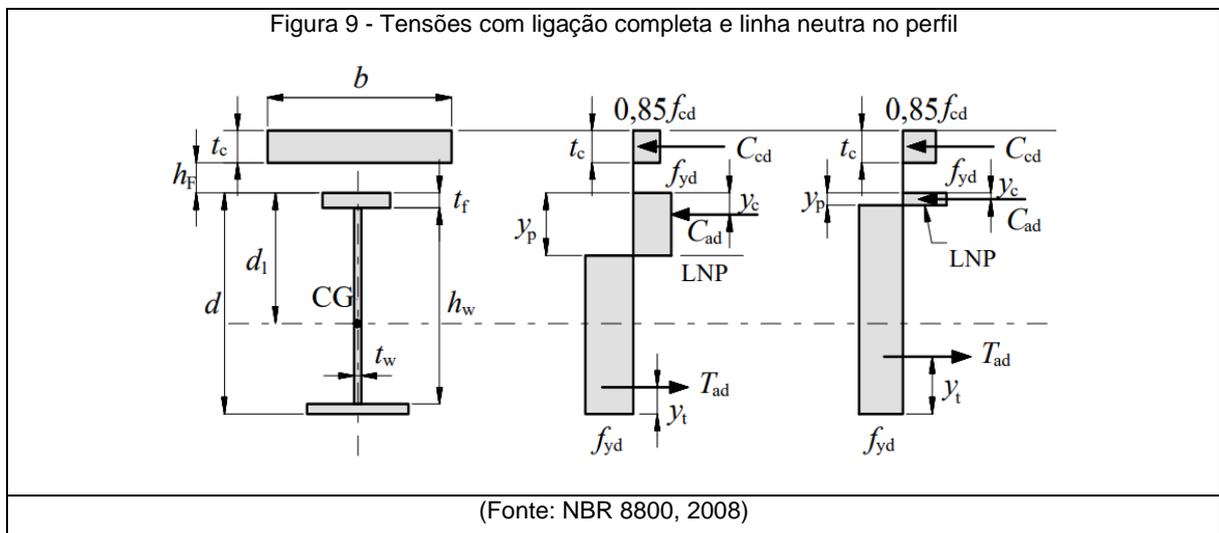
a é a altura da linha neutra medida a partir da laje de concreto;

M_{Rd} é o momento fletor resistente de cálculo;

h_F é a altura das nervuras do *steel deck*;

d_1 é a distância do centro geométrico do perfil de aço até a face superior desse perfil;

Nas vigas mistas compactas, com interação completa e linha neutra da seção plastificada passando no perfil de aço tem-se duas situações distintas que podem ocorrer. A linha neutra passando pela mesa superior ou pela alma do perfil de aço. Dessa forma tem-se uma tensão de compressão resistida pelo perfil de aço por isso surge a força C_{ad} no sistema. A Figura 9 mostra as tensões atuantes na viga mista nesse caso:



As Equações 9 e 10 são satisfeitas nessas condições e conseqüentemente podem ser definidas, nas Equações 11, 12 e 13 as tensões apresentadas anteriormente:

	$\sum Q_{Rd} \geq 0,85 f_{cd} b t_c$	(9)
	$A_a f_{yd} \geq 0,85 f_{cd} b t_c$	(10)
	$C_{cd} = 0,85 f_{cd} b t_c$	(11)
	$C_{ad} = \frac{1}{2} (A_a f_{yd} - C_{cd})$	(12)
	$T_{ad} = C_{ad} + C_{cd}$	(13)

Se $C_{ad} \leq A_a f_{yd}$, então a linha neutra está na mesa superior e $y_p = \frac{C_{ad}}{A_a f_{yd}} t_f$.

Se $C_{ad} > A_a f_{yd}$, então a linha neutra se encontra na alma e $y_p = t_f + h_w \left(\frac{C_{ad} - A_a f_{yd}}{A_{aw} f_{yd}} \right)$.

Com isso o momento fletor resistente de cálculo fica igual a Equação 14.

	$M_{Rd} = C_{ad}(d - y_t - y_c) + C_{cd} \left(\frac{t_c}{2} + h_F + d - y_t \right)$	(14)
--	--	------

Onde:

C_{ad} é a força resistente de cálculo da região comprimida do perfil de aço;

d é a altura total do perfil de aço;

A_{af} é a área da mesa superior do perfil de aço;

A_{aw} é a área da alma do perfil de aço;

h_w é a altura da alma;

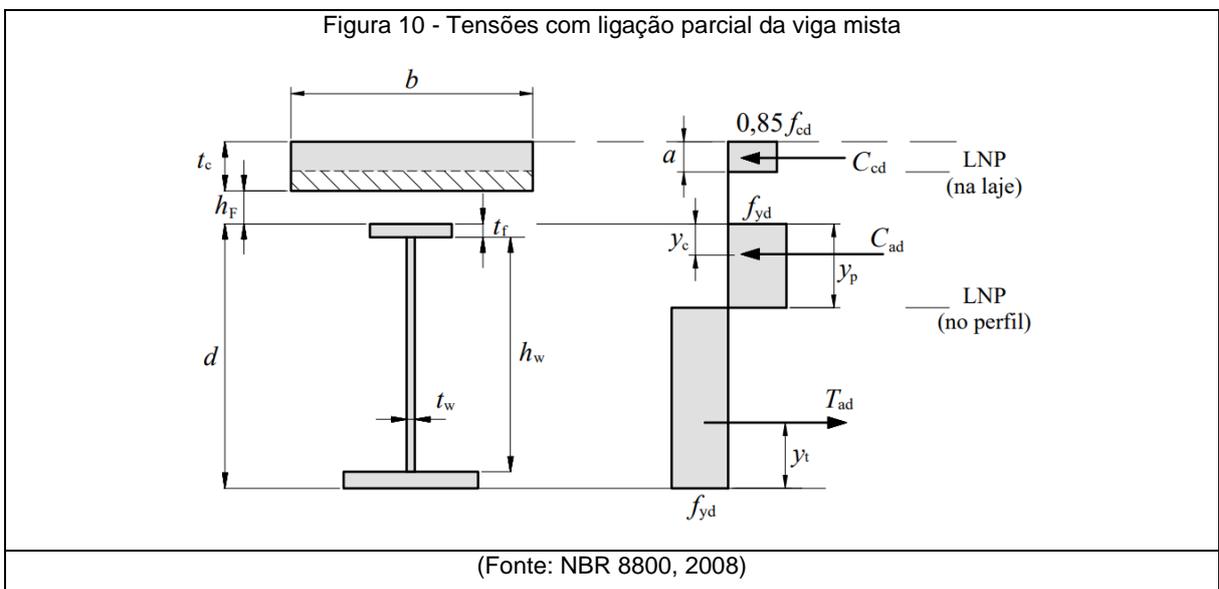
y_t é a distância do centro geométrico da parte tracionada do perfil de aço até a face superior desse perfil;

y_c é a distância do centro geométrico da parte tracionada da parte comprimida do perfil de aço até a face superior desse perfil;

Caso a quantidade de conectores de cisalhamento seja menor que a força resistente de cálculo da região tracionada do perfil de aço ou que a força resistente de cálculo

da espessura comprimida da laje de concreto, tem-se a interação parcial da viga mista, conseqüentemente obtém-se as Equações 15 e 16. A Figura 10 mostra as tensões atuantes numa viga mista com interação parcial.

	$\sum Q_{Rd} < A_a f_{yd}$	(15)
	$\sum Q_{Rd} < 0,85 f_{cd} b t_c$	(16)



Como mostrado na Equação 17 a tensão F_{hd} é definida como:

	$F_{hd} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,85 f_{cd} b t_c \\ A_a f_{yd} \end{array} \right.$	(17)
--	--	------

E assim, chega-se à Equação 20 do momento fletor resistente.

	$C_{cd} = \sum Q_{Rd}$	(18)
	$a = \frac{C_{cd}}{0,85 f_{cd} b}$	(19)
	$M_{Rd} = C_{ad}(d - y_t - y_c) + C_{cd} \left(t_c - \frac{a}{2} + h_F + d - y_t \right)$	(20)

Em vigas mistas com perfil de alma de esbeltez entre $3,76 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$ e $5,7 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$, será calculado os valores das tensões de tração na face inferior do perfil de aço (σ_{td}) e de compressão na face superior da laje de concreto (σ_{cd}). Esses valores não devem ultrapassar os valores de f_{yd} e f_{cd} , para o aço e concreto respectivamente.

Para interação completa, tem-se que as Equações 21 e 22 devem ser satisfeitas e as tensões solicitantes de cálculo são determinadas por análise elástica, com base nas propriedades da seção mista homogeneizada. Dessa forma as tensões solicitantes são dadas por:

	$\sigma_{td} = \frac{M_{Sd}}{(W_{tr})_i}$	(21)
	$\sigma_{cd} = \frac{M_{Sd}}{[\alpha_E(W_{tr})_s]}$	(22)

Na interação parcial as verificações das vigas mistas com perfis de esbeltez entre $3,76 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$ e $5,7 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$ são as mesmas que as das interação completa com uma pequena diferença no valor de $(W_{tr})_i$, que agora será definido como:

	$W_{ef} = W_a + \sqrt{\frac{\sum Q_{Rd}}{F_{hd}}} [(W_{tr})_i + W_a]$	(23)
--	---	------

Sendo que:

σ_{td} é a tensão de tração na face inferior do perfil de aço;

σ_{cd} é a tensão de compressão na face superior da laje de concreto;

M_{Sd} é o momento fletor solicitante de cálculo;

$(W_{tr})_i$ é o módulo de resistência elástico inferior da seção mista;

$(W_{tr})_s$ é o módulo de resistência elástico superior da seção mista;

W_a é o módulo de resistência elástico inferior do perfil de aço;

W_{ef} é o módulo de resistência elástico inferior da seção mista com conexão parcial;

O escoramento em vigas mista possibilita que a solicitação que o perfil de aço sofra antes da cura do concreto seja mínima. Pfeil e Pfeil (2009) dizem que quando é atingida a resistência necessária ao concreto, o escoramento é retirado e as solicitações devidas ao peso próprio e demais cargas atuam sobre a seção mista. Em construções não escoradas, o perfil de aço é solicitado durante todo o processo construtivo, inicialmente pelo peso do concreto fresco, sobrecarga da construção e peso próprio do perfil de aço.

Após o endurecimento do concreto as cargas aplicadas atuarão na seção mista e não mais apenas no perfil de aço. O perfil de aço deve ter resistência que suporte todas as cargas de cálculo que serão aplicadas antes do concreto chegar a 75% da resistência de projeto. Além disso, para viga de alma de esbeltez entre $3,76 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$ e $5,7 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$ a Equação 24 deve ser satisfeita na mesa inferior da seção mais solicitada.

	$\left(\frac{M_{Ga,Sd}}{W_a}\right) + \left(\frac{M_{L,Sd}}{W_{ef}}\right) \leq f_{yd}$	(24)
--	---	------

3.1.3.1 ELU em regiões de momento negativo

As vigas externas que chegam aos pilares têm ligação da ligação engastada com os pilares, dessa forma surgem-se regiões de momento negativo nas vigas. A seção transversal nessas regiões se reduz às áreas do perfil de aço e da armadura longitudinal presente na largura efetiva da laje de concreto. O perfil de aço fica sujeito a algumas restrições, que são apresentadas nas Equações 25 e 26.

	$\frac{b_{fc}}{t_f} \leq 0,38 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$	(25)
	$\frac{2h_c - 2R}{t_w} \leq 3,76 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$	(26)

Onde:

$M_{Ga,Sd}$ é o momento fletor solicitante de cálculo devido as ações atuantes antes da resistência do concreto atingir $0,75f_{ck}$;

$M_{L,Sd}$ é o momento fletor solicitante de cálculo devido as ações atuantes após da resistência do concreto atingir $0,75f_{ck}$;

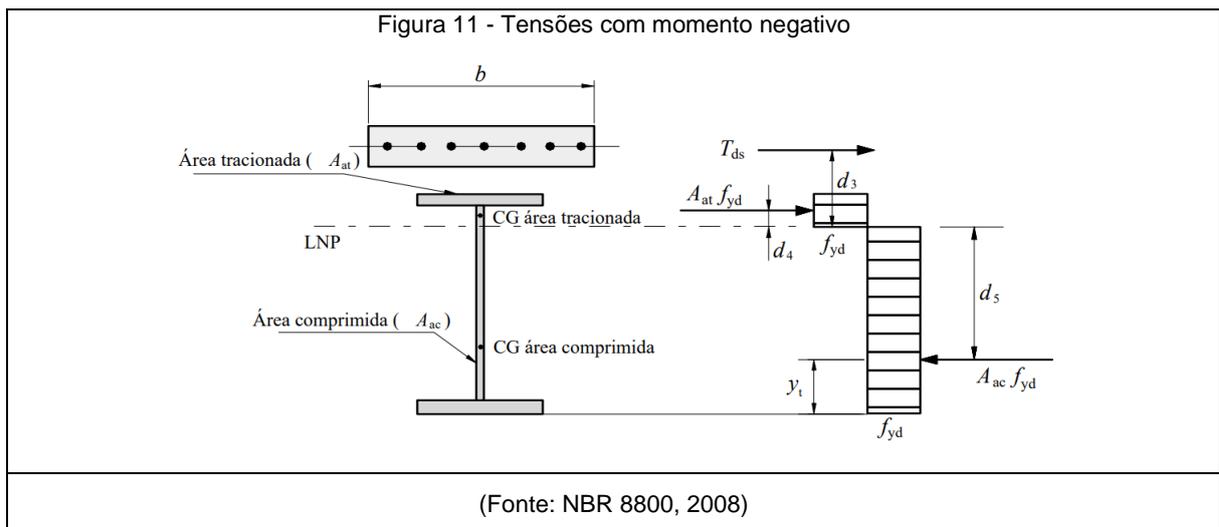
b_{fc} é a largura da mesa comprimida do perfil de aço;

t_f é a espessura da mesa;

h_c é a altura da parte comprimida da alma;

R é o raio de concordância entre mesa e alma;

A Figura 11 mostra as tensões atuantes numa viga mista com momento fletor solicitante negativo.



O momento fletor resistente de cálculo é obtido fazendo-se o somatório dos momentos provocados pelas tensões atuantes. Nessa situação o momento fletor resistente na região negativa é representado pela Equação 27.

	$M_{Rd}^- = T_{ds} d_3 + A_{at} f_{yd} d_4 + A_{ac} f_{yd} d_5$	(27)
--	---	------

Sendo:

A_{at} é a área tracionada da seção do perfil de aço;

A_{ac} é a área comprimida da seção do perfil de aço;

d_3 é a distância do centro geométrico da armadura longitudinal à Linha neutra plástica;

d_4 é a distância da força de tração, situada no centro geométrico da área tracionada da seção do perfil de aço à linha neutra plástica;

d_5 é a distância da força de compressão, situada no centro geométrico da área comprimida da seção do perfil de aço à linha neutra plástica;

T_{ds} é a força resistente de tração de cálculo nas barras da armadura longitudinal calculada como: $T_{ds} = A_{sl} f_{sd}$;

A_{sl} é a área da armadura longitudinal dentro da largura efetiva;

f_{sd} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço da armadura;

A quantidade de conectores de cisalhamento na região de momento negativo é determinada de tal forma que a Equação 28 seja verdadeira.

	$\sum Q_{Rd} \geq T_{ds}$	(28)
--	---------------------------	------

Em decorrência dos momentos negativos um estado limite último pode ocorrer com a flambagem lateral com distorção da seção transversal das vigas mistas Pilares de Aço

Os pilares, que são formados por perfis de aço, são submetidos a esforços de compressão pelas cargas atuantes na laje. Para resistir as solicitações normais, a Equação 29 deve ser satisfeita.

	$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$	(29)
--	--------------------------	------

Sendo:

$N_{c,Sd}$ e $N_{c,Rd}$ as forças axiais de compressão solicitante e resistente de cálculo, respectivamente;

A força axial de compressão resistente de cálculo é dada por:

	$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}}$	(30)
--	---	------

O fator de redução associado à resistência à compressão do aço é dado por:

Se $\lambda_0 \leq 1,5$:	$\chi = 0,658^{\lambda_0^2}$	(31)
Se $\lambda_0 > 1,5$:	$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$	(32)

Onde:

χ é o fator de redução associado à resistência à compressão;

Q é o fator de redução associado à flambagem local;

A_g é a área bruta da seção transversal do perfil;

λ_0 é o índice de esbeltez reduzido, dado pela Equação;

	$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}}$	(33)
--	---	------

Com:

	$N_e = \min \left\{ \begin{array}{l} N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(k_x L_x)^2} \\ N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(k_y L_y)^2} \\ N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(k_z L_z)^2} + GJ \right] \end{array} \right.$	(34)
--	---	------

O topo dos pilares pode estar formando uma ligação rígida com as vigas externas, com isso tem-se que os pilares estarão submetidos também a flexão composta nessa região. As Equações 35 e 36 mostram as expressões que limitam o ELU relacionado à combinação de esforços solicitantes.

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

	$\frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0$	(35)
--	---	------

Para $\frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} < 0,2$:

	$\frac{N_{c,Sd}}{2 N_{c,Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0$	(36)
--	---	------

Onde:

$M_{x,Sd}$ Momento fletor solicitante de cálculo na direção x;

$M_{x,Rd}$ Momento fletor resistente de cálculo na direção x;

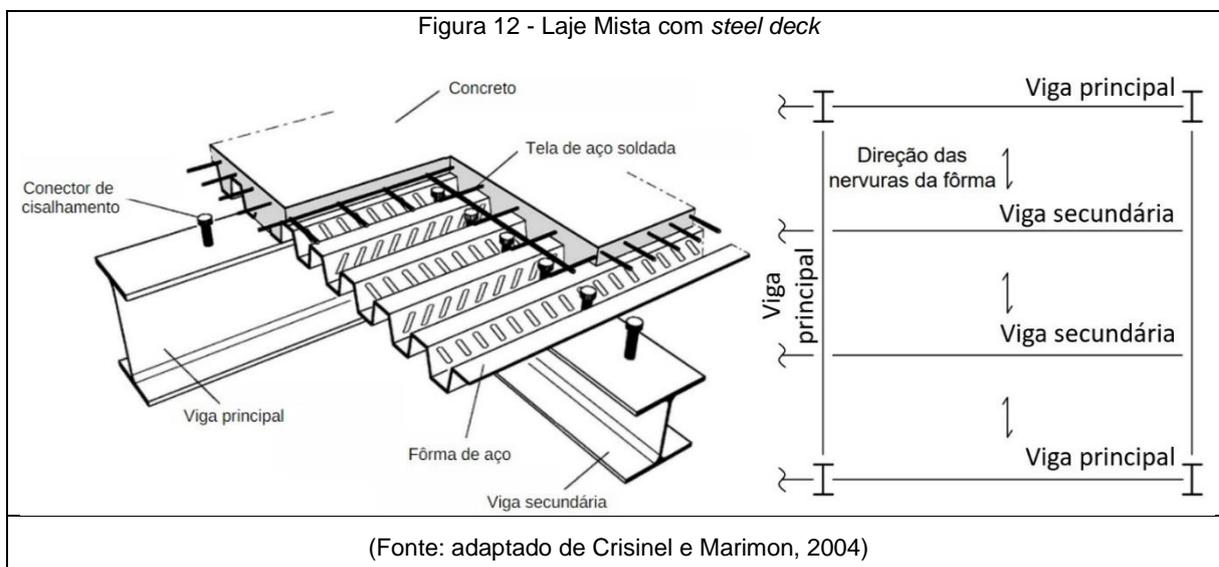
$M_{y,Sd}$ Momento fletor solicitante de cálculo na direção y;

$M_{y,Rd}$ Momento fletor resistente de cálculo na direção y;

4 ABORDAGEM METODOLÓGICA

4.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Para a implementação do problema de otimização, será desenvolvido um aplicativo denominado Pórtico Misto dentro da plataforma do Matlab. O programa será desenvolvido com as rotinas de dimensionamento e otimização para sistemas de pisos mistos de aço e concreto, com vigas mistas e fôrmas de aço, *steel deck*, incorporada a laje e para pilares de aço tomando como função objetivo a minimização das emissões de CO₂. As fôrmas de aço são definidas com base no catálogo da Metform[®] (2006), os perfis de aço para as vigas e pilares que podem ser laminados, do catálogo da empresa Gerdau[®] (2017) ou soldados. A Figura 12 apresenta o detalhe dos elementos estruturais, vigas e laje mista, assim como o *layout* do vigamento em planta proposto neste trabalho.



As cargas de projeto são calculadas de acordo com a NBR 6120 (2019). Os procedimentos da NBR 8800 (2008) servem de base para a concepção das funções de restrição, responsável pela validação da solução final obtida. A quantidade de CO₂ em kg por quilo de aço utilizado nos perfis, armaduras e conectores de cisalhamento emitidos na fabricação, será adotada com base no banco de dados de

avaliação do ciclo de vida (ACV) de produtos siderúrgicos da *Worldsteel Association* (2019) e o coeficiente de emissão do concreto, conforme a classe de resistência foram obtidos através da análise de linhas de tendência de consumo de traços de concreto definidos por Thomaz e Carneiro (2010).

4.2 FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo é a função a ser otimizada. Ela é composta pela soma das emissões de CO₂ de cada elemento da estrutura (vigas, pilares, forma *steel deck*, concreto, tela de aço, conectores, armadura de costura e solda dos perfis).

A função objetivo para a otimização do impacto ambiental, mensurado em kg de emissão de CO₂, é apresentada na Equação (37).

$Minimizar CO_2 = CO_{2(vigas)} + CO_{2(fôrma)} + CO_{2(concreto)} + CO_{2(tela)} + CO_{2(pilar)}$	(37)
--	------

onde CO₂(viga) corresponde ao valor da emissão de CO₂ do perfil de aço, da armadura de costura e dos conectores de cisalhamento das vigas mistas secundárias e principais dado pela soma das Equações (38) e (39).

