

DESENVOLVIMENTO DE UM GUINDASTE HIDRÁULICO COM OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL ATRAVÉS DE ALGORITMO GENÉTICO

José Lucas Ferreira Batista, jlucasfb@gmail.com¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, jlucasfb@gmail.com

Resumo. Este trabalho descreve a aplicação de um algoritmo genético em conjunto com os cálculos de estática e resistência dos materiais de forma a criar uma rotina capaz de dimensionar todos componentes mecânicos de um guindaste hidráulico de acordo com requisitos de carga e posição solicitados. O código escrito em python realiza os cálculos para dimensões aleatórias e através da avaliação de aptidão e geração de descendentes encontra uma configuração ótima. Os resultados obtidos mostraram a flexibilidade do algoritmo para ser expandido ou modificado de acordo com quais características são consideradas mais relevantes como pressão hidráulica ou peso total.

Palavras chave: Resistência dos materiais. Estática. Algoritmo genético, Python, Sistema Hidráulico

Abstract. This work shows the application of a genetic algorithm that incorporate statics and mechanics of materials equations to design a hydraulic crane according to requirements of load and position. The code written in python solves those equations starting from random dimensions and evaluate the fitness of each design, generating new ones based on mating the setups found to be best fitted and creating new children designs to be evaluated looking for an optimal solution. The results obtained shows the flexibility of the code to be expanded or modified according to with characteristics are seem as most relevant such as less hydraulic pressure or total weight.

Keywords: Mechanics of Materials, Statics, Genetic algorithm, Python, Hydraulics

1. INTRODUÇÃO

Projetos de engenharia mecânica visam construir máquinas e estruturas que são confiáveis e robustas com o menor custo possível. Estes projetos são dimensionados por meio de métodos que buscam melhor utilizar os recursos disponíveis e com fatores de segurança bem definidos. Entretanto ao aumentar quantidade de componentes em uma estrutura são adicionadas cada vez mais variáveis no problema de modo que é virtualmente impossível para um ser humano encontrar através de cálculos manuais um resultado ótimo.

Com a evolução de sistemas informatizados, o custo de processamento computadorizado não para de diminuir. Isso favorece a engenharia na área de otimização multidisciplinar, permitindo a aplicação de novas ferramentas que necessitam de computação intensiva como simulações numéricas e mais recentemente inteligência artificial.

Este trabalho é derivado de um projeto para a disciplina de desenho de máquinas do CEFET/RJ. A tarefa era projetar um guindaste hidráulico capaz de suspender uma massa de 500kg e posicioná-la na caçamba de uma picape. Para dimensionar o sistema, o autor criou um algoritmo genético que foi capaz de dimensionar a estrutura de forma a minimizar o gasto com material e minimizar as forças no sistema, utilizando assim, o poder de processamento computacional para a solução do problema.

2. METODOLOGIA

O procedimento para a criação do programa consistiu na parametrização dos componentes e codificação das equações referentes ao equilíbrio estático e de resistência de materiais e posterior desenvolvimento automatizado.

No projeto conceitual foram definidas as restrições do problema dadas pelo professor da turma e foram elaborados os croquis baseados nas dimensões do ambiente em que o guincho deveria ser capaz de operar. A Fig. 1 ilustra a operação do guindaste.

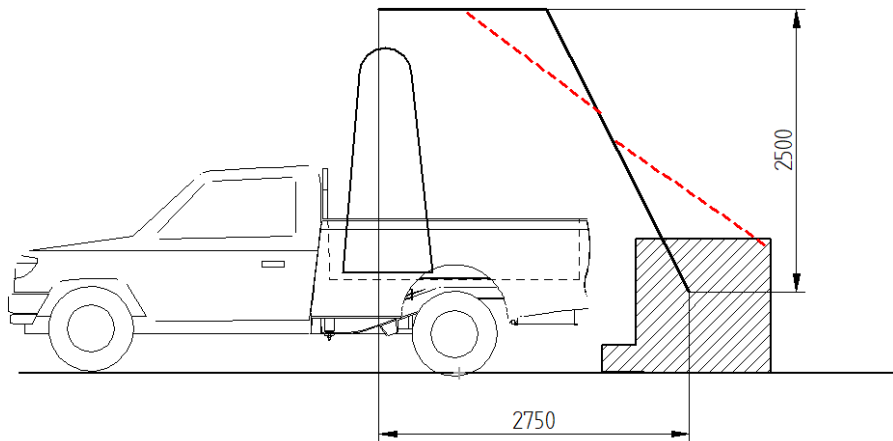


Figura 1. Esboço com dimensões alvo. O equipamento deveria ser capaz de içar a carga de um pedestal de altura de 800mm e posicioná-la na caçamba de uma caminhonete o mais próximo possível da cabine (Elaboração própria)