$CO_{2(vigas)VS} = (2 + n_{vigas}) \cdot [(\rho_{aço} \cdot A_a \cdot L \cdot E_{aço}) + (n \cdot \rho_{aço} \cdot V_c \cdot E_{aço}) + (A_s \cdot l_b \cdot \rho_{aço} \cdot E_{aço})]$	(38)
--	------

sendo a primeira parcela da função a soma de vigas secundárias, representadas por n_{vigas} , e duas vigas externas paralelas, enquanto que $\rho_{aço}$ é a massa específica do aço do perfil da viga em kg/m³, A_a a área da seção transversal do perfil da viga (m²), L o comprimento (m) da viga, $E_{aço}$ a emissão de CO₂ do aço (kgCO₂/kg), n a quantidade de conector *stud bolt*, V_c o volume do conector *stud bolt* (m³), A_s a área de aço da armadura de costura (m²) e l_b o comprimento de ancoragem da armadura de costura em metros (m).

$CO_{2(vigas)VP} = (V_{aço} \cdot E_{aço} \cdot \rho_{aço}) + (n_p \cdot V_c \cdot \rho_{aço} \cdot E_{aço}) + (A_{sp} \cdot l_{bp} \cdot \rho_{aço} \cdot E_{aço})$	(39)
--	------

onde $V_{aço}$ está relacionado ao volume do perfil da viga principal perpendicular à viga secundária (m^3), n_p a quantidade de conector stud *bolt* da viga principal, A_{sp} a área de aço da armadura de costura da viga principal (m^2) e l_{bp} o comprimento de ancoragem da armadura de costura da viga principal (m).

$CO_{2(concreto)}$, é a emissão de CO_2 do concreto mostrado na Equação (40)

$CO_{2(concreto)} = E_{conc} \cdot A_{laje} \cdot v_{conc}$	(40)
---	------

onde E_{conc} , corresponde a emissão de CO_2 do concreto da laje ($kgCO_2/m^3$), A_{laje} a área retangular da laje a ser coberta com a fôrma incorporada (m^2) e v_{conc} o consumo do concreto (m^3/m^2).

$CO_{2(fôrma)}$ é a emissão da fôrma de *steel deck* apresentado na Equação (41).

$CO_{2(fôrma)} = A_{laje} \cdot p_{fôrma} \cdot E_{sd}$	(41)
---	------

onde $p_{fôrma}$ representa o peso da fôrma *steel deck* (kg/m^2) e E_{sd} a emissão de CO_2 da fôrma *steel deck* ($kgCO_2/kg$).

$CO_{2(tela)}$ representa a emissão da tela de fissuração do concreto mostrado na Equação (42).

$CO_{2(tela)} = A_{laje} \cdot p_{tela} \cdot E_{tela}$	(42)
---	------

onde p_{tela} o peso da armadura de fissuração da laje (kg/m^2) e E_{tela} a emissão de CO_2 da armadura de fissuração ($kgCO_2/kg$).

$CO_{2(pilar)}$ representa a emissão dos pilares de aço mostrado na Equação (43).

$CO_{2(pilar)} = 4 \cdot (\rho_{aço} \cdot A_{pilar} \cdot E_{aço})$	(43)
--	------

O traço do concreto foi calculado com base nos valores utilizados por Santoro e Kripka (2020). A emissão de CO₂ relativa à solda que é necessária para a formação dos perfis soldados foi baseada no estudo de Sproesser *et al.* (2014). Após a montagem das emissões dos traços chegou-se às Tabelas 2 e 3 nas quais é apresentado os valores da taxa de emissão de CO₂ dos materiais considerados na modelagem da função objetivo:

Tabela 2 - Emissão de CO₂ na produção do concreto

Material	Emissão de CO ₂ (kgCO ₂ /m ³)	Ref.
Concreto 20 MPa	129,85	Santoro e Kripka (2020)
Concreto 25 MPa	142,71	
Concreto 30 MPa	153,68	
Concreto 35 MPa	163,25	
Concreto 40 MPa	171,73	
Concreto 45 MPa	189,60	
Concreto 50 MPa	199,72	

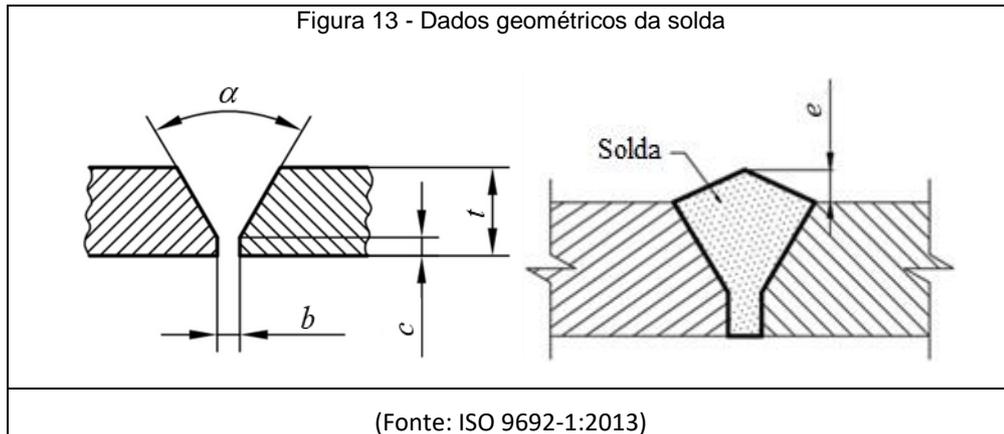
Tabela 3 - Emissão de CO₂ na produção do aço

Material	Unidade	Emissão de CO ₂ (kgCO ₂)	Ref.
Fôrma de aço <i>steel deck</i>	kg	2,6380	<i>Worldsteel Association</i> (2019)
Perfil de aço	kg	1,1160	
Conector de cisalhamento tipo <i>stud bolt</i>			
Tela de aço soldada	kg	1,9240	
Aço CA-50, ø 8 mm, vergalhão			
Solda	kg/m	$0,02 \cdot A_{wl}$	Sproesser <i>et al.</i> (2015)

Onde:

$A_{wl} = b t_w + (t_w - c)^2 \tan(\alpha/2) + [2(t_w - c) \tan(\alpha/2) + b](e/2)$	(44)
--	------

Os coeficientes utilizados na Equação 44 são obtidos diretamente da geometria da solda, apresentados na Figura 13.



Os valores utilizados para a otimização foram:

$$\alpha = 60^\circ$$

$$t = t_w$$

$$c = 2 \text{ mm}$$

$$b = 1 \text{ mm}$$

$$e = 1 \text{ mm}$$

É importante salientar que a otimização da estrutura é realizada levando-se em conta apenas a emissão de CO₂, entretanto, será avaliado o custo que a estrutura otimizada terá. Para isso, foram usados coeficientes retirados da tabela do Sinapi (2022), com exceção do custo das fôrmas de aço *steel deck* foi obtido da empresa MS-Estruturas Metálicas (2020). A Tabela 4 mostra os custos utilizados no estudo.

Tabela 4 - Custo dos materiais

Material	Unidade	Custo (R\$)	Ref.
Concreto 20 MPa	m ³	295,00	
Concreto 25 MPa	m ³	307,42	

Concreto 30 MPa	m ³	317,11	SINAPI (2022)
Concreto 35 MPa	m ³	329,15	
Concreto 40 MPa	m ³	341,57	
Concreto 45 MPa	m ³	384,01	
Concreto 50 MPa	m ³	455,43	
Perfil de aço	kg	9,47	
Tela de aço soldada	kg	7,96	
Aço CA-50, ø 8 mm, vergalhão	kg	5,34	
Conector de cisalhamento tipo <i>stud bolt</i>	un	11,40	
Fôrma de aço <i>steel deck</i> MF-50, espessura 0,80 mm	m ²	72,36	MS- Estruturas Metálicas (2020)
Fôrma de aço <i>steel deck</i> MF-50, espessura 0,95 mm	m ²	80,96	
Fôrma de aço <i>steel deck</i> MF-50, espessura 1,25 mm	m ²	104,54	
Fôrma de aço <i>steel deck</i> MF-75, espessura 0,80 mm	m ²	83,29	
Fôrma de aço <i>steel deck</i> MF-75, espessura 0,95 mm	m ²	93,18	
Fôrma de aço <i>steel deck</i> MF-75, espessura 1,25 mm	m ²	120,31	

4.3 VARIÁVEIS DE PROJETO

Ao todo serão consideradas preliminarmente 8 variáveis de cálculo: 2 para as vigas principais, 2 para as vigas secundárias, 3 para a escolha das características do *steel deck* e uma para a escolha dos pilares.

$x(1)$ = Perfil das vigas secundárias

$x(2)$ = Grau de interação das vigas secundárias

$x(3)$ = Altura da laje e espessura da fôrma de acordo com Metform[®] (2006)

$x(4)$ = Vão máximo da laje de acordo com Metform[®] (2006)

$x(5)$ = O tipo de fôrma de acordo com Metform[®] (2006)

$x(6)$ = Perfil das vigas principais

$x(7)$ = Grau de interação das vigas principais

$x(8)$ = Perfil dos pilares

4.3.1 Limite das Variáveis

Um parâmetro essencial ao funcionamento do AG são os limites superior e inferior que as variáveis podem assumir. O vetor \mathbf{l}_b (*lower bonds*) representa os valores mínimos e \mathbf{u}_b (*upper bonds*) os valores máximos:

$\mathbf{l}_b = [1, 40, 1, 1, 1, 1, 40, 1]$	(45)
$\mathbf{u}_b = [541, 100, 24, 16, 4, 541, 100, 541]$	(46)

As equações 45 e 46 mostram dentre outros os limites correspondentes a $x(1)$, $x(6)$ e $x(8)$ que são iguais, isso ocorre porque essas variáveis são obtidas através da mesma tabela. Os perfis utilizados na otimização são do tipo laminados e soldado e assim totalizam 541 perfis de características diferentes. As variáveis $x(2)$ e $x(7)$ representam os graus de interação das vigas secundárias e principais, respectivamente. Como já citado, as variáveis precisam ser discretas, assim, $x(2)$ e $x(7)$ são definidas de acordo com um vetor de 60 posições cada célula representa um grau de interação, discretizando assim a escolha dessas variáveis. É importante frisar que, o grau de interação mínimo é de 40%, essa é a explicação de \mathbf{l}_b ser 40 nessas posições. As variáveis $x(3)$ e $x(4)$ são valores obtidos diretamente da tabela da empresa Metform[®] (2006) de *steel deck*. A variável $x(3)$ representa as linhas das tabelas da Metform[®] e define as espessuras da laje de concreto e da fôrma de *steel*

deck. Como há 3 espessuras disponíveis ao *steel deck* (0,8, 0,95 e 1,25 mm) e mais 8 espessuras que a laje de concreto pode assumir, para cada tipo de fôrma (MF-50: 10 a 17 cm e MF-75: 13 a 20 cm), chega-se em 24 combinações diferentes possíveis nessa variável e por isso esse é número de correspondente ao vetor de valores máximos. A variável $x(4)$ por outro lado representa as colunas da tabela da Metform® e indica os vãos máximos que poderão ser adotados na otimização, por isso essa variável tem um importante papel na definição da quantidade de vigas que a solução irá adotar. Como são adotados 16 valores diferentes para os vãos máximos para cada tipo de fôrma (MF-50: 1,8 a 3,2 m e MF-75: 2 a 4 m) esse é o número máximo que essa variável assume. A variável $x(5)$ determina se a fôrma a ser usada será a MF-50 ou MF-75 e qual a direção do pilar de aço será adotada, dessa forma apresenta quatro elementos no seu domínio.

4.4 RESTRIÇÕES DO PROBLEMA

As funções restrições são equações e inequações que direcionam e limitam o resultado final da otimização. No problema, são consideradas 16 inequações como restrições dos cálculos. As limitações técnicas impostas no dimensionamento estrutural são dadas pela NBR 8800 (2008) que é a responsável por regulamentar o dimensionamento de estruturas de aço e mistas de aço e concreto. As equações (47) a 67 representam as restrições dos problemas.

$C(1) : \frac{\frac{h_{w,s}}{t_{w,s}}}{5,7 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}} - 1 \leq 0$	(47)
$C(2) : \frac{\alpha_{min,s}}{\alpha_{int,s}} - 1 \leq 0$	(48)
$C(3) : \frac{M_{Sd,s}}{M_{Rd,s}} - 1 \leq 0$	(49)

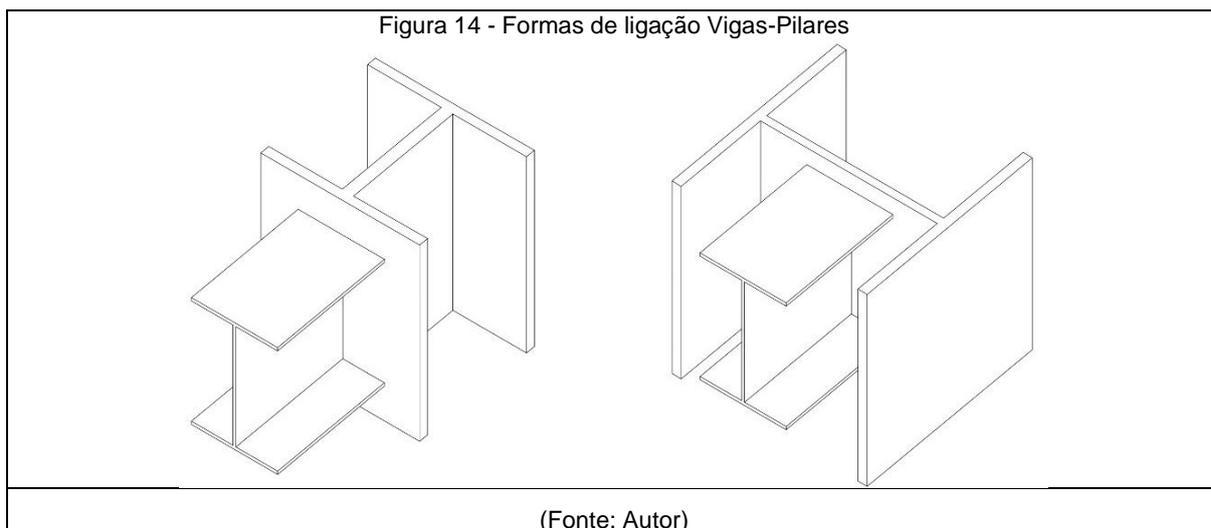
$C(4) : \frac{V_{Sd,s}}{V_{Rd,s}} - 1 \leq 0$	(50)
$C(5) : \frac{\delta_{t,s}}{\delta_{adm,s}} - 1 \leq 0$	(51)
$C(6) : \frac{\frac{h_{w,p}}{t_{w,p}}}{5,7 \sqrt{\frac{E_a}{f_{yk}}}} - 1 \leq 0$	(52)
$C(7) : \frac{\alpha_{min,p}}{\alpha_{int,p}} - 1 \leq 0$	(53)
$C(8) : \frac{M_{Sd,p}}{M_{Rd,p}} - 1 \leq 0$	(54)
$C(9) : \frac{V_{Sd,p}}{V_{Rd,p}} - 1 \leq 0$	(55)
$C(10) : \frac{\delta_{t,p}}{\delta_{adm,p}} - 1 \leq 0$	(56)
$C(11) : \frac{Q_{Rd}}{Q_{Sd}} - 1 \leq 0$	(57)
$C(12) : \frac{M_{Sd,0,s}}{M_{Rd,0,s}} - 1 \leq 0$	(58)
$C(13) : \frac{M_{Sd,0,p}}{M_{Rd,0,p}} - 1 \leq 0$	(59)
$C(14) : \frac{H_{v,Sd,s}}{H_{v,Rd,s}} - 1 \leq 0$	(60)
$C(15) : \frac{H_{v,Sd,p}}{H_{v,Rd,p}} - 1 \leq 0$	(61)
$C(16) : \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} - 1 \leq 0$	(62)

$C(17): \begin{cases} \frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \frac{8 M_{Sd, Pi}}{9 M_{Rd, Pi}} \\ ou \\ \frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \frac{8 M_{Sd, Pi}}{9 M_{Rd, Pi}} \end{cases}$	(63)
$C(18) \frac{\frac{b_{f,p}}{t_{f,p}}}{0,38 \sqrt{\frac{E_a}{f_{yk}}}} - 1 \leq 0$	(64)
$C(19) : \frac{\frac{2t_{w,p} - 2R}{t_{w,p}}}{3,76 \sqrt{\frac{E_a}{f_{yk}}}} - 1 \leq 0$	(65)
$C(20): \begin{cases} \frac{1,05 \cdot b_{f,p}}{b_{f, Pi}} \\ ou \\ \frac{1,05 \cdot b_{f,p}}{h_{w, Pi}} \end{cases}$	(66)
$C(21): \begin{cases} \frac{1,05 \cdot b_{f,s}}{h_{w, Pi}} \\ ou \\ \frac{1,05 \cdot b_{f,s}}{b_{f, Pi}} \end{cases}$	(67)

O grupo de restrições $G_1 = \{C(1), C(2), C(3), C(4), C(5)\}$, formado pelas equações de 47 a 51 tem a forma muito semelhante ao grupo $G_2 = \{C(6), C(7), C(8), C(9), C(10)\}$, formado pelas equações de 52 a 56. As restrições desses grupos representam respectivamente: a limitação de esbeltez da alma, o grau de interação, ELU para flexão, ELU para cortante, ELS de flecha admissível. G_1 representa as variáveis das vigas secundárias e G_2 as características das vigas principais. $C(11)$ é a carga máxima (kN/m^2) que o *steel deck* suporta, $C(12)$ e $C(13)$ são os ELU relacionados

ao momento fletor antes da cura do concreto, ou seja, numa construção não escorada.

As restrições $C(14)$ e $C(15)$ representam as restrições referente a armadura de costura, $C(16)$ e $C(17)$ representam o ELU relacionado à compressão dos pilares e a verificação do esforço combinado de compressão e flexão no topo do pilar, respectivamente. As últimas quatro restrições são relacionadas às restrições geométricas do problema. $C(18)$ e $C(19)$ são exigências normativas relacionadas à viga principal e ao momento negativo que ela poderá estar submetida caso haja uma ligação rígida entre viga e pilar. $C(20)$ e $C(21)$ são definidas de acordo com a variável $x(5)$, que define além da fôrma de *steel deck* a maneira que acontecerá a ligação das vigas de borda com os pilares. A Figura 14 mostra as duas configurações que poderão acontecer nas ligações das vigas de borda com os pilares.



4.5 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Simplificadamente, as propriedades dos materiais empregados e os fatores de ponderação comuns aos exemplos analisados são:

Módulo de elasticidade do aço $E_a = 200 \text{ GPa}$;

Peso específico do aço: $78,50 \text{ kN/m}^3$;

Resistência à tração do aço do conector de cisalhamento $f_{ucs} = 415 \text{ MPa}$;

Coeficiente do efeito de atuação de grupos de conectores: $R_g = 1$;

Coeficiente para consideração da posição do conector $R_p = 0,6$;

Fator de ponderação da resistência do conector de cisalhamento $\gamma_{cs} = 1,25$;

Fator de ponderação da resistência do concreto $\gamma_c = 1,4$;

Fator de ponderação da resistência do perfil de aço $\gamma_a = 1,1$;

Para determinar as soluções ótimas e proceder a uma comparação entre elas, serão utilizados o algoritmo genético e a otimização por enxame de partículas (*PSO*). O algoritmo genético utilizado foi o nativo do toolbox do software MATrix LABoratory - MATLAB® (2016). O *PSO* também foi implementado na mesma plataforma (MATLAB) de forma que os resultados da otimização pudessem ser comparados e analisados em termos de eficiência da solução.

Para o funcionamento dos algoritmos é necessário a definição de alguns parâmetros utilizados pelos algoritmos. No algoritmo genético o número máximo de gerações foi adotado como 50, o fator de *crossover* que é fração da população atual que estará presente na próxima geração foi igual a 0,8 e tamanho da população igual a 200 indivíduos.

Na otimização por enxame de partículas, o número máximo de iterações foi definido como 50 e o tamanho da população igual a 70 indivíduos.

4.6 SOFTWARE PÓRTICO MISTO

Com os algoritmos e o auxílio do *appdesigner*, que é um aplicativo nativo do próprio MATLAB para a criação de interfaces gráficas, foram desenvolvidas algumas telas para a apresentação dos principais resultados e características dos exemplos implementados. As Figuras 15, 16, 17 e 18 apresentam as telas iterativas do aplicativo Pórtico Misto.

Figura 15 – Telas Entrada de Dados do software Pórtico Misto

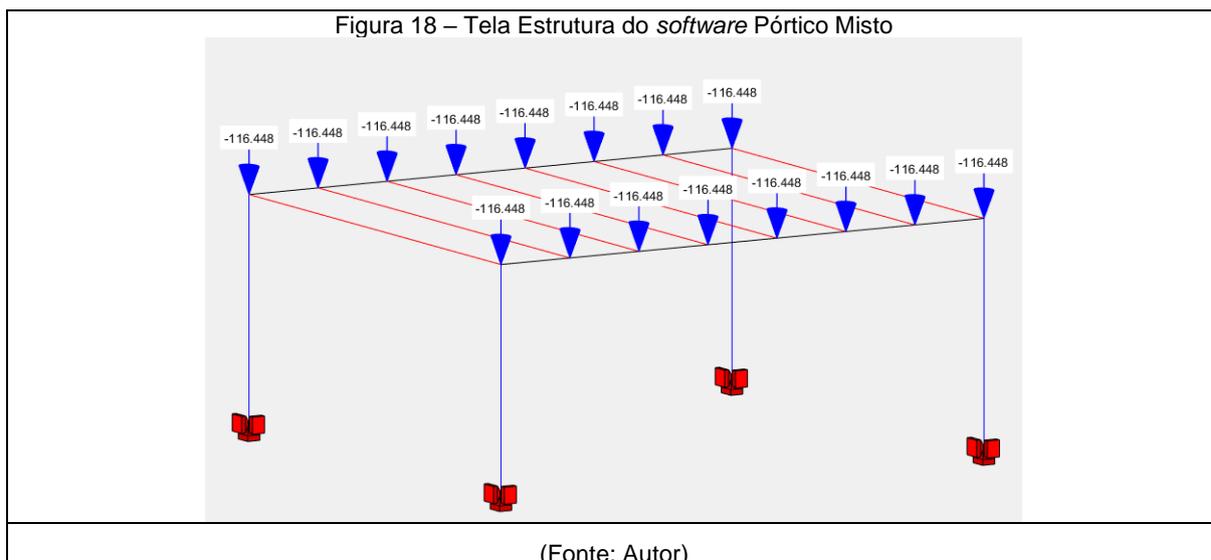
(Fonte: Autor)

Figura 16 – Tela Emissão/Custo do software Pórtico Misto

(Fonte: Autor)

Figura 17 – Tela Resultados do software Pórtico Misto

(Fonte: Autor)



A Figura 15 apresenta a tela inicial do software, na qual podemos definir quais as cargas de cálculo que serão aplicadas à estrutura mista, as dimensões do pórtico, o f_{ck} e qual o algoritmo será utilizado na otimização. A Figura 16 é uma das telas do *software* que apresentam os resultados encontrados pela otimização. Nesta tela são mostrados os valores das emissões de cada um dos componentes estruturais do pórtico misto além do custo associado a cada um desses elementos. A Figura 17 mostra a tela Resultados, na qual apresenta o tipo de bitola para cada um dos perfis de aço utilizados na solução ótima, a tela de fissuração a ser colocada dentro da laje de concreto e o tipo de fôrma a ser utilizado. Além disso, também há o botão com o relatório completo dos quantitativos, em que é apresentado a quantidade de conectores de cisalhamento, número de vigas secundárias, graus de interação *etc.* Por fim, após a otimização pode-se clicar no botão Mostrar Vigas (Figura 15) após isso a Figura 18 mostra o que aparece na tela intitulada Estrutura que é um esboço esquemático da estrutura onde aparece a quantidade de vigas secundárias e as forças que estas aplicam nas vigas principais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

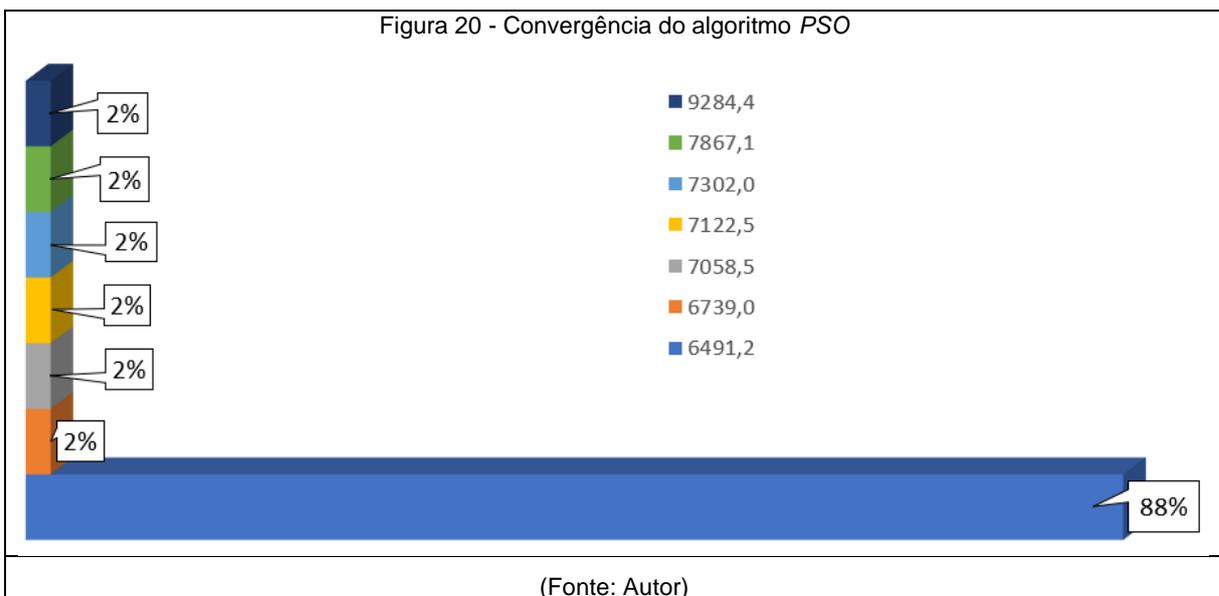
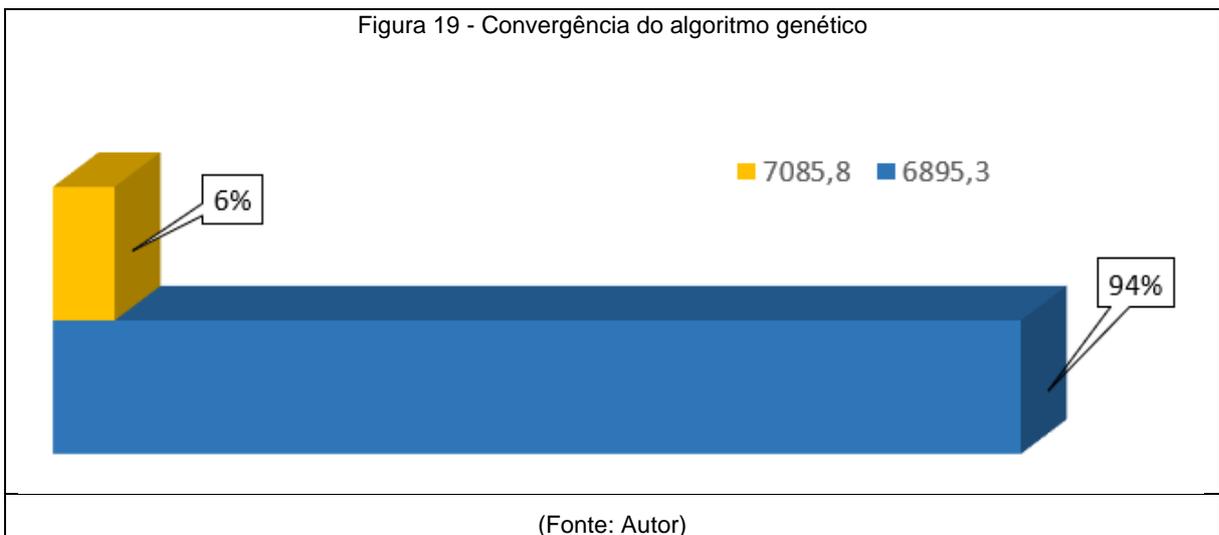
A rotina de dimensionamento e otimização do sistema proposto foi desenvolvida em partes: primeiramente foi feita a otimização de sistemas de piso misto de aço e concreto calculando-se as vigas secundárias (internas) por Breda, Pietralonga e Alves (2020); subseqüentemente foi implementado o cálculo das vigas principais paralelas e perpendiculares às vigas secundárias, além do dimensionamento das armaduras de costura e de fissuração da laje de concreto Arpini *et al.* (2022); posteriormente foi implementado a rotina para análise estrutural do sistema de piso, bem como para o dimensionamento ótimo dos pilares Arpini e Alves (2021). Por fim e no presente trabalho, foi introduzida a otimização por enxame de partículas como uma outra forma de buscar os mínimos globais além da inserção de algumas restrições extras para tornar a estrutura mais próxima da realidade.

Para mostrar a aplicabilidade da formulação proposta, foram propostos quatro exemplos para a otimização dos sistemas de piso e pilares no algoritmo genéticos e com a otimização por enxame de partículas (PSO). Além dos exemplos foi realizado também um teste para medir a convergência dos algoritmos. O teste de convergência e os resultados desses exemplos são apresentados a seguir.

5.1 TESTE DE CONVERGÊNCIA

O teste de convergência foi realizado no exemplo proposto pelo trabalho de Poitras, Cormier e Nabolle (2018) e será detalhado no item 5.2, no qual foram analisadas lajes mistas do tipo *steel deck* com as dimensões de 8 m e 6 m. Para a otimização original foi proposto um novo algoritmo metaheurístico intitulado *Peloton Dynamics Optimization* (PDO) que tem como base o comportamento de pelotões de ciclistas durante as corridas. As cargas utilizadas neste trabalho seguiram as mesmas intensidades que as propostas pelo artigo original de 2018. As cargas permanentes foram de 4,8 kN/m² e 2,4 kN/m² foram as cargas acidentais. Além disso as vigas de borda também foram solicitadas, as vigas secundárias por 16 kN/m e as principais por 25,6 kN/m.

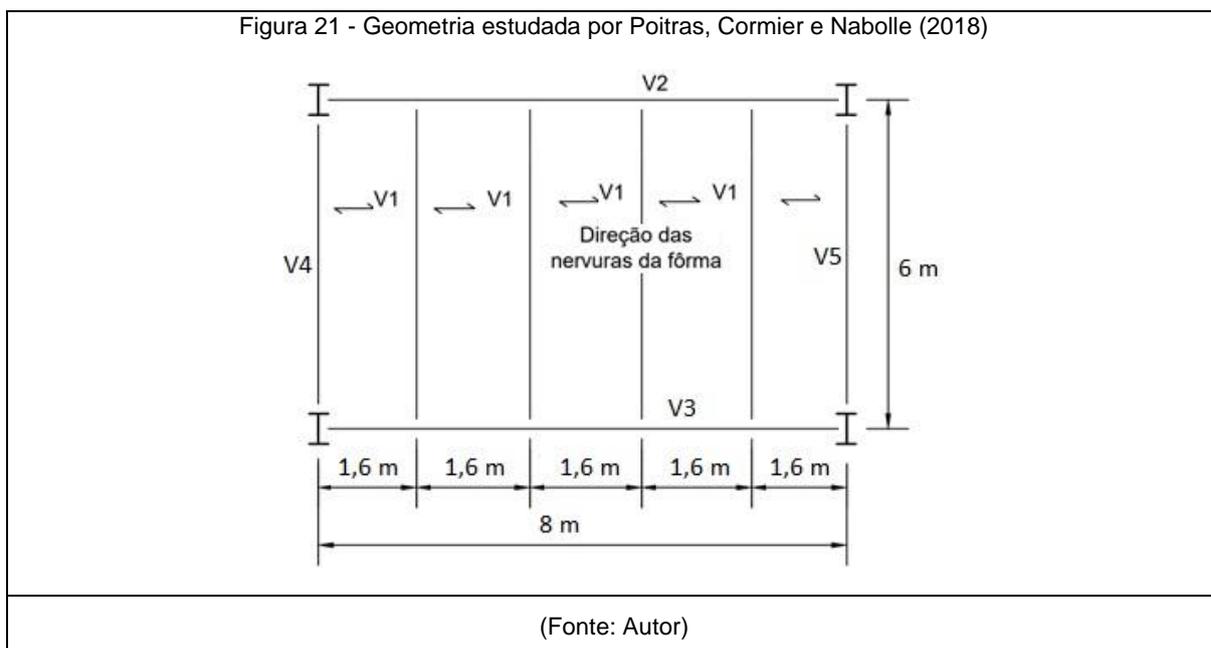
Para realização do teste de convergência foi verificada se as soluções do exemplo convergiam para o mesmo mínimo global partindo de locais randômicos dentro do espaço amostral das variáveis. A resistência do concreto utilizada foi a de 30 MPa e foi executado o sistema de piso misto e os pilares com um pé direito de 3m. Os algoritmos foram rodados por 50 vezes e foi analisado quais os resultados obtidos. As Figuras 19 e 20 representam a convergência das soluções ótimas do algoritmo genético e da otimização por enxame de partículas, respectivamente.



No algoritmo genético houve uma convergência para a solução otimizada em 94% dos resultados, na otimização por enxame de partículas houve a convergência para o resultado ótimo em 88% dos resultados. O algoritmo *PSO* mostrou uma variedade nas soluções propostas, encontrando um total de 6 além da solução ótima o algoritmo genético por outro lado encontrou apenas uma solução além da ótima. Embora o *PSO* tenha encontrado uma variedade maior de soluções, o resultado da melhor solução otimizada do *PSO* foi 6% menor que a solução encontrada pelo *AG*.

5.2 EXEMPLO 01 – POITRAS, CORMIER E NABOLLE (2018)

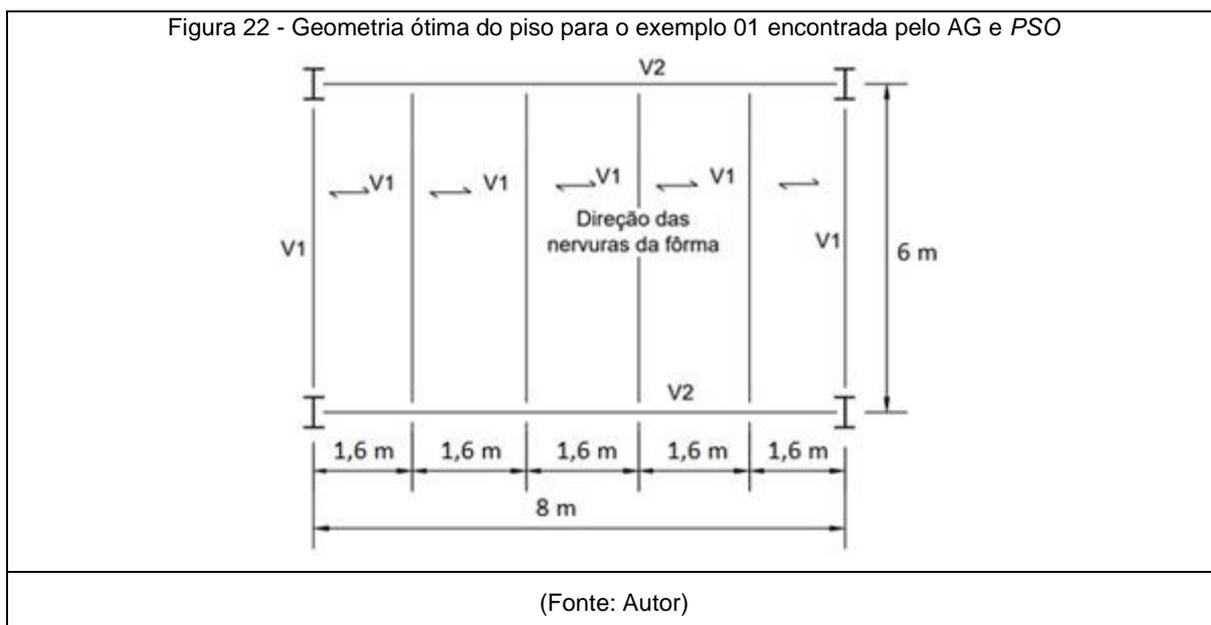
O primeiro exemplo é o mesmo exemplo utilizado no teste de convergência, proposto originalmente por Poitras, Cormier e Nabolle (2018). A Figura 21 apresenta a disposição construtiva para o pórtico proposta pelos autores.



O espaço amostral das lajes de *steel deck* é formado por duas espessuras diferentes (0,76 e 0,91 mm). O resultado do exemplo para as dimensões de um piso de 6m de comprimento por 8m de largura apresentaram 4 vigas interiores V1 com perfil W 310 x 24, viga principal V2 e V3 com W 530 x 74 e W 460 x 52 respectivamente e vigas de bordas V4 e V5 paralelas às V1 com perfis W 310 x 24 e

W 310 x 21. De acordo com catálogo da empresa Canam® (2006) o concreto precisa ter um f_{ck} de pelo menos 20 MPa para as características do *steel deck*, logo esse foi o valor considerado inicialmente na otimização.

Após a inserção das características da laje nas rotinas de otimização, a configuração das soluções ótimas obtidas pelos algoritmos (Genético e *PSO*) foi com a mesma quantidade de vigas interiores. Esta configuração é representada na Figura 22. É importante salientar que no trabalho apresentado pelos pesquisadores, diferentemente deste, os conectores de cisalhamento e as armaduras de costura não foram dimensionados, por isso esses elementos não entrarão na primeira comparação entre a emissão de CO₂, entretanto a armadura de fissuração pode ser obtida através do catálogo de *steel deck* fornecido pela empresa Canam® (2006) e por isso também terá sua emissão comparada.



A Tabela 5 mostra os perfis selecionados para as vigas principais e secundárias pelo algoritmo genético e pela otimização por enxame de partículas para o f_{ck} de 20 MPa.

Tabela 5 - Perfis selecionados pelos algoritmos

	Algoritmo Genético	Enxame de Partículas

Vigas Secundárias (V1)	W 410 x 38,8	W 360 x 39.0
Vigas Principais (V2)	W 200 x 22,5	W 250 x 22.3

A Tabela 6 mostra a comparação entre as características construtivas da solução otimizada encontrada pelos algoritmos genético e otimização por enxame de partículas utilizados neste trabalho e da encontrada por Poitras, Cormier e Nabolle (2018).

Tabela 6 - Características construtivas do exemplo 01 com f_{ck} de 20 MPa

Informações	Un.	Poitras, Cormier e Nabolle (2018)	Algoritmo Genético Autor (2022)	Enxame de Partículas Autor (2022)
Nº de vigas secundárias	un	6	5	5
Tipo de fôrma	--	PC-3615	MF-75	MF-75
Espessura da fôrma	mm	0,76	0,8	0,80
Vão máximo da laje	m	1,69	210	220
Altura total da laje	cm	9,00	16,00	16
Espessura da capa de concreto	cm	5,20	12,00	11
Tela de fissuração	--	Q-75 (ø3,8-150x150)	Q-113 (ø3,8-100x100)	Q-113 (ø3,8 x ø3,8 - 100x100)
Perfil das vigas secundárias	--	5 de W 310 x 24 1 de W 310 x 21	W 410 x 38,8	W 360 x 39.0
Interação vigas secundárias	--	---	0,95	0,95
Conectores vigas secundárias	un	---	264	264
Perfil das vigas	--	W 530 x 74 e	W 250 x 22,5	W 250 x 22.3

principais		W 460 x 52		
Interação vigas principais	un	---	0,67	0,62
Conectores vigas principais	--	---	44	40

Com os resultados apresentados na Tabela 6, foram calculadas as emissões de CO₂ das estruturas propostas e esses valores foram comparados. A Tabela 7 mostra essa comparação da emissão em kg de CO₂ (kgCO₂) das soluções.

Tabela 7 - Emissão de CO₂ do exemplo 01 para f_{ck} de 20 MPa e Algoritmo Genético e PSO

Elementos	Postras, Cormier e Nabolle (2018)	Algoritmo Genético Autor (2022)	Enxame de Partículas Autor (2022)
Vigas Secundárias	1044,14	2076,38	1940,03
Vigas Principais	1824,93	562,59	560,98
Fôrma <i>steel deck</i>	1776,30	1770,62	1770,63
Concreto da laje	1064,54	1102,38	1102,38
Tela de fissuração	111,75	277,05	277,06
TOTAL	5821,66	5789,04	5651,07

Como pode ser observado, as soluções otimizadas chegaram a soluções ótimas com uma maior espessura da capa de concreto, mas selecionando a menor fôrma de *steel deck* (MF-50), o motivo dessa escolha pode ser notado na redução da quantidade de vigas secundárias e os perfis referentes às vigas principais e secundárias se comparado ao problema proposto. Ambos os algoritmos apresentaram soluções melhores do que a proposta pelo *PDO*, o algoritmo genético apresentou uma pequena melhoria da ordem de 1%, enquanto o *PSO* conseguiu melhorar o resultado das emissões em pouco mais de 3%.

Conforme pode ser observado na Tabela 7, os elementos que tiveram um pior desempenho em relação ao problema proposto no exemplo 01 foram a quantidade

de vigas secundárias e a espessura da capa de concreto. Um provável motivo do aumento da espessura do concreto e da emissão das vigas secundárias é a reduzida resistência à compressão do concreto adotado (20 MPa) que representa o menor dos valores utilizados neste estudo. Para verificar essa justificativa, a laje mista foi modelada com o f_{ck} variando de 20 até 50 MPa com o passo de 5 MPa, de forma a verificar se haverá uma melhoria nos resultados da otimização. Para essa verificação o dimensionamento ótimo dos pilares foi realizado considerando um pé direito de 3m para a análise completa do pórtico. A Tabela 8 mostra as informações construtivas para cada resistência de concreto do exemplo proposto para o algoritmo genético e a Tabela 9 apresenta as informações para o PSO.