As dimensões do dispositivo foram parametrizadas visando a solução numérica pelo algoritmo, sem a necessidade de interferência humana. O dimensionamento, as equações de equilíbrio e o cálculo de tensões são todos realizados pelo programa escrito na linguagem de programação Python. O algoritmo genético simulará uma seleção natural no qual uma estrutura se mostrará mais apta para as condições desejadas. O resultado estará dimensionado de acordo com a massa da carga a ser içada e com o fator de segurança desejado.

3. PARAMETRIZAÇÃO

Cada ponto foi parametrizado em função dos ângulos θ_A e θ_E , que representam a inclinação referente ao solo do braço ABDE e EFG, respectivamente. Seus comprimentos são definidos pela distância entre as juntas pinadas, que foram nomeadas de A até G. A coordenada da junta A foi fixada em (0,0) e a junta C tem posição dada por (C_x, C_y) como demonstrado na Fig. 2.

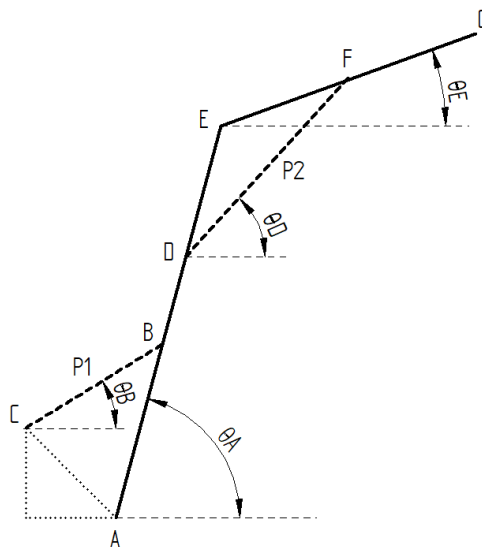


Figura 2. Diagrama de barras do sistema, linhas tracejadas representam os atuadores hidráulicos (Elaboração própria)

As equações de parametrização são definidas a seguir

$$\overline{AC} = \sqrt{C_x^2 + C_y^2} \tag{1}$$

$$\theta_C = \arccos(C_x/\overline{AC}) - \theta_A \quad (2)$$

$$\overline{BC} = \sqrt{\overline{AB}^2 + \overline{AC}^2 - 2 \cdot \overline{AB} \cdot \overline{AC} \cdot \cos(\theta_C)} \quad (3)$$

$$\overline{AE} = \overline{AB} + \overline{BD} + \overline{DE} \quad (4)$$

$$\theta_B = \arcsin(\overline{AB} \cdot \sin(\theta_C) / \overline{BC} - (180^\circ - \theta_C + \theta_A)) \quad (5)$$

$$\overline{EG} = \overline{EF} + \overline{FG} \quad (6)$$

$$\overline{DF} = \sqrt{(\overline{DE} \cdot \cos(\theta_A) + \overline{EF} \cdot \cos(\theta_E))^2 + (\overline{DE} \cdot \sin(\theta_A) + \overline{EF} \cdot \sin(\theta_E))^2} \quad (7)$$

$$\theta_D = \arccos\left(\frac{(\overline{DE} \cdot \cos(\theta_A) + \overline{EF} \cdot \cos(\theta_E))}{\overline{DF}}\right) \quad (8)$$

$$G_x = \overline{AE} \cdot \cos(\theta_A) + \overline{EG} \cdot \cos(\theta_E) \quad (9)$$

$$G_y = \overline{AE} \cdot \sin(\theta_A) + \overline{EG} \cdot \sin(\theta_E) \quad (10)$$

3.1 Equilíbrio estático

Para tornar o modelo mais próximo da realidade, todas as juntas estão deslocadas do centro da viga de acordo com a Fig. 3. A aplicação de uma força descentralizada pode ser decomposta em uma força normal e um momento fletor que incidem no eixo de simetria (HIBBELER, 2011).