Tabela 8 - Considerações construtivas do exemplo 01 para diferentes f_{ck} do concreto e Algoritmo Genético

Informações	Un.	20 MPa	25 MPa	30 MPa	35 MPa	40 MPa	45 MPa	50 MPa
Nº de vigas Secundárias	un	5	6	6	6	6	6	6
<i>Steel Deck</i>	--	MF-75	MF-75	MF-50	MF-50	MF-50	MF-50	MF-50
Espessura da fôrma	mm	0,8	0,8	0,8	0,8	0,95	0,8	0,8
Vão máximo da laje	m	210	250	210	200	200	200	200
Altura total da laje	cm	16	15	15	13	11	13	14
Capa de concreto	cm	12	9,5	10	8	6	8	9
Tela de fissuração	--	Q-113 (ϕ 3,8 x ϕ 3,8 - 100x100)	Q-92 (ϕ 4,2 x ϕ 4,2 - 150x150)	Q-113 (ϕ 3,8 x ϕ 3,8 - 100x100)	Q-92 (ϕ 4,2 x ϕ 4,2 - 150x150)	Q-75 (ϕ 3,8 x ϕ 3,8 - 150x150)	Q-92 (ϕ 4,2 x ϕ 4,2 - 150x150)	Q-92 (ϕ 4,2 x ϕ 4,2 - 150x150)
Perfil Vigas Secundárias	--	W 410 x 38.8	W 410 x 46.1	W 250 x 38.5	W 360 x 39.0	W 250 x 38.5	W 360 x 39.0	W 360 x 39.0
Grau de interação Vigas Secundárias	--	0,95	0,88	0,96	0,94	0,94	0,95	0,95
Total de conectores Vigas Secundárias	un	264	220	264	264	264	264	264
Perfil Vigas Principais	--	W 200 x 22.5	W 310 x 28.3	W 250 x 22.3	W 250 x 25.3	W 310 x 21.0	W 250 x 22.3	W 200 x 22.5
Grau de interação Vigas Principais	--	0,67	0,63	0,61	0,84	0,92	0,78	0,81
Total de conectores Vigas Principais	un	44	52	40	60	56	52	52
Perfil dos Pilares	un	W 360 x 44.6	W 360 x 44.6	W 460 x 52.0	W 310 x 38.7	W 460 x 52.0	W 360 x 44.6	W 360 x 44.6

Custo Total	R\$	40758,77	42115,51	41333,04	40014,05	40685,94	40543,97	41521,98
Emissão de CO ₂ total	kg	6382,50	7053,86	6895,26	6583,21	6742,03	6817,53	7063,94

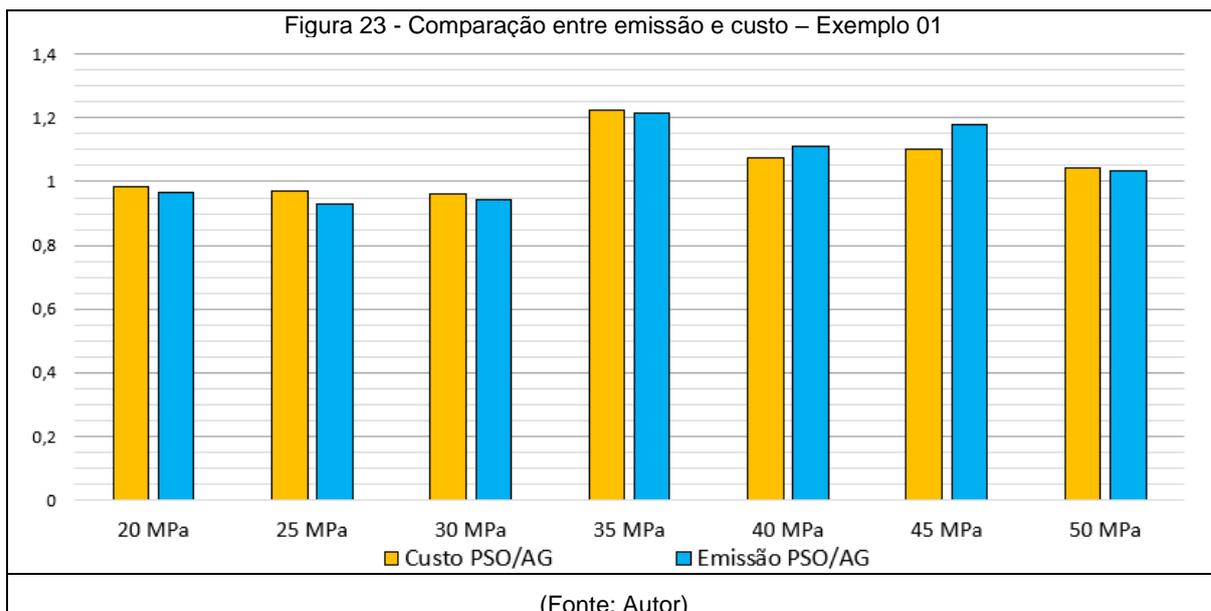
Tabela 9 - Considerações construtivas do exemplo 01 para diferentes f_{ck} do concreto e PSO

Informações	Un.	20 MPa	25 MPa	30 MPa	35 MPa	40 MPa	45 MPa	50 MPa
Nº de vigas Secundárias	un	5	6	6	6	5	5	6
<i>Steel Deck</i>	--	MF-75	MF-50	MF-50	MF-50	MF-75	MF-75	MF-50
Espessura da fôrma	mm	0,8	0,8	0,8	0,95	0,8	0,8	0,8
Vão máximo da laje	m	220	200	200	220	250	260	200
Altura total da laje	cm	16	13	13	14	17	19	14
Capa de concreto	cm	11	8	8	9	9,5	11,5	9
Tela de fissuração	--	Q-113 (ø3,8 x ø3,8 - 100x100)	Q-92 (ø4,2 x ø4,2 - 150x150)	Q-92 (ø4,2 x ø4,2 - 150x150)	Q-92 (ø4,2 x ø4,2 - 150x150)	Q-92 (ø4,2 x ø4,2 - 150x150)	Q-113 (ø3,8 x ø3,8 - 100x100)	Q-92 (ø4,2 x ø4,2 - 150x150)
Perfil Vigas Secundárias	--	W 360 x 39.0	W 410 x 38.8	W 410 x 38.8	W 360 x 39.0	W 310 x 44.5	W 460 x 52.0	W 200 x 41.7 (H)
Grau de interação Vigas Secundárias	--	0,95	0,93	0,95	0,71	0,91	0,79	0,89
Total de conectores Vigas Secundárias	un	264	264	264	264	220	220	264
Perfil Vigas Principais	--	W 250 x 22.3	W 310 x 23.8	W 310 x 21.0	W 360 x 32.9	W 360 x 32.9	W 250 x 22.3	W 250 x 22.3
Grau de interação Vigas Principais	--	0,62	0,65	0,77	0,57	0,71	0,63	0,63
Total de conectores Vigas Principais	un	40	44	48	52	68	40	40
Perfil dos Pilares	un	W 310 x 38.7	W 460 x 52.0	W 360 x 44.6	W 310 x 52.0	W 460 x 52.0	W 360 x 44.6	W 460 x 52.0
Custo Total	R\$	40031,27	40965,34	39737,77	49025,82	43654,72	44718,36	43388,71
Emissão de CO ₂ total	kg	6164,77	6553,97	6491,21	8001,98	7490,51	8027,83	7293,61

Através da análise da Tabela 8 é possível ver a redução da emissão de CO₂ mesmo com o aumento da resistência do concreto. Esse comportamento mostra que o algoritmo genético lança mão de certos parâmetros que são mais importantes (emitem mais CO₂) reduzindo-os e aumenta fatores que não são tão significativos na emissão. As vigas secundárias não mostram uma diferença de quantidade significativa, com 6 vigas em todos os exemplos com exceção da solução com 20 MPa. Essa mesma solução apresentou a maior espessura da laje de concreto e maior fôrma de *steel deck*. A solução ótima se mostrou no f_{ck} de 20 MPa, na mesma solução também foi encontrado o menor custo financeiro.

A Tabela 9 apresenta uma variedade maior de soluções com 5 vigas secundárias. As soluções com 6 vigas apresentaram a menor fôrma de *steel deck* e também as menores alturas da laje de concreto. A redução das vigas secundárias de 6 para 5 exige um aumento da massa linear dos perfis para suportar a carga imposta. A solução ótima do algoritmo *PSO* foi mostrada no f_{ck} de 30 MPa. O menor custo financeiro foi apresentado na solução de 20 MPa. É possível notar que os resultados das soluções de 20 MPa, em ambos os algoritmos, apresentaram valores maiores em relação aos apresentados nas Tabelas 7 e 9, isso ocorre porque no estudo realizado por Poitras, Cormier e Nabolle (2018) não foi considerada o apoio do pórtico por pilares, como neste estudo os pilares são de aço o acréscimo de emissão apresentado representa a emissão dos pilares.

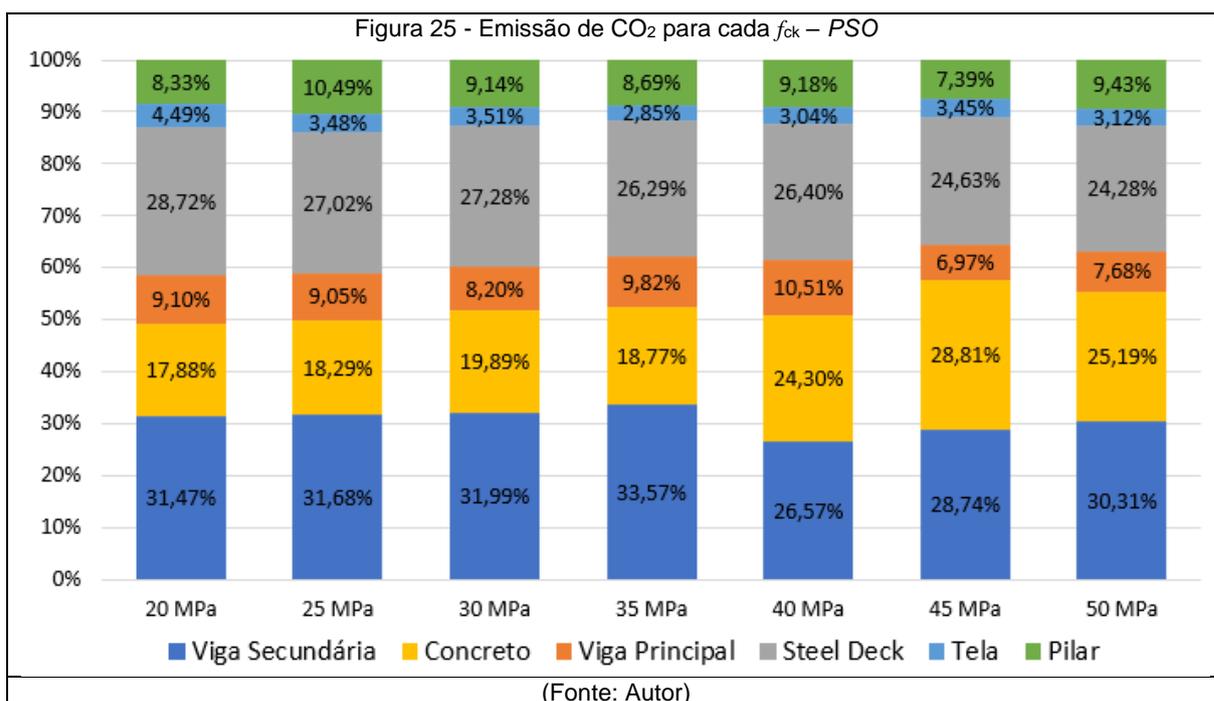
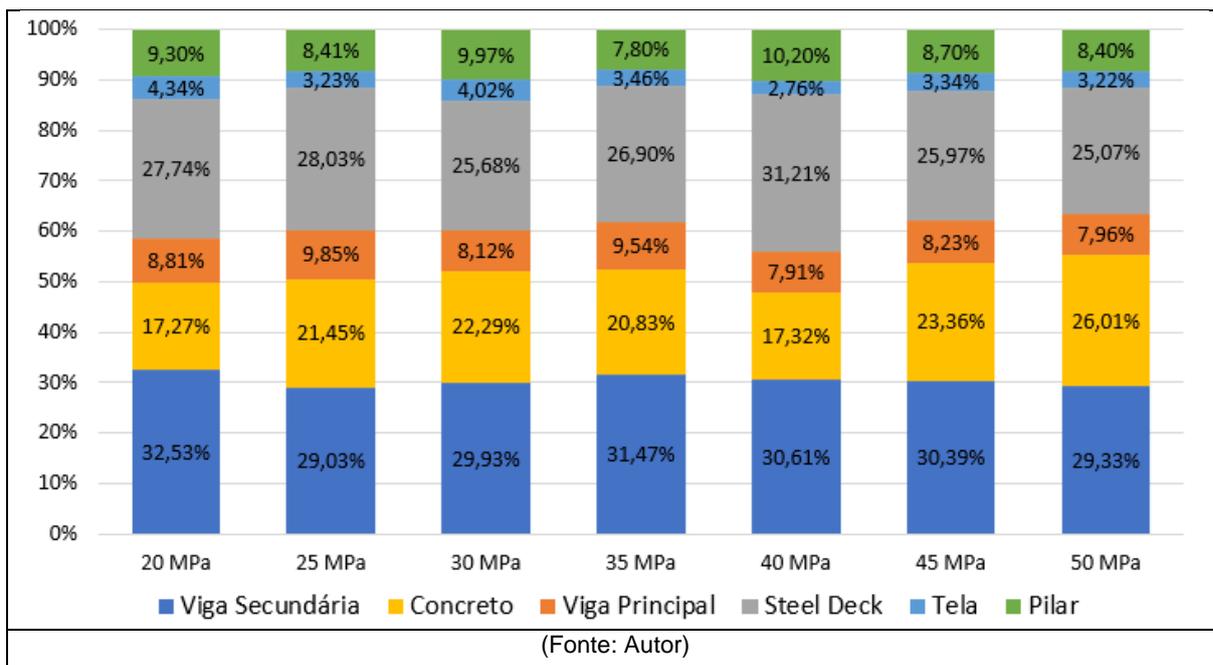
As soluções ótimas apresentadas pelo *PSO* apresentaram uma pequena vantagem em relação a otimização do algoritmo genético especialmente nas resistências mais baixas do concreto. Na solução ótima dos algoritmos a emissão de CO₂ foi muito parecida com o *PSO* apresentando um valor 3% menor que a solução ótima do algoritmo genético. Em relação ao custo financeiro foi observado uma redução de 2% do custo da solução ótima do *PSO* em relação ao algoritmo genético. Uma comparação entre o custo e a emissão é apresentada na Figura 23.



Como pode ser visto na Figura 23, as soluções até 30 MPa mostram uma melhor otimização das emissões e dos custos (barras de razão menores que 1) a partir de 35 MPa o algoritmo genético apresentou melhores soluções que as encontradas pelo *PSO*. O custo financeiro apresentou comportamento semelhante à emissão, com a estrutura ficando vantajosa financeiramente para o algoritmo genético nas soluções com os maiores f_{ck} .

As Figuras 24 e 25 apresentam a discriminação de cada elemento estrutural e quanto cada um representa na emissão total da estrutura do algoritmo genético e da otimização por enxame de partículas, respectivamente.

Figura 24 - Emissão de CO₂ para cada f_{ck} – Algoritmo Genético



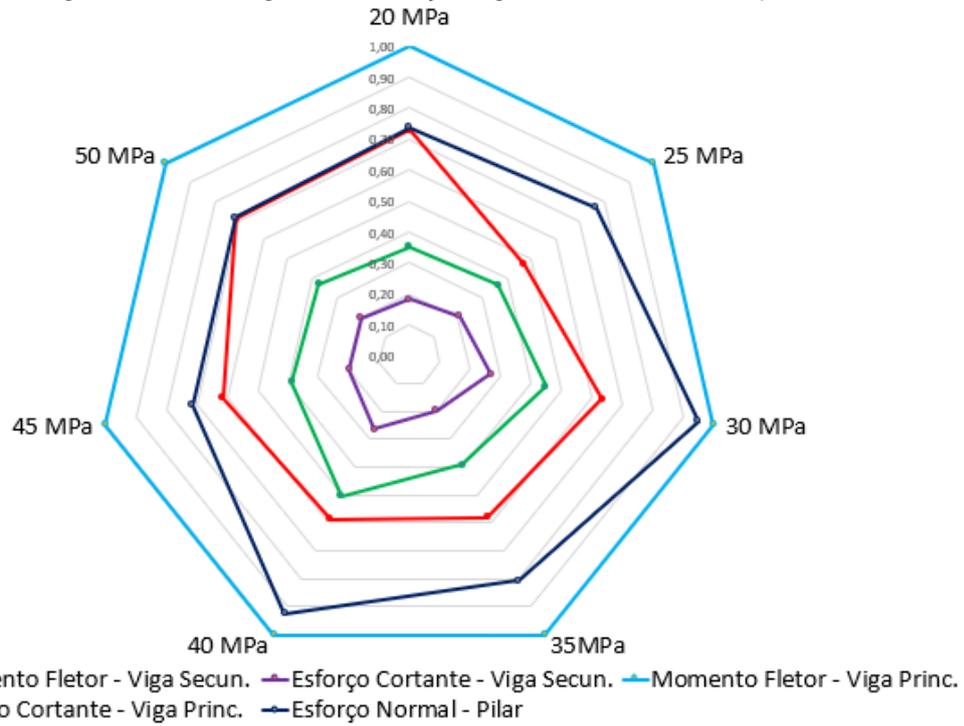
Pela Figura 24 é possível notar que, na otimização realizada pelo algoritmo genético, para todos os f_{ck} as vigas secundárias representaram a maior emissão de CO₂ dentre todos os materiais da estrutura. É também possível concluir que os perfis de aço, ou seja, os pilares e vigas representam, em torno de 40% de toda a emissão proveniente das soluções. Se levarmos em consideração a fôrma de *steel deck*

chegamos a um valor de mais de 70% de emissão proveniente dos materiais de aço. Em relação ao concreto, a emissão proveniente deste elemento representa, em média, 20% de toda a emissão das soluções. O f_{ck} de 20 MPa foi o que apresentou a menor emissão total e também foi o que apresentou a menor emissão do concreto dentre todos as soluções.

A Figura 25 mostra um comportamento semelhante do *PSO* em relação ao algoritmo genético. Novamente as vigas secundárias representaram a maior emissão dentre todos os elementos e logo depois o *steel deck* foi o elemento que mais emitiu CO_2 . A exceção fica por conta da solução de 45 MPa, que como observado na Tabela 11 apresentou a maior espessura da laje de concreto, com isso a emissão do concreto ultrapassou a emissão do *steel deck*. A solução ótima ocorreu em 20 MPa e assim como no algoritmo genético essa solução representou a menor emissão da laje de concreto. Da mesma forma que o algoritmo genético, o *PSO* apresentou a soma das emissões provenientes dos elementos de aço superiores a 70% de toda a emissão das soluções ótimas.

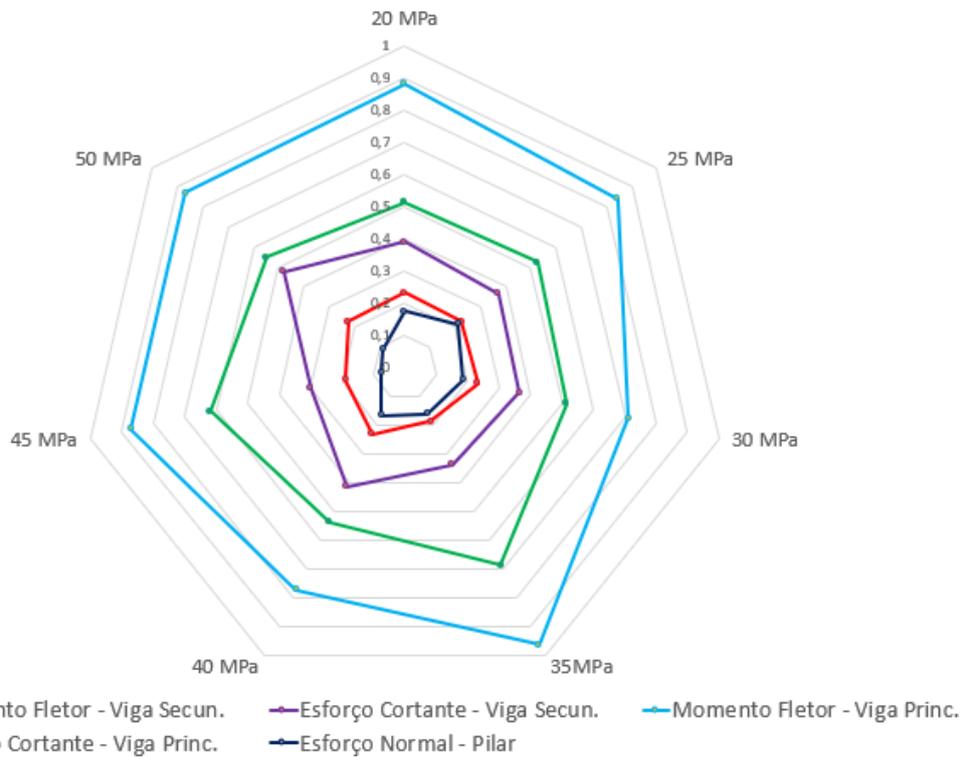
Dentre as diversas restrições impostas ao problema as principais e mais importante para a análise são as que se referem aos estados limites últimos (ELU) das vigas e pilares. As vigas são dimensionadas ao momento fletor e esforço cortante e os pilares ao esforço normal de compressão. A análise dessas características é feita em relação à porcentagem de otimização, ou seja, a razão entre os esforços solicitantes e pelos resistentes. As Figuras 26 e 27 apresentam uma análise das restrições que governam o problema de otimização para os ELU dos elementos estruturais de diferentes f_{ck} para o algoritmo genético e *PSO* respectivamente.