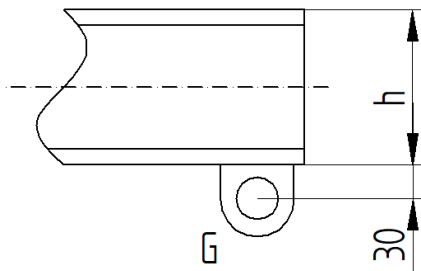


Figura 3. Detalhe da junta G, todas as juntas pinadas estão deslocadas por uma distância $d = h/2 + 30\text{mm}$ da linha de centro da viga, sendo h a altura da viga. (Elaboração própria)

Foi utilizado o método descrito por Hibbeler (2011), que desmonta a estrutura e resolve o equilíbrio de cada elemento individualmente. O diagrama de corpo livre das vigas na Fig.4 exibe a transformação das forças excêntricas em uma força agindo no eixo de simetria da viga e a criação um momento proporcional à distância da linha de centro (Eq.12 a 13).

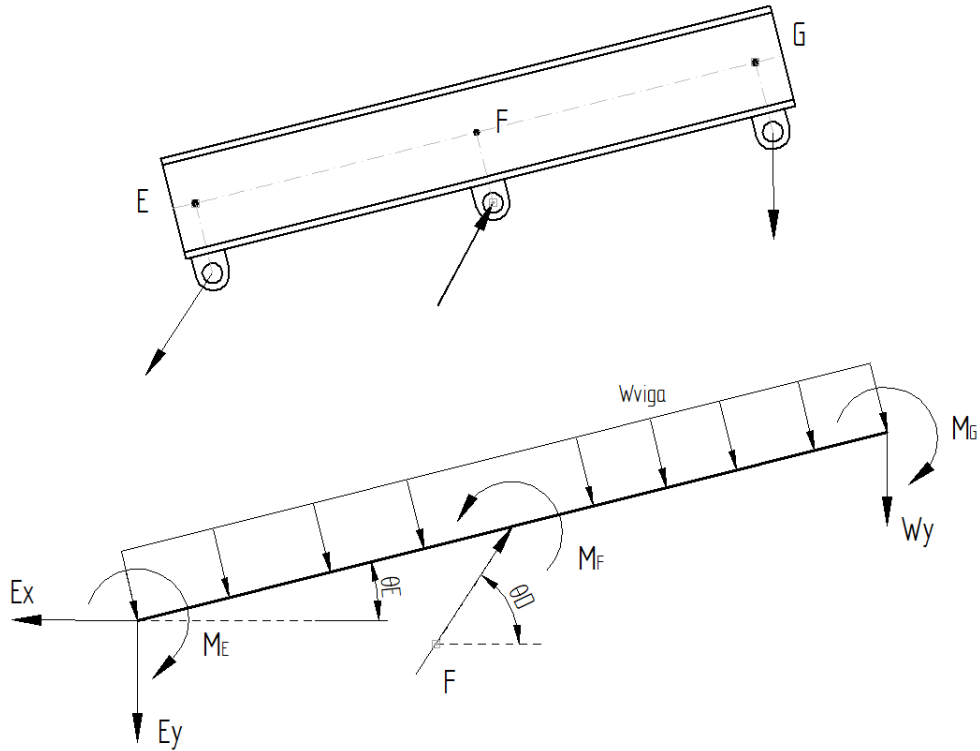


Figura 4. Diagrama de corpo livre da viga EFG (Elaboração própria)

O braço superior é composto pelas juntas E, F e G, sendo G o ponto onde há um gancho responsável por sustentar a carga W. A partir das três equações de equilíbrio, n, n e n,

$$\Sigma fx: -E_x + F \cos(\theta_D) = 0 \tag{11}$$

$$\Sigma fy: -E_y + F \sin(\theta_D) - W - W_{viga} = 0 \tag{12}$$

$$\Sigma M_E: F \sin(\theta_D - \theta_E) (\overline{EF} + d) - W(\overline{EG} \cos(\theta_E) + d \sin(\theta_E)) - d(E_x \cos(\theta_E) - E_y \sin(\theta_E)) \tag{13}$$

$$-W_{viga} \frac{\cos(\theta_E) \overline{EG}}{2} = 0$$

podemos substituir as Eq. 11 e 12 em 13 e resolver para F obtendo a Eq. 14.

$$F = \frac{W(\overline{EG} \cos(\theta_E) + d \sin(\theta_E)) + W_{viga} \left(\frac{\cos(\theta_E) \overline{EG}}{2} + d \cos(\theta_E) \right)}{\sin(\theta_D - \theta_E)(\overline{EF} + d) - d(\cos(\theta_D) \cos(\theta_E) + \sin(\theta_D) \sin(\theta_E))} \tag{14}$$

O mesmo procedimento é empregado na viga ABDE (Fig. 5), entretanto as reações nas juntas E e D, que já são conhecidas pela solução da viga EFG, tem mesmo módulo e sentidos opostos às reações presentes na junta E e F da viga EFG, respectivamente.

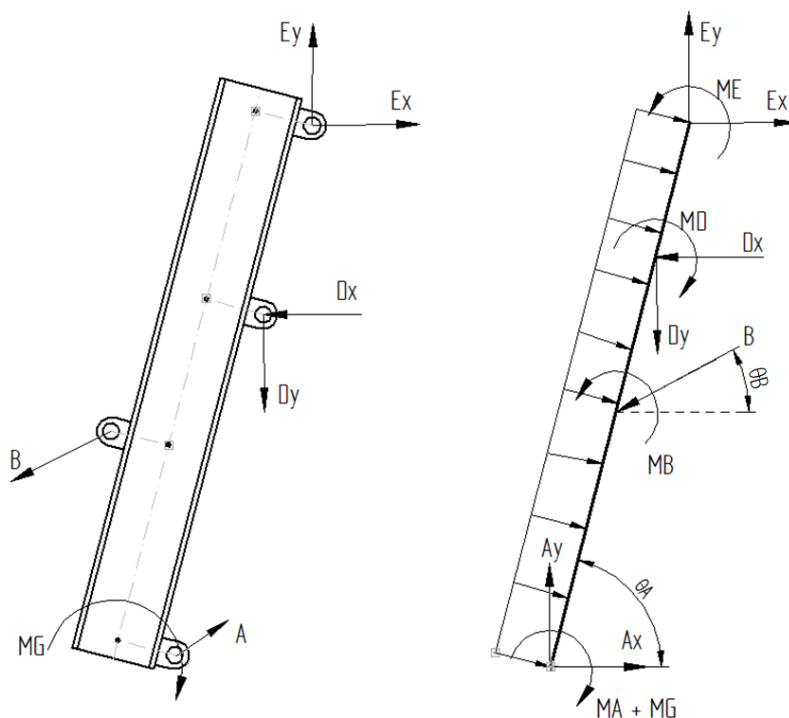


Figura 5. Diagrama de corpo livre da viga ABDE (Elaboração própria)

Das equações de equilíbrio

$$\sum f_x: A_x - B \cos(\theta_B) - D_x + E_x = 0 \quad (15)$$

$$\sum f_y: A_y - B \sin(\theta_D) - D_y + E_y - W_{viga} = 0 \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \sum M_A: & -d(A_x \cos(\theta_A) + A_y \sin(\theta_A)) + B(AB + d) \sin(\theta_A - \theta_B) + D_x(AD \sin(\theta_A) - d \cos(\theta_A)) - D_y(AD \cos(\theta_A) + \\ & d \sin(\theta_A)) + E_y(AE \cos(\theta_A) + d \sin(\theta_A)) + E_x(d \cos(\theta_A) - AE \sin(\theta_A)) - W(AE \cos(\theta_A) + EG \cos(\theta_E)) - \\ & W_{viga} \frac{AE}{2} \cos(\theta_A) \end{aligned} \quad (17)$$

Novamente, podemos substituir 15 e 16 em 17 e resolver para B

$$B = \frac{W(AE \cos(\theta_A) + EG \cos(\theta_E)) + W_{viga} \frac{AE}{2} \cos(\theta_A) + d \cos(\theta_A)(D_x - E_x) + d \sin(\theta_A)(-D_y + E_y - W_{viga})}{(AB + d) \sin(\theta_A - \theta_B) - d(\cos(\theta_B) \cos(\theta_A) - \sin(\theta_B) \sin(\theta_A))} \quad (18)$$