Figura 26 - Porcentagem de otimização Algoritmo Genético - Exemplo 01



(Fonte: Autor)

Figura 27 - Porcentagem de otimização PSO - Exemplo 01



(Fonte: Autor)

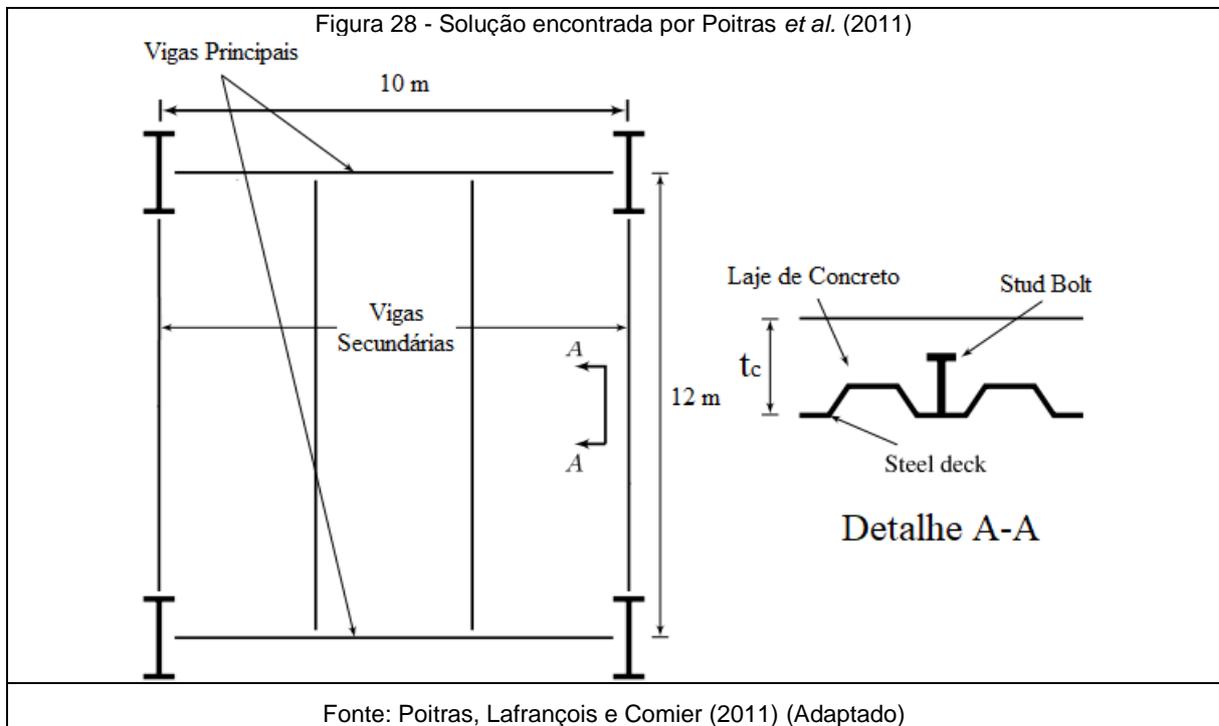
A análise das restrições das soluções propostas pelo algoritmo genético (Figura 26) demonstra de maneira muito clara as restrições que foram mais próximas de serem ativas são as referentes aos momentos fletores das vigas principais que representam os estados limites com maior otimização chegando a 100% em praticamente todos os f_{ck} . O esforço normal o qual está submetido os pilares se mostrou como a segunda maior otimização de ELU do algoritmo genético. Em especial, nas soluções de 30 e 40 MPa a otimização desse esforço esteve acima dos 95%. Os estados limites os quais as vigas secundárias estão submetidas (momento fletor e esforço cortante) se mostraram como as menores otimizações, ficando abaixo dos 50% em todas as soluções. No geral, a solução de 30 MPa foi a demonstrou a melhor porcentagem de otimização considerando os cinco estados limites últimos.

A otimização por enxame de partículas (Figura 27) mostrou uma menor otimização do momento fletor das vigas principais, mas sempre se apresentou acima dos 80% e como a maior otimização entre os ELU em todas as resistências do concreto. O esforço normal que o pilar está submetido obteve a menor entre os estados limites analisados. A otimização do momento fletor das vigas secundárias mostrou-se como a segunda maior otimização. Além disso, no *PSO* o momento fletor das vigas secundárias se mostrou mais aparente que no algoritmo genético. Outro ponto a se destacar foi a otimização dos pilares no algoritmo genético, apresentando como a segunda maior otimização enquanto que o *PSO* apresentou um desempenho substancialmente inferior ao encontrado pelo algoritmo genético, limitando-se a um máximo de 25% na solução de 25 MPa e sendo a menor dentre todos os elementos analisados.

5.3 EXEMPLO 02 – POITRAS, LEFRANÇOIS E CORMIER (2011)

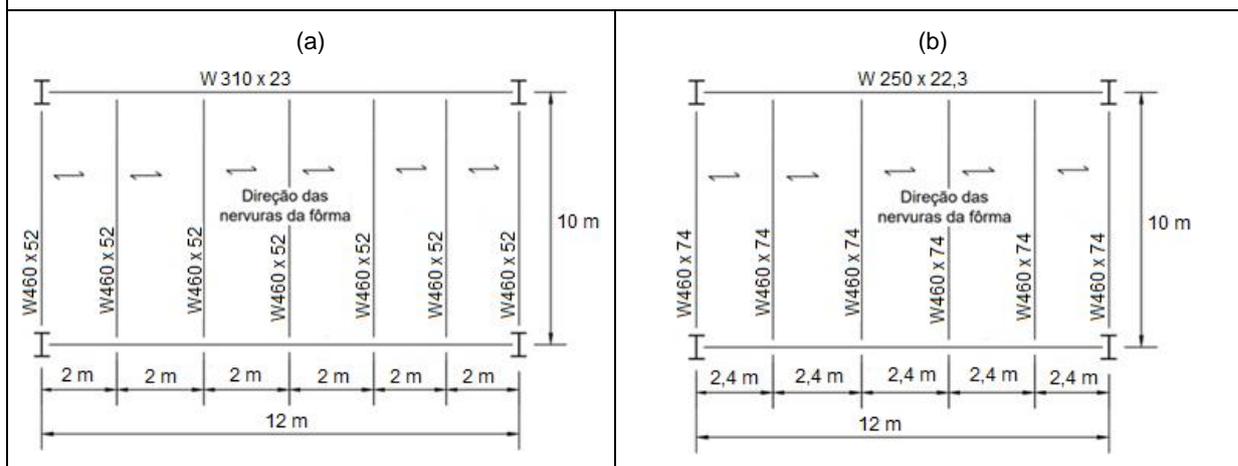
O segundo exemplo numérico analisado foi a laje mista com *steel deck* incorporada descrita no trabalho de Poitras, Lafrançois e Cormier (2011). A otimização original foi realizada através do *PSO* e com função objetivo definida como a soma das massas de cada componente estrutural e submetida às restrições de Estados Limites Últimos por momento fletor e esforço cortante e Estado Limite de Serviço composto

por flecha excessiva e vibração. A Figura 28 mostra a solução proposta pelos autores no f_{ck} de 20 MPa.



Neste segundo exemplo, as cargas permanentes foram de 2,08 kN/m² e 4,8 kN/m² foram as cargas acidentais. As solicitações das vigas de borda foram solicitadas de 8 kN/m nas vigas secundárias e 32 kN/m nas vigas principais. As vigas secundárias encontrada pelos autores do estudo foram do tipo laminadas e com perfil W 610 x 82, as vigas principais foram ainda mais pesadas, formadas pelos perfis W 610 x 140, o *steel deck* resultante foi o PC-2432 com 0,91 mm de espessura e a espessura da laje de concreto foi de 19 cm. Após a inserção dos valores de carga e comprimento do pórtico os algoritmos utilizados neste estudo obtiveram as soluções das vigas secundárias na direção do menor comprimento, 10 m, diferentemente da solução proposta pelos autores. Enquanto o algoritmo genético optou por 7 vigas secundárias (5 interiores e 2 exteriores) com o perfil correspondente a W 460 x 52,0 e vigas principais com o perfil de W 310 x 23, a otimização por enxame de partículas encontrou a solução ótima com 6 vigas (4 interiores e 2 exteriores) com perfis W 460 x 74,0 e vigas principais com perfil W 250 x 22,3. A Figura 29 mostra a disposição das vigas apresentada pelos algoritmos.

Figura 29 – Disposição das vigas apresentada pelo Algoritmo Genético (a) e PSO (b)



As características construtivas encontradas pelos algoritmos genético e *PSO* são apresentadas pela Tabela 10.

Tabela 10 - Características construtivas do exemplo 02 com f_{ck} de 20 MPa e Algoritmo Genético

Informações	Unidade	Postras, Lafrançois e Comier (2011)	Algoritmo Genético Autor (2022)	<i>PSO</i> Autor (2022)
Nº de vigas secundárias	un	4	7	6
Tipo de fôrma	--	PC-2432	MF-50	MF-75
Espessura da fôrma	mm	0,90	0,80	0,95
Vão máximo da laje	m	12,00	200	280
Altura total da laje	cm	19,00	15,00	15,00
Espessura do concreto	cm	11,40	10,00	7,50
Tela de fissuração	--	Q-75 (ϕ 3,8-150x150)	Q-113 (ϕ 3,8-100x100)	Q-75 (ϕ 3,8-150x150)
Vigas secundárias	--	W 610 x 82	W 460 x 52,0	W 460 x 74,0
Interação vigas secundárias	--	0,75	0,97	0,90
Conectores vigas secundárias	un	128	308	264

Perfil das vigas principais	--	W 610 x 140	W 310 x 23	W 250 x 22,3
Interação vigas principais	un	0,75	0,70	0,40
Conectores vigas principais	--	114	48	30

É possível notar uma grande diferença na quantidade de vigas secundárias escolhidas pelas soluções ótimas dos exemplos. Enquanto o *PSO* utilizado por Poitras, Lafrançois e Comier (2011) encontrou uma solução ótima com apenas 2 vigas secundárias interiores por outro lado o algoritmo genético e o *PSO* desenvolvido neste estudo encontraram 5 e 4 vigas secundárias interiores respectivamente. Uma possível explicação pode ser tomada pela massa linear dos perfis encontrados nas soluções. Enquanto no algoritmo genético e *PSO* deste estudo as massas lineares dos perfis secundários ficaram entre 52 e 74 kg/m, as vigas secundárias propostas por Poitras, Lafrançois e Comier (2011) apresentou 82 kg/m. A diferença da massa linear se torna mais aparente nas vigas principais, enquanto no artigo base as vigas principais apresentaram 160 kg/m, o algoritmo genético e o *PSO* apresentaram entre 22 e 23 kg/m.

A Tabela 11 mostra a emissão de CO₂ de cada componente estrutural dos dois algoritmos e do resultado proposto por Poitras, Lafrançois e Comier (2011). Neste exemplo não foi indicado qual a emissão da tela de fissuração por isso ela foi retirada da comparação. Os conectores do tipo *stud bolt* foram quantificados e suas emissões incorporadas às emissões das vigas secundárias e principais.

Tabela 11 - Emissão de CO₂ dos elementos do exemplo 02 para f_{ck} de 20 MPa, AG e *PSO*

Elementos	Poitras, Lafrançois e Comier (2011)	Enxame de Partículas Autor (2022)	Algoritmo Genético Autor (2022)
Vigas Secundárias	4453,12	3456,80	4029,13
Vigas Principais	3155,07	670,20	711,87
Fôrma <i>steel deck</i>	4444,50	2655,93	2655,93

Concreto da laje	2960,58	1752,98	1947,75
TOTAL	15013,27	8535,91	9344,69

Através da análise da Tabela 11 é possível verificar que ambos os algoritmos propostos neste trabalho apresentaram uma menor emissão de CO₂ se comparado à solução proposta por Poitras, Lafrançois e Comier (2011). Entre os dois algoritmos utilizados neste trabalho, o *PSO* mostrou-se como uma melhor solução em comparação ao algoritmo genético em termos de emissão de CO₂.

É importante frisar que na solução proposta pelos autores do estudo, além dos estados limites últimos analisados, foi também considerado o estado limite de serviço para vibração máxima do pórtico. A consideração desse ELS pode ter acarretado uma solução mais robusta em relação aos perfis de aço encontrados para a formação da solução ótima proposta.

Após essa análise preliminar, os algoritmos foram rodados para uma faixa de resistência de concreto para a análise da emissão total da estrutura além do cálculo do custo relativo a cada solução. O pé direito considerado para o pórtico foi de 3m. As Tabelas 12 e 13 mostram as características construtivas das soluções ótimas do algoritmo genético e da otimização por enxame de partículas (*PSO*), respectivamente.

Tabela 12 - Considerações construtivas do exemplo 01 para diferentes f_{ck} do concreto e Algoritmo Genético

Informações	Un.	20 MPa	25 MPa	30 MPa	35 MPa	40 MPa	45 MPa	50 MPa
Nº de vigas Secundárias	un	7	8	7	7	7	7	8
<i>Steel Deck</i>	--	MF-50	MF-50	MF-50	MF-50	MF-50	MF-50	MF-50
Espessura da fôrma	mm	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Vão máximo da laje	m	200	180	200	200	200	200	180
Altura total da laje	cm	15	12	15	14	13	13	11
Capa de concreto	cm	7	10	9	9	9	9	6
Tela de fissuração	--	Q-113 (ø3,8 x	Q-75 (ø3,8 x	Q-92 (ø4,2 x	Q-92 (ø4,2 x	Q-92 (ø4,2 x	Q-92 (ø4,2 x	Q-75 (ø3,8 x

		ø3,8 - 100x100)	ø3,8 - 150x150)	ø4,2 - 150x150)	ø4,2 - 150x150)	ø4,2 - 150x150)	ø4,2 - 150x150)	ø3,8 - 150x150)
Perfil Vigas Secundárias	--	W 460 x 52.0	W 360 x 44.6	W 460 x 52.0	W 460 x 52.0	W 460 x 52.0	W 410 x 46.1	W 460 x 52.0
Grau de interação Vigas Secundárias	--	0,97	1	0,9	0,9	0,9	0,97	0,96
Total de conectores Vigas Secundárias	un	308	352	308	308	308	308	352
Perfil Vigas Principais	--	W 310 x 23.8	W 310 x 23.8	W 460 x 52.0	W 310 x 23.8	W 310 x 21.0	W 250 x 25.3	W 310 x 23.8
Grau de interação Vigas Principais	--	0,7	0,75	0,63	0,78	0,97	0,75	0,87
Total de conectores Vigas Principais	un	48	52	92	52	60	56	60
Perfil dos Pilares	un	W 360 x 51.0	W 410 x 53.0	W 360 x 51.0	W 410 x 60.0	W 360 x 51.0	W 360 x 51.0	W 460 x 74.0
Custo Total	R\$	66009,46	64438,55	71751,73	66151,73	64893,14	62392,76	73847,20
Emissão de CO ₂ total	kg	10428,49	9953,14	11275,67	10776,62	10702,01	10608,06	11269,98

Tabela 13 - Considerações construtivas do exemplo 01 para diferentes f_{ck} do concreto e PSO

Informações	Un.	20 MPa	25 MPa	30 MPa	35 MPa	40 MPa	45 MPa	50 MPa
Nº de vigas Secundárias	un	6	6	6	7	7	6	6
<i>Steel Deck</i>	--	MF-75	MF-75	MF-75	MF-75	MF-50	MF-75	MF-50
Espessura da fôrma	mm	0,95	0,8	1,25	0,95	0,8	0,95	1,25
Vão máximo da laje	m	280	250	240	210	210	240	290
Altura total da laje	cm	15,00	18	13	13	15	16	11
Capa de concreto	cm	7,50	10,5	8	8	10	8,5	6
Tela de fissuração	--	Q-75 (ø3,8- 150x150)	Q-113 (ø3,8 x ø3,8 - 100x100)	Q-92 (ø4,2 x ø4,2 - 150x150)	Q-92 (ø4,2 x ø4,2 - 150x150)	Q-113 (ø3,8 x ø3,8 - 100x100)	Q-92 (ø4,2 x ø4,2 - 150x150)	Q-75 (ø3,8 x ø3,8 - 150x150)
Perfil Vigas Secundárias	--	W 460 x 74,0	W 360 x 51.0	HP 250 x 62.0 (H)	W 360 x 58.0	W 410 x 60.0	W 360 x 64.0	W 200 x 59.0 (H)

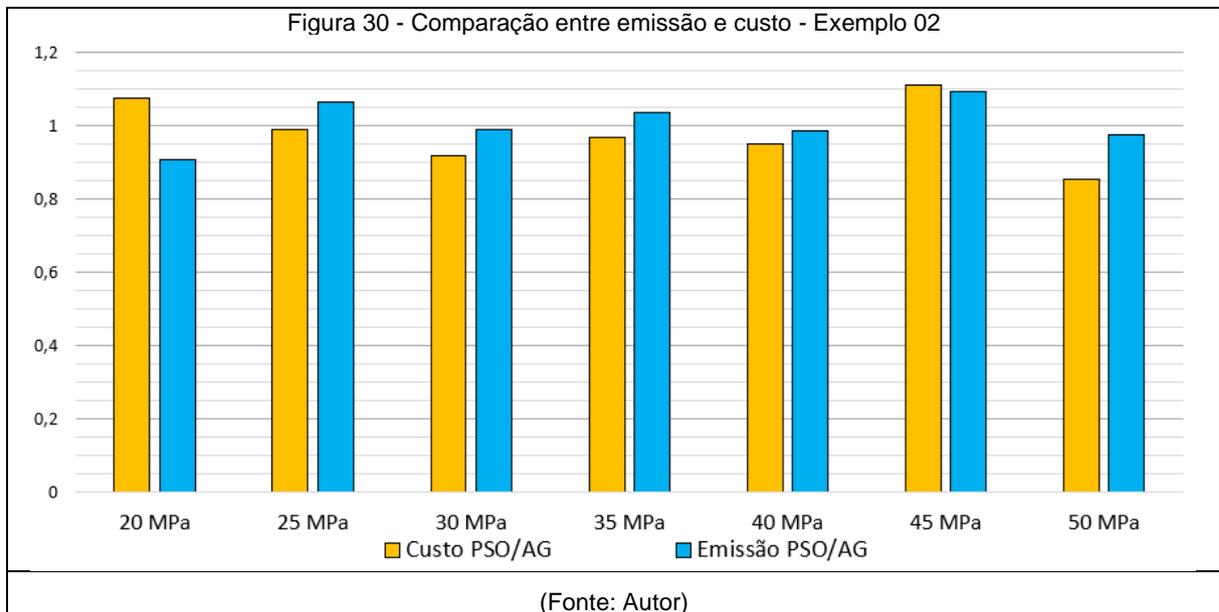
Grau de interação Vigas Secundárias	--	0,90	1	0,8	0,8	0,76	0,8	0,77
Total de conectores Vigas Secundárias	un	264	264	264	308	308	264	264
Perfil Vigas Principais	--	W 250 x 22,3	W 250 x 28.4	W 250 x 38.5	W 360 x 32.9	W 310 x 23.8	W 310 x 23.8	W 530 x 85.0
Grau de interação Vigas Principais	--	0,40	0,78	0,69	0,7	0,75	0,88	0,73
Total de conectores Vigas Principais	un	30	64	76	64	52	60	176
Perfil dos Pilares	un	W 410 x 53.0	W 410 x 53.0	HP 310 x 79.0 (H)	W 360 x 51.0	W 410 x 53.0	HP 250 x 85.0 (H)	W 530 x 74.0
Custo Total	R\$	70838,39	63677,09	65849,74	63991,62	61576,04	69139,32	63105,03
Emissão de CO ₂ total	kg	9445,37	10578,07	11145,56	11164,25	10524,29	11568,97	10973,06

Analisando os resultados apresentados na Tabela 12 é possível ver que com exceção das resistências de 25 e 50 MPa, as quais apresentam 8 vigas secundárias, todas as outras soluções são apresentadas com 7 vigas secundárias. O aumento do número de vigas secundárias permite uma redução na seção transversal dos perfis de aço da laje mista e também uma menor espessura da laje de concreto. A solução que menos emitiu dentre as resistências foi a de 25 MPa, é possível ver nessa solução a menor espessura da laje de concreto, além disso a menor massa linear dos perfis das vigas secundárias. A solução que apresentou o menor custo financeiro foi a apresentada no f_{ck} de 45 MPa.

As soluções encontradas pelo *PSO* apresentadas na Tabela 13 demonstram que a otimização por enxame de partículas tem uma tendência a apresentar uma geometria com menos vigas secundárias que as apresentadas pelo algoritmo genético na Tabela 15. Esta tendência se inverte quando é analisado a espessura da capa de concreto e o tamanho da fôrma de *steel deck* utilizado nas soluções e constatado que apresentam valores inferiores aos apresentados pelo algoritmo genético. A solução ótima apresentada pelo enxame de partículas foi cerca de 5% menor que a apresentada pelo algoritmo genético. Em relação ao custo financeiro das soluções, o *PSO* também apresentou uma pequena vantagem em relação ao

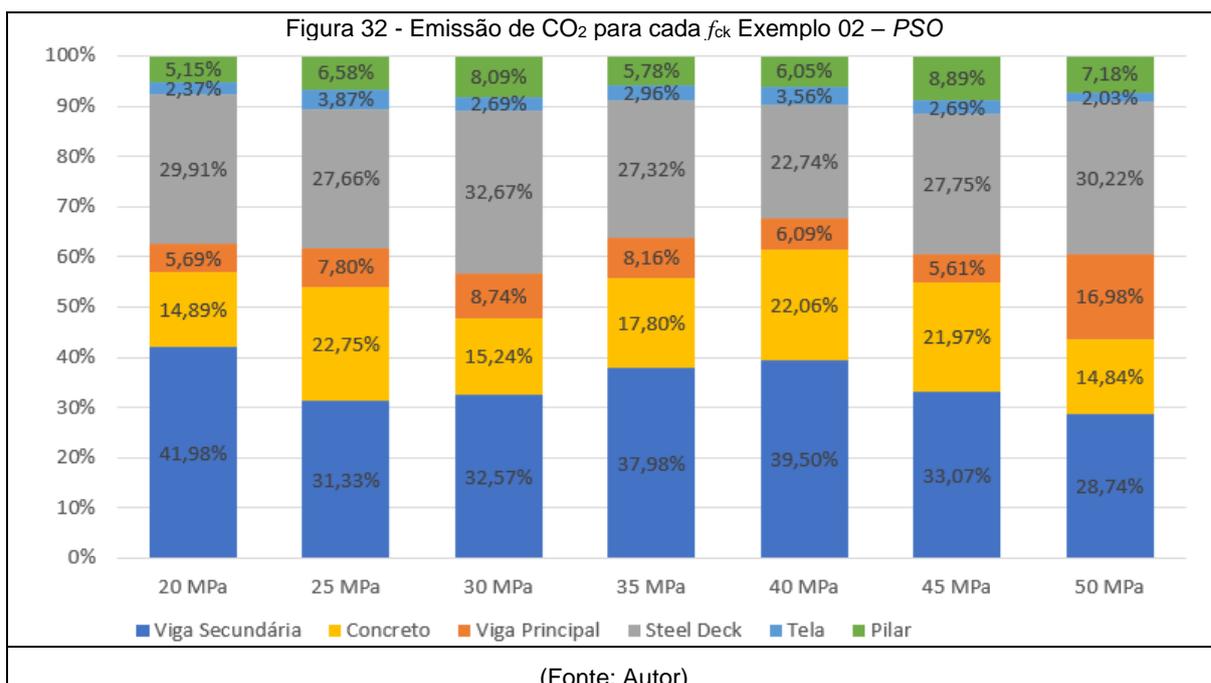
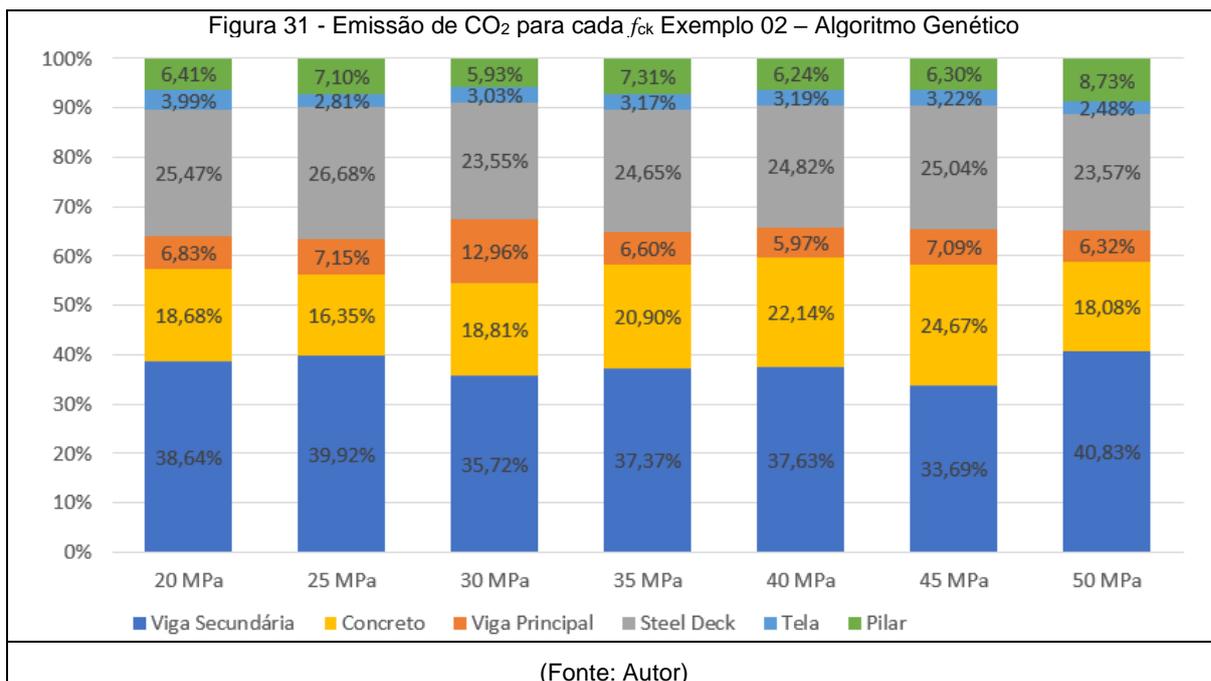
algoritmo genético a solução mais econômica *do PSO* representa 98% do custo da solução ótima proposta pelo algoritmo genético evidenciando que o *PSO* apresenta melhores soluções para o exemplo.

Uma comparação entre o custo e a emissão é apresentada na Figura 30.



Pela análise da Figura 30 é possível notar que o custo financeiro apresentado pela otimização por enxame de partículas se mostrou vantajoso em quase todas as resistências de concreto testadas. As exceções se dão nos f_{ck} de 20 e 45 MPa. A emissão por outro lado se mostrou mais equilibrada entre os algoritmos sendo praticamente a mesma nos f_{ck} de 30 e 40 MPa. A solução de 20 MPa apresenta a maior discrepância em relação à emissão exatamente por se tratar da solução ótima.

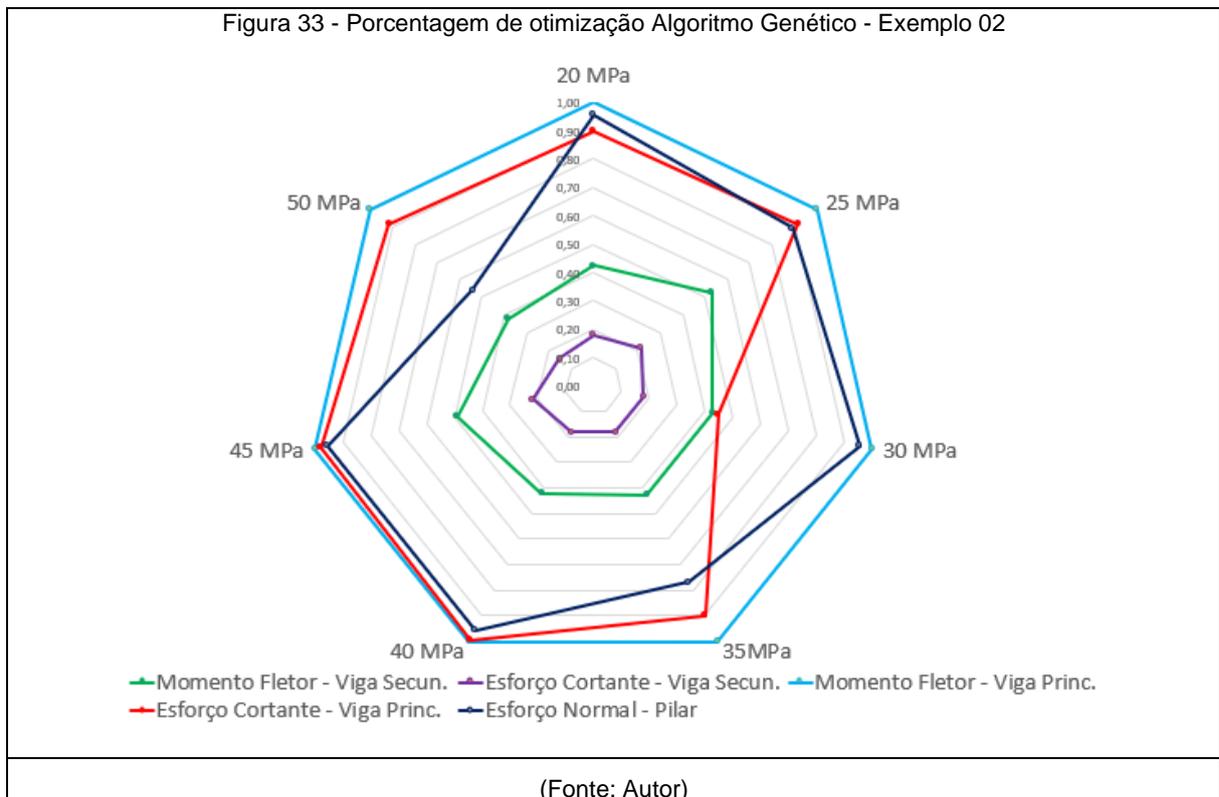
As Figuras 31 e 32 apresentam quanto a emissão de cada elemento estrutural representa em relação a emissão total da solução ótima.

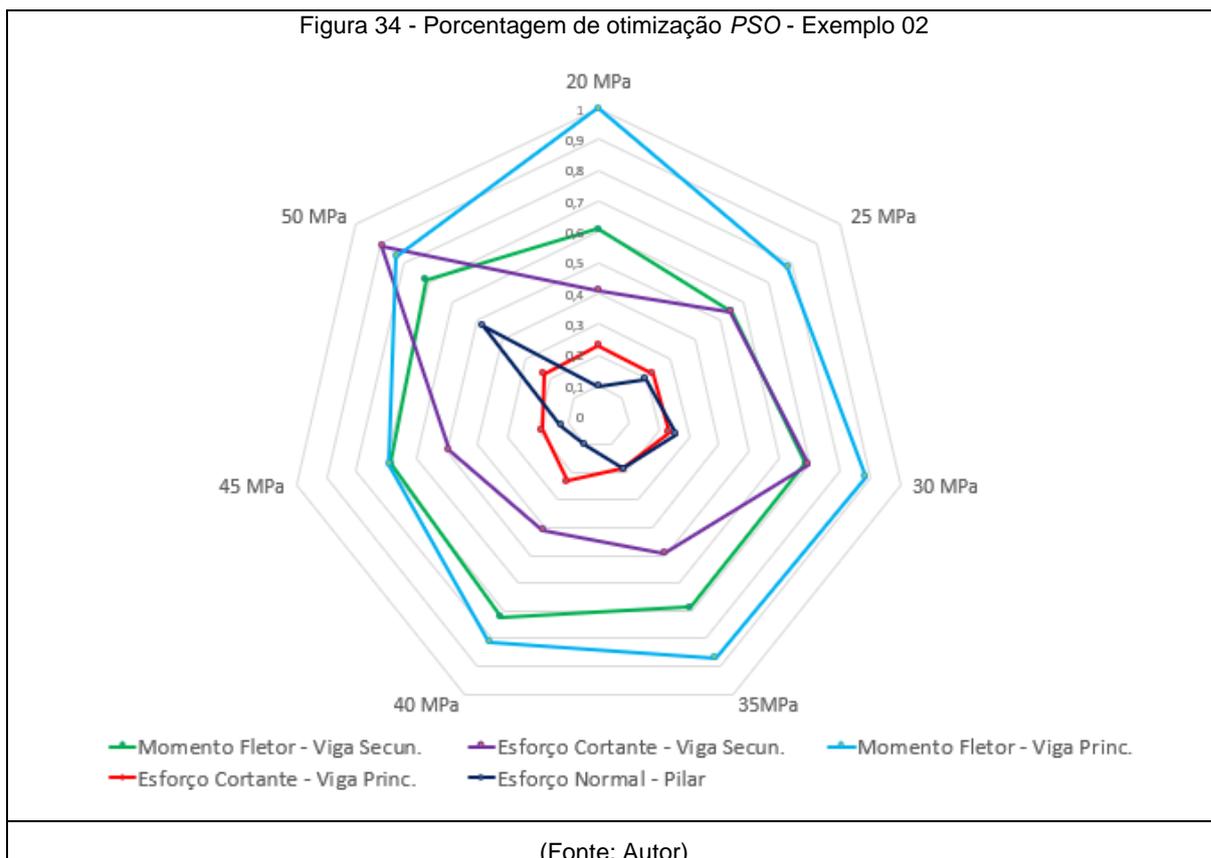


A Figura 31 mostra que no algoritmo genético as vigas secundárias representaram a maior emissão dentre todos os elementos, ficando sempre acima dos 33% de toda a emissão das soluções. Além disso é possível concluir que os materiais de aço representam grande parte de toda a emissão. Na solução ótima, por exemplo, mais de 80% de toda a emissão é proveniente dos perfis de aço e do *steel deck*.

Na Figura 32 é apresentado a discriminação do algoritmo *PSO*. Neste algoritmo a maior emissão referente ao concreto foi apresentada na solução ótima de 25 MPa representando mais de 22% de toda a emissão da solução. Além disso as vigas secundárias continuam representando a maior parcela de emissão de CO₂ da estrutura.

As Figuras 33 e 34 mostram as porcentagens de otimização do algoritmo genético e da otimização por enxame de partículas, respectivamente.





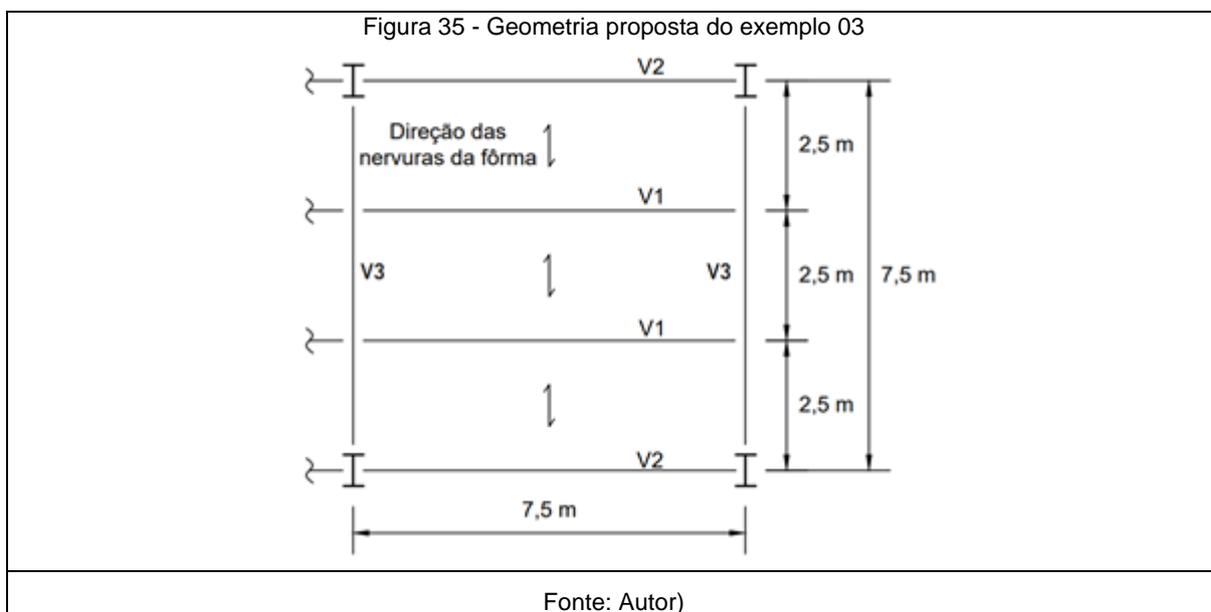
A Figura 33 mostra a porcentagem de otimização do exemplo proposto pelo algoritmo genético. O momento fletor das vigas principais, assim como no exemplo 01, foi o ELU que apresentou a maior otimização, ficando em 100% em praticamente todos os f_{ck} . Além do momento fletor, o ELU provocado pelo esforço cortante nas vigas principais e pelo esforço normal nos qual os pilares estão submetidos mostraram uma grande otimização nas soluções de 20, 25, 40 e 45 MPa. Além disso, na solução de 35 e 50 MPa também foram apresentadas otimizações acima dos 50% em ambos os ELU. As vigas secundárias não mostraram uma otimização significativa tanto para o esforço cortante quanto para o momento fletor analisados.

A Figura 34 mostra um comportamento mais contido do ELU por flexão nas vigas principais, a resistência de 20 MPa mostra a maior otimização chegando a 100%. O esforço cortante das vias principais se mostrou preponderante na solução de 50 MPa chegando a 90%. O momento fletor das vigas secundárias se mostraram com uma otimização significativa, estando sempre acima dos 50% de otimização. Os

pilares, por outro lado se mostram com uma baixa otimização chegando a um máximo de 50% de otimização na solução de 50 MPa.

5.4 EXEMPLO 03 – FAKURY, SILVA E CALDAS (2016)

O terceiro exemplo apresentado foi proposto por Fakury, Silva e Caldas (2016), onde é dimensionamento o piso de um edifício comercial situado em local de agressividade ambiental moderada. A laje é mista, com fôrma MF-75 de 0,95 mm de espessura, 15,0 cm de altura total, tela soldada Q-75 ($\varnothing 3,8 \times \varnothing 3,8 - 150 \times 150$) e concreto com resistência característica à compressão de 25 MPa, e agregado graúdo de gnaíse na sua composição. Neste exemplo as cargas permanentes foram de 1,5 kN/m², as cargas acidentais foram de 5 kN/m² e não houve cargas nas vigas de borda. As vigas mistas secundárias internas V1 e as vigas de borda V2 são biapoiadas com perfil laminado W 410 x 38,8 e na viga principal V3 utilizou-se o perfil W 310 x 28,3. Nesta primeira comparação, como nos exemplos anteriores, os perfis dos pilares não foram otimizados, pois o problema original tratava apenas de uma laje. A Figura 35 mostra a disposição das vigas secundárias e principais proposto por Fakury, Silva e Caldas (2016).



Após a execução da rotina de otimização foram encontradas as características da solução otimizada.

A Figura 36 mostra a disposição das vigas da solução otimizada e a mostra as características da solução otimizada e solução proposta pelos autores do livro e a Tabela 14 apresenta as características construtivas encontradas pelo algoritmo genético e pela otimização por enxame de partículas frente a proposta por Fakury, Silva e Caldas (2016).

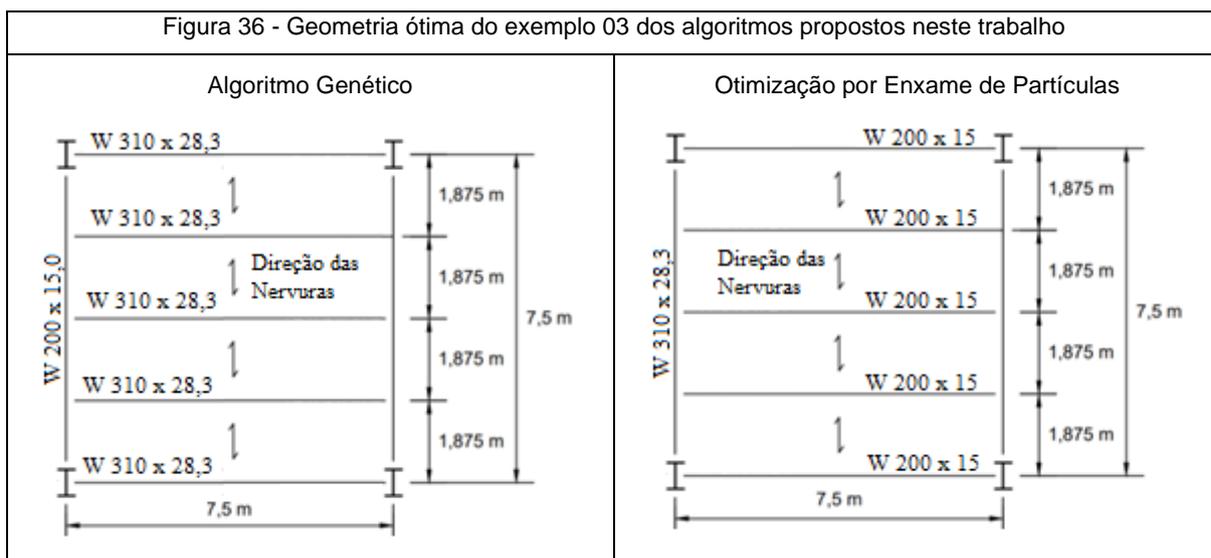


Tabela 14 – Características construtivas encontrados para o problema exemplo 02 para o Algoritmo Genético

Informações	Unidade	Fakury, Silva e Caldas (2016)	Algoritmo Genético Autor (2022)	Enxame de Partículas Autor (2022)
Nº de vigas secundárias	un	4	5	5
Tipo de fôrma	--	MF-75	MF-50	MF-50
Espessura da fôrma	mm	0,95	0,8	0,8
Vão máximo da laje	m	2,50	1,90	2,20
Altura total da laje	cm	15,00	14,00	16,00
Espessura da capa de concreto	cm	7,50	9,00	11,00
Tela de fissuração	--	Q-75 (ø3,8-150x150)	Q-92 (ø4,2 x ø4,2 - 150x150)	Q-92 (ø4,2 x ø4,2 - 150x150)

Perfil das vigas secundárias	--	W 410 x 38,8	W 310 x 28,3	W 200 x 15,0
Interação vigas secundárias	--	0,47	0,88	0,74
Conectores vigas secundárias	un	64	220	220
Perfil das vigas principais	--	W 310 x 28,3	W 200 x 15,0	W 310 x 28,3
Interação vigas principais	un	0,47	0,55	0,59
Conectores vigas principais	--	32	24	28

Conforme pode ser observado na Tabela 14, uma viga secundária foi adicionada à solução ótima em relação a solução inicialmente proposta por Fakury, Silva e Caldas (2016). A redução da espessura total da laje de concreto e também do tipo de fôrma de *steel deck* são consequências estruturais da adição da viga secundárias extra. Além disso, o algoritmo genético apresentou uma redução da massa linear dos perfis estruturais utilizados a solução. Nas vigas secundárias por exemplo a massa linear reduziu em mais de 27%. Nas vigas principais a redução foi de cerca de 47% da solução original proposta por Fakury, Silva e Caldas (2016). A Tabela 14 também apresenta as características propostas pela otimização por enxame de partículas, este algoritmo mostrou uma solução com características parecidas às apresentadas pelo algoritmo genético. A fôrma de *steel deck* utilizada também foi reduzida, entretanto a espessura da capa de concreto e conseqüentemente a armadura de fissuração aumentaram, esses aumentos provocaram uma redução da massa linear dos perfis nas vigas secundárias e principais além da adoção de uma maior interação entre a laje de concreto e os perfis de aços nestes elementos estruturais. A Tabela 15 mostra as a comparação das emissões de CO₂ para cada membro da otimização.

Tabela 15 - Emissão de CO₂ do exemplo 03 para 25 MPa

Elementos	Fakury, Silva e Caldas (2016)	Algoritmo Genético Autor (2022)	Enxame de Partículas Autor (2022)
Vigas Secundárias	2963,54	1624,14	1321,26

Vigas Principais	894,71	595,42	431,30
Fôrma <i>steel deck</i>	1661,90	1244,97	1244,97
Concreto da laje	885,18	923,16	842,88
Tela de fissuração	130,95	160,17	160,17
TOTAL	6536,28	4247,86	4000,59

De acordo com a Tabela 15, a emissão de CO₂ obtido pela formulação proposta neste trabalho foi minimizado na maioria dos itens com exceção das emissões da tela de fissuração que em ambos os algoritmos apresentaram uma maior emissão. Em ambos os algoritmos utilizados neste trabalho o item que apresentou a maior redução foram as vigas secundárias, com cerca de 45% de redução no algoritmo genético e mais de 55% na otimização por enxame de partículas. Na emissão global das estruturas a otimização por enxame de partículas se mostrou ligeiramente melhor que o algoritmo genético. A redução da emissão global apresentada pelo algoritmo genético foi de 35% menor que a proposta pelos autores e o *PSO* mostrou uma redução de pouco menos que 49% em relação a solução original.

Da mesma forma que os exemplos anteriores, foi realizado ainda a análise da solução otimizada para diferentes valores de f_{ck} afim de encontrar a solução que menos emite CO₂ de forma a apontar a influência nos resultados da otimização do impacto ambiental em diferentes resistências do concreto. Nessas análises foi inserido a otimização do pilar de aço para um pé direito de 3m, dessa forma é possível encontrar a melhor solução para custo financeiro e emissão do pórtico completo. As Tabelas 16 e 17 apresentam as características construtivas para cada f_{ck} para o algoritmo genético e para a otimização por enxame de partículas.

Tabela 16 - Considerações construtivas do exemplo 03 para diferentes f_{ck} do concreto pelo algoritmo genético

Informações	Un.	20 MPa	25 MPa	30 MPa	35 MPa	40 MPa	45 MPa	50 MPa
Nº de vigas Secundárias	un	5	5	5	5	5	5	5
<i>Steel Deck</i>	--	MF-50						
Espessura da fôrma	mm	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

Vão máximo da laje	m	190	190	190	200	190	190	190
Altura total da laje	cm	12	14	13	13	12	12	12
Capa de concreto	cm	7	9	8	8	7	7	7
Tela de fissuração	--	Q-75 (ø3,8 x ø3,8 - 150x150)	Q-92 (ø4,2 x ø4,2 - 150x150)	Q-92 (ø4,2 x ø4,2 - 150x150)	Q-92 (ø4,2 x ø4,2 - 150x150)	Q-75 (ø3,8 x ø3,8 - 150x150)	Q-75 (ø3,8 x ø3,8 - 150x150)	Q-75 (ø3,8 x ø3,8 - 150x150)
Perfil Vigas Secundárias	--	W 410 x 38.8	W 410 x 38.8	W 410 x 38.8	W 200 x 35.9 (H)	W 250 x 38.5	W 410 x 38.8	W 410 x 38.8
Interação Vigas Secundárias	--	0,86	0,88	0,85	0,93	0,87	0,95	0,88
Conectores Vigas Secundárias	un	220	220	220	220	220	220	220
Perfil Vigas Principais	--	W 200 x 15.0	W 200 x 15.0	W 200 x 15.0	W 150 x 18.0	W 200 x 15.0	W 200 x 15.0	W 200 x 15.0
Interação Vigas Principais	--	0,74	0,55	0,58	0,75	0,59	0,71	0,72
Conectores Vigas Principais	un	32	24	24	40	28	32	32
Perfil dos Pilares	un	W 250 x 38.5	W 310 x 38.7	W 410 x 46.1	W 360 x 44.6	W 360 x 44.6	W 410 x 46.1	W 410 x 46.1
Custo Total	R\$	29288,66	29741,56	30444,88	29740,24	30048,25	30772,81	30926,46
Emissão de CO ₂ total	kg	4589,84	4761,56	4842,14	4798,01	4796,51	4920,01	4973,03

Tabela 17 - Considerações construtivas do exemplo 03 para diferentes f_{ck} do concreto pelo PSO

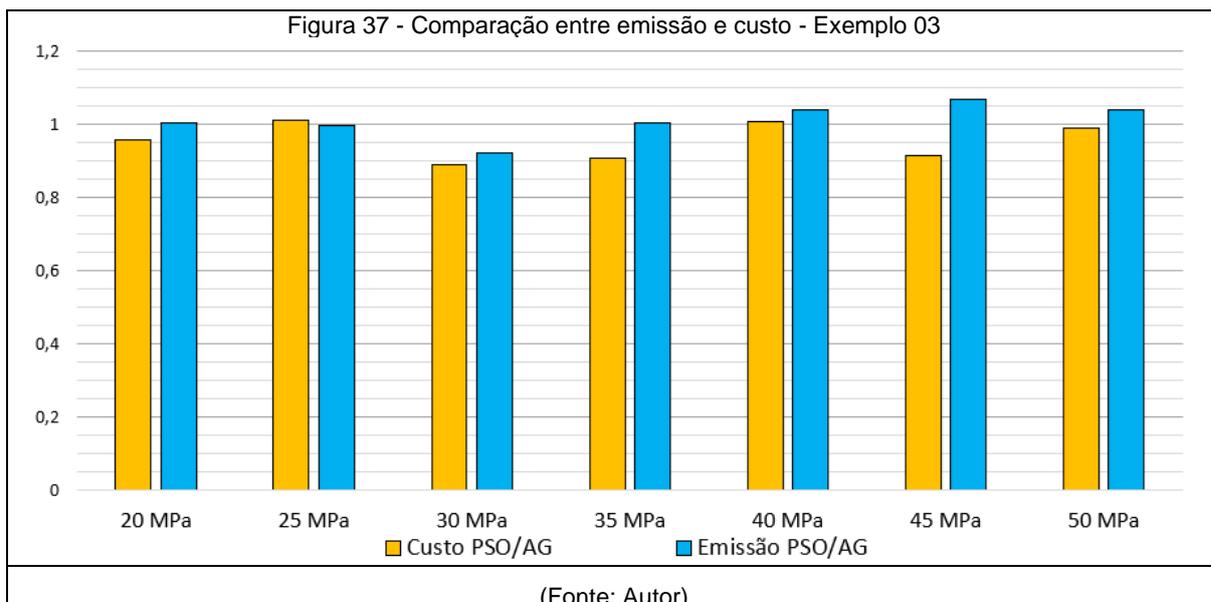
Informações	Un.	20 MPa	25 MPa	30 MPa	35 MPa	40 MPa	45 MPa	50 MPa
Nº de vigas Secundárias	un	4	5	4	5	4	5	5
Steel Deck	--	MF-75	MF-50	MF-75	MF-50	MF-75	MF-50	MF-50
Espessura da fôrma	mm	0,95	0,8	0,8	0,8	0,8	0,95	0,8
Vão máximo da laje	m	270	220	250	200	250	220	190
Altura total da laje	cm	17	16	17	13	17	13	13
Capa de concreto	cm	9,5	11	9,5	8	9,5	8	8
Tela de fissuração	--	Q-92 (ø4,2 x ø4,2 - 150x150)	Q-113 (ø3,8 x ø3,8 - 100x100)	Q-92 (ø4,2 x ø4,2 - 150x150)				
Perfil Vigas Secundárias	--	W 410 x 46.1	W 410 x 46.1	W 250 x 38.5	W 250 x 38.5	W 360 x 39.0	W 360 x 39.0	W 310 x 38.7
Grau de interação Vigas	--	0,81	0,74	0,98	0,96	0,99	0,86	0,87

Secundárias								
Conectores Vigas Secundárias	un	176	220	176	220	176	220	220
Perfil Vigas Principais	--	W 200 x 15.0	W 200 x 15.0	W 200 x 15.0	W 410 x 38.8	W 310 x 21.0	W 310 x 21.0	W 360 x 32.9
Interação Vigas Principais	--	0,82	0,59	0,83	0,61	0,67	0,64	0,49
Conectores Vigas Principais	un	36	28	36	68	40	40	48
Perfil dos Pilares	un	W 360 x 44.6	W 250 x 38.5	W 200 x 35.9 (H)	W 250 x 38.5	W 200 x 35.9 (H)	W 150 x 29.8 (H)	W 200 x 35.9 (H)
Custo Total	R\$	28002,96	30023,84	27012,08	26909,91	30254,46	28089,54	30544,27
Emissão de CO ₂ total	kg	4519,11	4447,10	4466,25	4802,87	4974,01	5248,75	5158,93

Através da Tabela 16 observa-se que, no algoritmo genético, o aumento da resistência do concreto provoca, a princípio, um acréscimo na emissão de CO₂. Em 35 e 40 MPa ocorre uma nova redução da emissão ficando próximos da emissão de 25 MPa. A solução que apresentou a menor emissão foi a solução de 20 MPa corroborando para a análise inicial de aumento de emissão com o aumento da resistência do concreto.

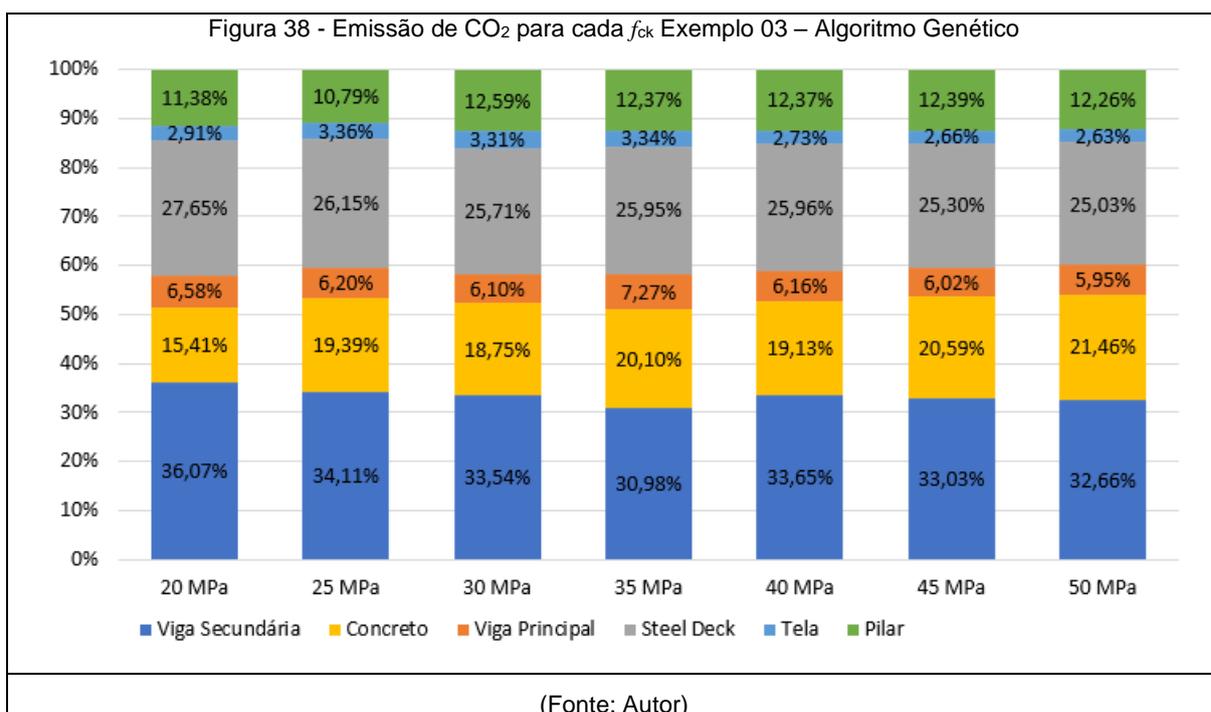
A Tabela 17, que mostra os valores encontrados pelo *PSO*, apresenta, na maioria dos casos, valores menores de emissão se comparado aos resultados do algoritmo genético. Além disso, as menores emissões encontradas para o problema se mostraram nas soluções deste algoritmo (nas resistências de 25 e 30 MPa). A solução de 20 MPa, a terceira que menos emite da otimização por enxame de partículas é menor dentre todas as soluções apresentadas pelo algoritmo genético.

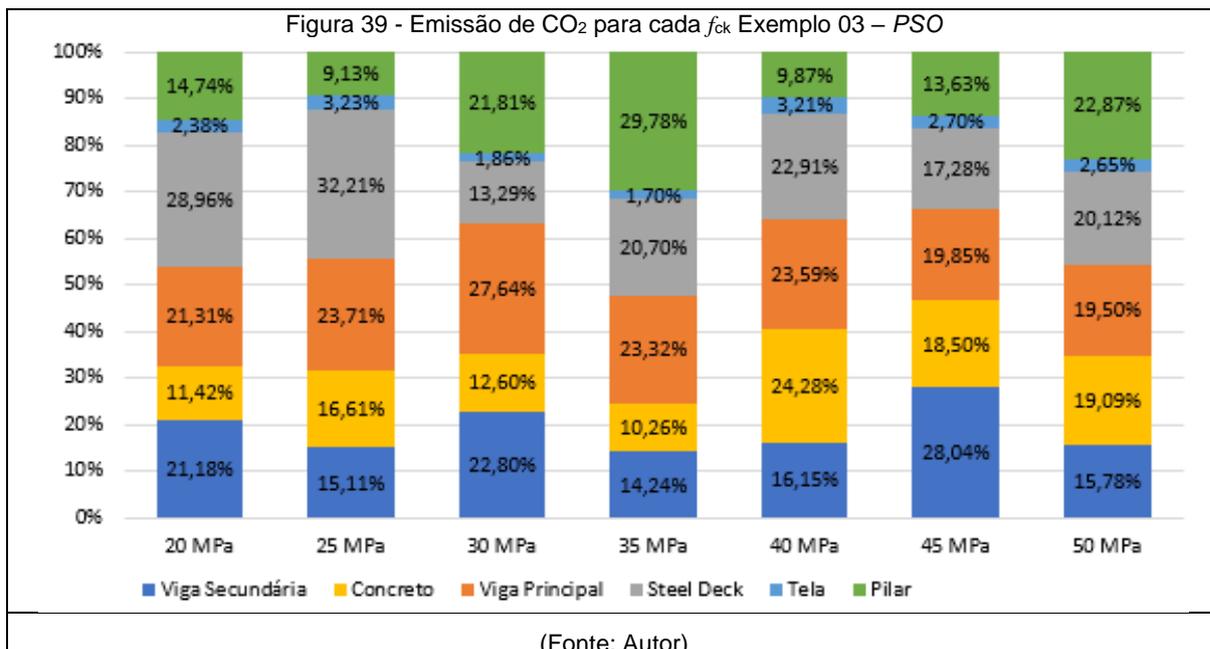
Além da emissão de CO₂, nas Tabelas 16 e 17 também é apresentado o custo financeiro para a realização das soluções. O menor custo financeiro foi apresentado pela otimização por enxame de partículas na resistência de 30 MPa. No algoritmo genético a solução que menos emitia foi a que apresentou o menor custo financeiro também, ou seja, a solução com 20 MPa. Uma comparação entre o custo e a emissão das soluções é apresentada na Figura 37.



A Figura 37 mostra que, com exceção às soluções de 25 e 40 MPa que apresentaram valores muito semelhantes em ambos os algoritmos, em geral as soluções apresentadas pelo *PSO* se mostraram mais vantajosas no custo financeiro a ser gasto. A emissão das estruturas se mostrou melhor no algoritmo genético, entretanto a solução ótima foi encontrada pela otimização por enxame de partículas na resistência de 30 MPa.

As Figuras 38 e 39 apresentam a discriminação da emissão de cada um dos elementos otimizados que compõe o pórtico misto.





Pelo gráfico da emissão de CO₂ da Figura 38 é possível verificar que as vigas secundárias representaram a maior emissão (em média de 33%) dentre todos os materiais em todas as resistências de concreto. O concreto da laje apresentou um aumento na emissão a medida que se aumentava a sua resistência característica. Na solução ótima apresentada pelo algoritmo genético (20 MPa) foi apresentada a menor emissão do concreto ficando em torno de 15% do total e por conseguinte apresentou a maior emissão dos materiais formados por aço (vigas, pilares e fôrma) chegando a um valor maior que 80% nesta solução.

A Figura 39, que apresenta a emissão das soluções propostas pelo PSO, apresentou algumas mudanças em relação ao algoritmo genético. Primeiramente as emissões totais do concreto se mostraram ligeiramente maiores que as apresentadas pelo algoritmo genético. Na solução ótima (20 MPa) o concreto se mostrou com a menor emissão dentre todas as soluções, comportamento semelhante ao apresentado pelo algoritmo genético. As vigas secundárias representaram grande parte da emissão total da estrutura ficando sempre acima dos 26% na maioria das soluções. As exceções podem ser observadas nos f_{ck} de 20 e 30 MPa em que a fôrma de *steel deck* é o material que mais emite. Além disso, esse comportamento também pode ser visto na solução de 45 MPa (solução que obteve a

maior emissão dentre todas) na qual o concreto se mostrou como o material que mais emitiu a dentre todos.

A Figura 40 e 41 apresentam a análise das restrições das soluções otimizadas obtidas para os diferentes valores de f_{ck} em relação aos ELU das vigas e dos pilares para o algoritmo genético e *PSO*, respectivamente.

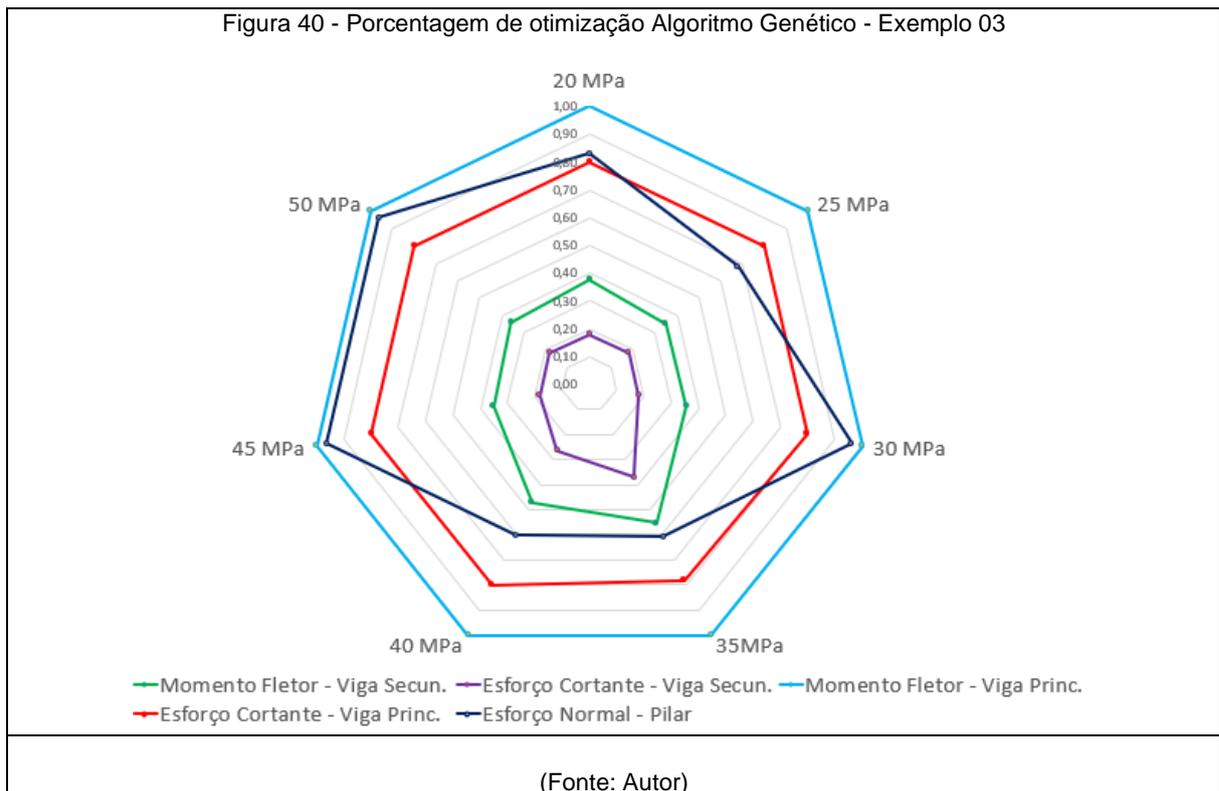
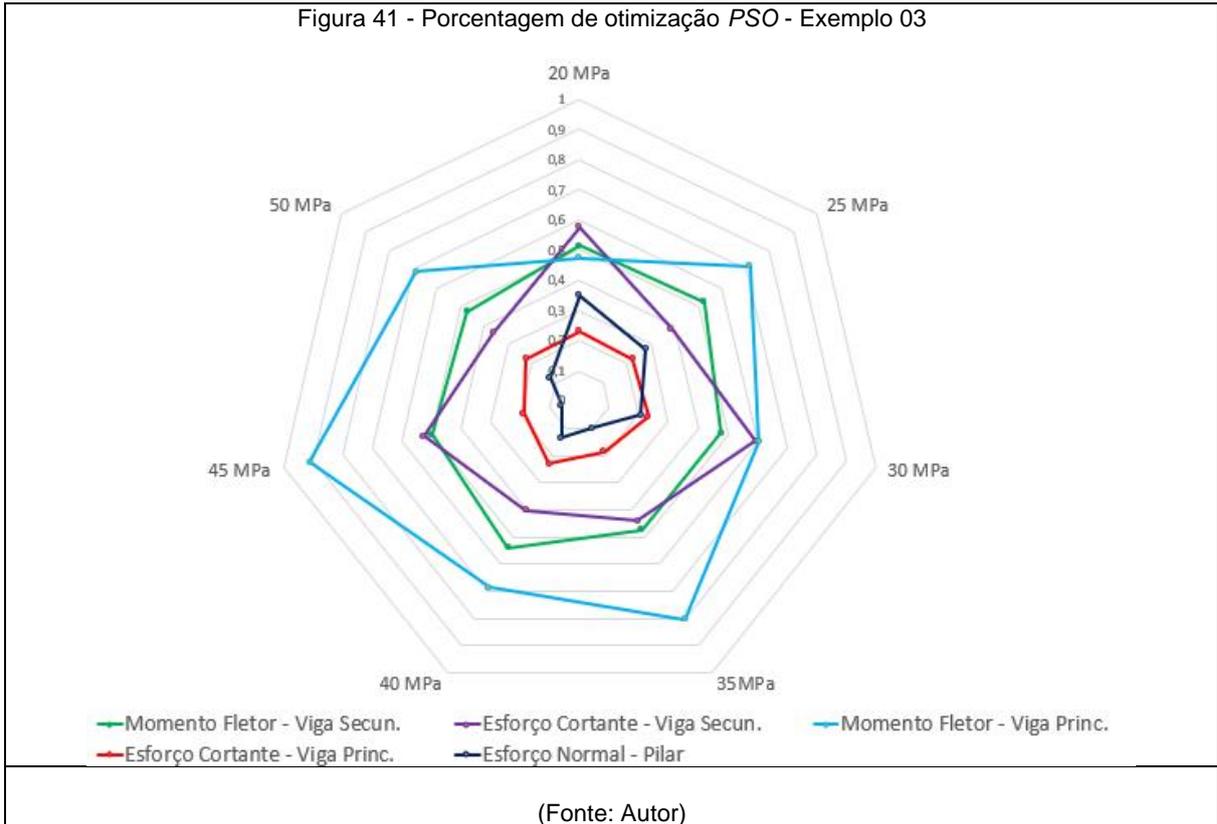


Figura 41 - Porcentagem de otimização PSO - Exemplo 03



Pela análise da Figura 40 é possível notar que o momento fletor da viga principal foi o que obteve a maior porcentagem de otimização dentre todos os estados limites calculados, além dele o esforço normal no qual os pilares estavam submetidos apresentaram altas otimizações, chegando a quase 100% nas soluções de 30, 45 e 50 MPa. As solicitações das vigas secundária se mostraram substancialmente menores, com otimizações de cerca de 60% e 40% para o momento fletor e esforço cortante, respectivamente, ambas na solução de 35 MPa.

A Figura 41, que mostra a otimização das restrições pela otimização por enxame de partículas, mostra o momento fletor das vigas principais como estado limite último com maior otimização, mas em nenhuma das soluções ele foi otimizado por completo, chegando a um valor máximo de 91% na solução de 45 MPa. As restrições ligadas às características das vigas secundárias apresentaram, de forma geral, uma melhor otimização que os pilares e o esforço cortante das vigas principais, além disso na solução de 30 MPa a otimização das vigas secundárias se igualou à otimização do momento fletor da viga principal e em 50 MPa o esforço

cortante das vigas secundárias também alcançou o valor máximo de otimização da solução.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

Foram apresentados 03 exemplos além de um teste de convergência para verificar a capacidade dos algoritmos de encontrar o mínimo global do espaço amostral da solução partindo de locais aleatórios. Em relação às análises originalmente realizadas nos problemas ambos os algoritmos utilizados neste trabalho apresentaram uma melhoria na solução que leva em conta o impacto ambiental. A principal comparação que pode ser feita é na eficiência de cada algoritmo na “busca” pela solução ótima. Nesse sentido, a otimização por enxame de partículas (*PSO*) apresentou soluções com menor impacto ambiental que o algoritmo genético, dessa forma o *PSO* mostrou-se mais eficiente que o algoritmo genético nestes exemplos de pórtico misto.

No que diz respeito ao teste de convergência, foi observado uma alta convergência (pelo menos 88%) para a solução ótima em ambos os algoritmos. O algoritmo genético apresentou uma maior convergência para a solução ótima, 94% contra 88% apresentada pelo *PSO* além disso também houve uma menor quantidade de soluções o algoritmo genético apresentou 2 soluções e o *PSO* apresentou 7. O *PSO* por outro lado apresentou soluções com menor emissão que o algoritmo genético em 90% das vezes o que aumenta a confiabilidade deste algoritmo. Percebeu-se em resumo que o algoritmo genético apresenta uma menor variação nas soluções, convergindo rapidamente ao “mínimo absoluto” e que o *PSO* apresenta soluções melhores e mais eficientes econômica e energeticamente.

Na primeira análise do primeiro exemplo numérico, foi observado uma pequena melhora na utilização de ambos os algoritmos em relação ao *PDO* proposto no estudo inicial. As soluções ótimas apresentaram sempre uma maior espessura da laje de concreto do que a proposta por Poitras, Cormier e Nabolle (2018).

No segundo exemplo, foi possível ver uma grande diferença entre a quantidade de vigas secundárias. Enquanto a solução proposta por Poitras, Lafrançois e Comier (2011) apresentou as vigas secundárias na direção do maior vão, o algoritmo genético e a otimização por enxame de partículas dispuseram as vigas secundárias na direção do menor vão. Essa mudança refletiu na espessura da laje de concreto

além da redução na massa linear dos perfis secundários. Foi notado que neste exemplo o *PSO* tem uma tendência a escolher as soluções ótimas com menos vigas secundárias que as apresentadas pelo algoritmo genético.

O terceiro e último exemplo, foi a laje mista apresentada no livro de Fakury, Silva e Caldas (2016). No problema inicial, foi realizado apenas o dimensionamento da estrutura, sem a otimização dos elementos. Quando é analisado separadamente cada elemento da otimização no algoritmo genético, percebe-se que a laje de concreto apresentou um aumento, quase que constante, na representação do total da emissão à medida que a resistência característica à compressão do concreto aumentava. Esse comportamento se repetiu no *PSO* em parte. Além das análises já realizada, mostra-se bem claro que a otimização dos elementos estruturais deste trabalho apresentou uma emissão substancialmente menor que a encontrada pelos autores do livro.

Em linhas gerais, foi verificado em todos os exemplos que as soluções ótimas representavam sempre a solução na qual o concreto representava a menor porção de emissão dentre todas as emissões analisadas. Além disso, a forma de *steel deck* e as vigas secundárias sempre se apresentaram como os elementos que mais emitiram em comparação aos outros elementos otimizados. Nos estados limites últimos foi verificado que a flexão da viga principal se mostrou quase sempre com uma máxima otimização. A otimização do esforço normal nos pilares se mostrou como a segunda maior otimização especialmente nas soluções apresentadas pela otimização por enxame de partículas enquanto que no algoritmo genético o esforço cortante nas vigas principais se mostrou como o segundo ELU mais otimizado.

Apesar da otimização estrutural se mostrar muito eficiente com a utilização de algoritmos meta-heurísticos, percebe-se que não há muitos estudos com o desenvolvimento da otimização estrutural considerando os impactos ambientais como a principal função objetivo do problema.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas limitações podem ser pontuadas em relação ao funcionamento da rotina de otimização do pórtico misto, com isso é possível apontar alguns parâmetros que podem ser modificados para uma continuação da pesquisa em trabalhos futuros.

A ligação rígida entre os pilares e as vigas principais se mostram como um parâmetro a ser realizado no futuro na rotina de otimização.

Além disso, há as limitações dos comprimentos que uma laje pode ter sendo apoiada por quatro pilares, dessa forma seria interessante também a implementação de outras faixas de laje exatamente para suportar maiores vãos, com isso aconteceria o aumento do número de pilares de forma automática para a sustentação dessas lajes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALVES, E.C.; RAMOS, J.R. Numerical analysis of collapse modes in optimized design of alveolar Steel-concrete composite beams via genetic algorithms. **REM-International Engineering Journal**, v. 74, p. 173-181, 2021.
- [2] ANDERSSON, G.; PONZIO, A.; GAUFFIN, A.; AXELSON, H.; NILSON, G. Sustainable steel production—Swedish initiative to “close the loop”. **Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy**, 126(1–2), pp. 81–88, 2017.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. ABNT NBR 6120:2017. Rio de Janeiro.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. ABNT NBR 8800:2008. Rio de Janeiro.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Gestão ambiental-avaliação do ciclo de vida-princípio e estrutura. ABNT NBR ISO 14040, 2009.
- [6] ARPINI, P.; ALVES, E., Environmental Impact and Cost Analysis on the Optimum Design of Composite Frame System. In: **XLII Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering Congress**. 2021
- [7] ARPINI, P. A. T.; LOUREIRO, M. C.; BREDÁ, B. D.; CALENZANI, A. F. e ALVES, É. C. Optimum design of a composite floor system considering environmental and economic impacts. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 15, 2022.
- [8] BARAN, E.; TOPKAYA, C. An experimental study on channel type shear connectors. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 74, p. 108-117, 2012.
- [9] BARBOSA, H.; LEMONGE, A.C.C. An adaptive penalty method for genetic algorithms in constrained optimization problems. **INTECH Open Access Publisher**, 2008.
- [10] BAKHSHPOORI, T.; KAVEH, A. A new metaheuristic for continuous structural optimization: water evaporation optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 54, n. 1, p. 23-43, 2016.
- [11] BEHNAM, A. F.; KAVEH, A. Cost optimization of a composite floor system, one-way waffle slab, and concrete slab formwork using a charged system search algorithm. **Scientia Iranica**, v. 19, n. 3, p. 410-416, 2012.
- [12] BREDÁ, B.D.; PIETRALONGA; T.C. e ALVES, E.C. (2020), Optimization of the structural system with composite beam and composite slab using Genetic Algorithm, **IBRACON Structures and Materials Journal**, vol. 13, no.6, 2020.
- [13] CAMP, C. V.; HUQ, F. CO₂ and cost optimization of reinforced concrete frames using a big bang-big crunch algorithm. **Engineering Structures**, v. 48, p. 363-372, 2013.
- [14] CANAM. *Steel Deck Catalogue*, 2006.

- [15] CARVALHO, J. P.; LEMONGE, A. C.; CARVALHO, É. C.; HALLAK, P. H.; e BERNARDINO, H. S. Truss optimization with multiple frequency constraints and automatic member grouping. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 57, n. 2, p. 547-577, 2018.
- [16] CRISINEL, M.; MARIMON, F. A new simplified method for the design of composite slabs. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 60, n. 3-5, p. 481-491, 2004.
- [17] DEGERTEKIN, S. O. Optimum design of steel frames using harmony search algorithm. **Structural and multidisciplinary optimization**, v. 36, n. 4, p. 393-401, 2008.
- [18] DE LAZZARI, J. A.; ALVES, É. C.; CALENZANI, A.F.G. Dimensionamento otimizado de pórticos em estruturas de aço via algoritmos genéticos. **Revista da Estrutura de Aço – REA**. v. 9, n. 1, p. 101-121, 2020.
- [19] DE MEDEIROS, G. F.; KRIPKA, M. Algumas aplicações de métodos heurísticos na otimização de estruturas. **Revista CIATEC-UPF**, v. 4, n. 1, p. 19-32, 2012.
- [20] DE MIRANDA, Márcio Nunes. Algoritmos genéticos: fundamentos e aplicações. 2007.
- [21] DI CESARE, N.; DOMASZEWSKI, M. A new hybrid topology optimization method based on I-PR-PSO and ESO. Application to continuum structural mechanics. **Computers & Structures**, v. 212, p. 311-326, 2019
- [22] DORIGO, M.; DI CARO, G. Ant colony optimization: a new meta-heuristic. In: **Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)**. IEEE, 1999. p. 1470-1477.
- [23] EBERHART, R. C.; SHI, Y. Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization. In: **International conference on evolutionary programming**. Springer, Berlin, Heidelberg, 1998. p. 611-616.
- [24] ECOINVENT. Selected Database: version 3.6 (2019). Ecoinvent Association. Disponível em: <<https://v36.ecoquery.ecoinvent.org/Home/Index>> Acesso em: 04.jul.2021.
- [25] ERDAL, F.; TUNCA, O.; OZCELIK, R. Experimental investigation and numerical analysis of optimally designed composite beams with corrugated steel webs. **Steel and Composite Structures**, v. 37, n. 1, p. 1-14, 2020.
- [26] EROL, O. K.; EKSIN, I. A new optimization method: big bang–big crunch. **Advances in Engineering Software**, v. 37, n. 2, p. 106-111, 2006.
- [27] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures. EN 1994-1-1. 2004. Brussels.
- [28] FAKURY, R. H.; CASTRO E SILVA, A. L. R.; CALDAS, R. B. Dimensionamento de estruturas de aço em mistas de aço e concreto. 2016.
- [29] FAVARATO, L. F.; CALENZANI, A. F. G.; PIRES, J. C. V.; JUNGES, E. e FERRARETO, J. A. (2019). Evaluation of the resistance of trussed slabs with steel formwork in cold formed U profile. **Latin American Journal of Solids and Structures**, 16.
- [30] FLOWER, David JM; SANJAYAN, Jay G. Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture. **The international Journal of life cycle assessment**, v. 12, n. 5, p. 282, 2007.

- [31] FUZIHARA, M. A. L. D. S. **Ligações e armaduras de lajes em vigas mistas de aço e de concreto**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- [32] GANDOMI, A. H., YANG, X. S., TALATAHARI, S., ALAVI, A. H. Metaheuristic algorithms in modeling and optimization. **Metaheuristic applications in structures and infrastructures**, p. 1-24, 2013.
- [33] GARCÍA-SEGURA, T.; YEPES, V. Multiobjective optimization of post-tensioned concrete box-girder road bridges considering cost, CO₂ emissions, and safety. **Engineering Structures**, v. 125, p. 325-336, 2016.
- [34] GEEM, Z. W.; KIM, J. H.; LOGANATHAN, G. V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search. **Simulation**, v. 76, n. 2, p. 60-68, 2001.
- [35] GEORGE, L. F. Inteligência Artificial: estruturas e estratégias para a solução de problemas completos. 4ed, Porto Alegre, 2002.
- [36] GERDAU. Perfis Estruturais Gerdau - Tabela Gerdau. 2017
- [37] GUO, Y. T., TAO, M. X., NIE, X., QIU, S. Y., TANG, L., e FAN, J. S. Experimental and theoretical studies on the shear resistance of steel–concrete–steel composite structures with bidirectional steel webs. **Journal of Structural Engineering**, v. 144, n. 10, p. 04018172, 2018.
- [38] HASANÇEBI, O.; ERDAL, F.; SAKA, M. P. Adaptive harmony search method for structural optimization. **Journal of Structural Engineering**, v. 136, n. 4, p. 419-431, 2010.
- [39] HOLLAND, J. H. Outline for a logical theory of adaptive systems, **Journal of the Association for Computing Machinery**, vol. 3, 1962, pp.297-314.
- [40] INSTITUTO AÇO BRASIL. Relatório de sustentabilidade - 2019. 2019.
- [41] ISO 9692-1. Welding and allied processes-Types of joint preparation-Part 1: Manual metal arc welding, gas-shielded metal arc welding, gas welding, TIG welding and beam welding of steels. International Organization for Standardization. Suíça, 2013.
- [42] JIA, P.; ZHAO, P.; GUAN W.; YONGPING D.; WANG J.; CHENG Q. Experimental study on the flexural behavior of steel tube slab composite beams and key parameters optimization. **Advances in Structural Engineering**, v. 22, n. 11, p. 2476-2489, 2019.
- [43] JIANG, Z.; LIN, Q.; SHI, K. e PAN, W. A novel PGSA–PSO hybrid algorithm for structural optimization. **Engineering Computations**, 2019
- [44] JOHNSON, R.P.; CHEN S. *Local Bickling and moment redistribution in clas 2 composite beams*. **Structural Engineering**, p. 27-34. 1994.
- [45] KAVEH, A. **Advances in metaheuristic algorithms for optimal design of structures**. Switzerland: Springer International Publishing, 2014.
- [46] KAVEH, A.; IZADIFARD, R. A.; MOTTAGHI, L. Optimal design of planar RC frames considering CO₂ emissions using ECBO, EVPS and PSO metaheuristic algorithms. **Journal of Building Engineering**, v. 28, p. 101014, 2020.
- [47] KAVEH, A.; TALATAHARI, S. A hybrid CSS and PSO algorithm for optimal design of structures. **Structural Engineering and Mechanics**, v. 42, n. 6, p. 783-797, 2012.

- [48] KAVEH, A.; ZOLGHADR, A. Democratic PSO for truss layout and size optimization with frequency constraints. **Computers & Structures**, v. 130, p. 10-21, 2014.
- [49] KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks. IEEE, 1995. p. 1942-1948.
- [50] KRIPKA, M.; DE MEDEIROS, G. F. Optimization of reinforced concrete columns according to different environmental impact assessment parameters. **Engineering Structures**, v. 59, p. 185-194, 2014.
- [51] LAGAROS, N. D. The environmental and economic impact of structural optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 58, n. 4, p. 1751-1768, 2018.
- [52] LANIKOVA, I.; ŠTĚPÁNEK, P.; SIMŮNEK, P. Optimized design of concrete structures considering environmental aspects. **Advances in Structural Engineering**, v. 17, n. 4, p. 495-511, 2014.
- [53] LI, F. A. N.; QIE, S. B. Z.; WU, T. C. X. e, GAO, F. D. P.A method based on PSO-RBF to the optimization of dam structure. In: **2011 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)**. IEEE, 2011. p. 1846-1850.
- [54] MALITE, M.; NIMIR, W. A. Sobre o cálculo de vigas mistas aco-concreto: enfase em edifícios. 1990. Universidade de São Paulo, Sao Carlos, 1990.
- [55] MARCHIORI, I. N.; MEIRELLES, G.; BRENTAN, B. M.; LUVIZOTTO JR, E. e IZQUIERDO, J. Avaliação de funções de penalização para o dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água. In: **Congresso de métodos numéricos em Ingeniería, Valencia, Espanha**. 2017.
- [56] MATLAB®. Guia do usuário R2016a. The Math Works Inc, 2016.
- [57] METFORM. Plataforma de aço Metform. Manual técnico: especificações para projeto, manuseio e montagem de *steel deck*. 2006
- [58] METFORM. Catálogo de *Steel deck* de aço. 2006
- [59] MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE; Acordo de Paris. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/images/arquivos/clima/convencao/indc/Acordo_Paris.pdf>. Acesso em: 29/09/2020.
- [60] MS Estruturas Metálicas (2020). Disponível em: <<https://rms-estruturas-metalicas.webnode.com.pt/news/steel-deck/>>
- [61] PAYA-ZAFORTEZA, I., YEPES, V., HOSPITALER, A. e GONZÁLEZ-VIDOSA, F. CO₂-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing”, **Engineering Structures**, v. 31, n.7, p. 1501–1508. 2009.
- [62] PEREZ, R. I.; BEHDINAN, K. Particle swarm approach for structural design optimization. **Computers & Structures**, v. 85, n. 19-20, p. 1579-1588, 2007.
- [63] PFEIL, W.; PFEIL, M. Estruturas de Aço-Dimensionamento Prático de Acordo com a ABNT NBR 8800: 2008. Editora LTC, 8ª. Edição, Rio de Janeiro, 2009.

- [64] PLEVRIS, V.; PAPADRAKAKIS, M. A hybrid particle swarm—gradient algorithm for global structural optimization. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 26, n. 1, p. 48-68, 2011.
- [65] POITRAS, G. L.; CORMIER, G.; NABOLLE, A. Novel Optimization Algorithm for Composite *Steel Deck* Floor Systems: Peloton Dynamics Optimization (PDO). In: **Canadian Society for Civil Engineering annual conference**, 2018.
- [66] POITRAS, G. L.; LEFRANÇOIS, G.; e CORMIER, G. Optimization of steel floor systems using particle swarm optimization. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, n. 8, p. 1225-1231, 2011.
- [67] POLI, R. Analysis of the publications on the applications of particle swarm optimization. **Journal of Artificial Evolution and Applications**, v. 2008, 2008.
- [68] QUEIROZ, G.; GONZAGA, L. G. D. M.; PIMENTA, R. J.; FAKURY, R. H. e RODRIGUES, F. C. Flambagem lateral com torção em vigas com perfis de alma senoidal. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 60, p. 333-340, 2007.
- [69] QUEIROZ, G.; PIRES, V. H. S. Automação do cálculo de vigas mistas semicontínuas incluindo ligações mistas. In: **Congresso de Engenharia Civil**, 5., 2002, Juiz de Fora. UFJF, 2002.
- [70] RAMOS, J. R. S.; ALVES, É. C. Análise numérica dos modos de colapso no dimensionamento otimizado de vigas mistas celulares. **Revista da Estrutura de Aço – REA**. v. 9, n. 2, p. 222-240, 2020.
- [71] RATNAWEERA, A.; HALGAMUGE, S. K.; WATSON, H. C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients. **IEEE Transactions on evolutionary computation**, v. 8, n. 3, p. 240-255, 2004.
- [72] RIBEIRO, J.L.D.; CATEN, C.T.S. Série monográfica qualidade: projeto de experimentos. **Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre**, 2011.
- [73] SANTORO, J.F.; KRIPKA, M. (2020), Minimizing environmental impact from optimized sizing of reinforced concrete elements. **Computers and Concrete**. 25(2), 111–118.
- [74] SENOUCI, A. B.; AL-ANSARI, M. S. Cost optimization of composite beams using genetic algorithms. **Advances in Engineering Software**, v. 40, n. 11, p. 1112-1118, 2009.
- [75] SHARIATI, M.; MAFIPOUR, M. S.; MEHRABI, P.; ZANDI, Y.; DEGHANI, D.; BAHADORI, A. e POI-NGIAN, S. Application of Extreme Learning Machine (ELM) and Genetic Programming (GP) to design steel-concrete composite floor systems at elevated temperatures. **Steel and Composite Structures**, v. 33, n. 3, p. 319-332, 2019.
- [76] SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (2022). Custo das composições - sintético - ES. Março / 2022.
- [77] SPROESSER G.; CHANG Y.J.; PITTNER A.; FINKBEINER M. e RETHMEIER M. Life Cycle Assessment of welding technologies for thick metal plate welds. **Journal of Cleaner Production**, v.108, part A, p.46-53, 2015.

- [78] TELES, M. L.; GOMES, H. M. Comparação de algoritmos genéticos e programação quadrática sequencial para otimização de problemas em engenharia. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, v. 10, n. 15, p. 29-39, 2010.
- [79] THOMAZ, E. C. S.; CARNEIRO, L. A. V. Concretos de alta resistência: tendências das composições. 2010.
- [80] TORMEN, A. F.; PRAVIA, Z. M. C.; RAMIRES, F. B. e KRIPKA, M. Optimization of steel-concrete composite beams considering cost and environmental impact. **Steel and Composite Structures**, v. 34, n. 3, p. 409-421, 2020.
- [81] TRELEA, I. C. The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection. **Information processing letters**, v. 85, n. 6, p. 317-325, 2003.
- [82] WBCSD – World Business Council for Sustainable Development. **Cement Technology Roadmap 2009**. Carbon emissions reductions up to 2050. 2009.
- [83] Worldsteel Association, *LCI data for steel products*, 2019.
- [84] YANG, X.; GANDOMI, A. H. Bat algorithm: a novel approach for global engineering optimization. **Engineering computations**, 2012.
- [85] YEO, D.; POTRA, F. A. Sustainable design of reinforced concrete structures through CO₂ emission optimization. **Journal of structural engineering**, v. 141, n. 3, p. B4014002, 2015.
- [86] ZULA, T.; KRAVANJA, S.; KLANSEK, U. MINLP optimization of a composite I beam floor system. **Steel and composite structures**, v. 22, n. 5, p. 1163-1192, 2016.