A partir da substituição de B e F nas equações de equilíbrio se obtém as reações nas juntas A e E. As reações encontradas estão num sistema de coordenadas alinhado com o eixo vertical e horizontal, deve-se aplicar as matrizes de rotação, Eq. 19 e 20, a fim de alinhar o vetor das forças com a viga (Fig .6).

$$Rot_A = \begin{bmatrix} \cos(\theta_A) & -\sin(\theta_A) \\ \sin(\theta_A) & \cos(\theta_A) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$Rot_E = \begin{bmatrix} \cos(\theta_E) & -\sin(\theta_E) \\ \sin(\theta_E) & \cos(\theta_E) \end{bmatrix} \quad (20)$$

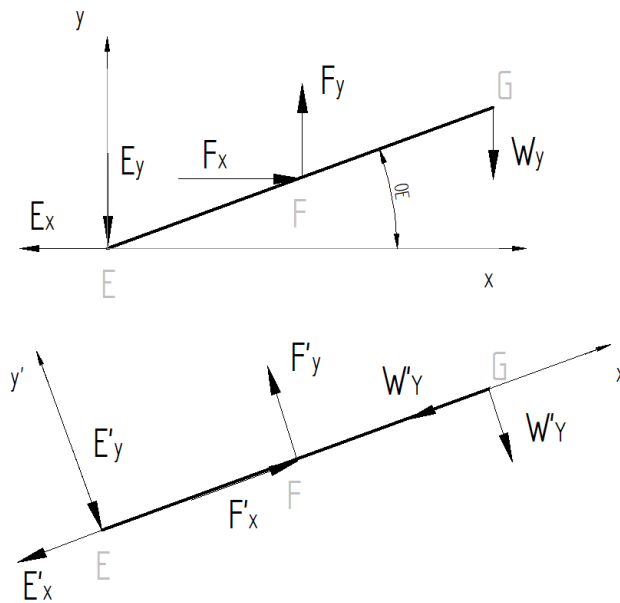


Figura 6. Rotação de eixos para alinhar as forças com a viga EFG por meio de multiplicação por Rot_E (elaboração própria)

3.2 Tensões

Pode-se analisar a distribuição de tensões por meio da força cortante, força normal e momento fletor atuantes para identificar as seções críticas. Foi empregado o princípio da superposição de cargas combinadas e tensão cisalhante foi considerada constante sobre a área da seção transversal da alma da viga (Hibbeler, 2010).

O material escolhido foi o Aço SAE 1020 que possui limite de escoamento $\sigma_y = 295\text{MPa}$ (ASM International, 1998). As equações para determinação das tensões estão na Tab. 1.

Tensão normal	Tensão de flexão	Tensão cisalhante
$\sigma_N = \frac{P}{A}$	$\sigma_M = -\frac{Mc}{I}$	$\tau = \frac{V}{A_{alma}}$

Tabela 1. Equações de tensão. É sabido que as tensões de flexão máximas ocorrem nas extremidades superior e inferior, logo σ_M foi avaliada somente para os valores $c = \frac{h}{2}$ ou $-\frac{h}{2}$. (Elaboração própria)

O critério de falha adotado foi da tensão equivalente de Von Mises (Hibbeler, 2010) que define que não há falha se a equação 21 é verdadeira,

$$\sigma_y > \sqrt{\left(\frac{\sigma_N + \sigma_M}{2}\right)^2 + 3\tau^2} \quad (21)$$

Foi adotado um fator de segurança de 2, conseqüentemente, a tensão admissível, σ_{adm} , é de 148MPa.

3. ALGORITMO GENÉTICO

A otimização estrutural de um projeto envolve encontrar as características dos componentes que proporcionam a melhor solução de acordo com objetivos pré-estabelecidos, como redução de massa, diminuição de custo, maior capacidade de carga etc. Algoritmos genéticos são um dos vários métodos disponíveis para esta tarefa. Este método foi escolhido por ser de fácil implementação e é possível visualizar a evolução da solução, evitando assim que o algoritmo seja uma caixa preta que apenas apresenta um resultado.

Um algoritmo genético gera indivíduos iniciais heterogêneos e simula uma seleção natural (Silva, 2005). Cada indivíduo representa uma configuração com características determinadas. Este conjunto de características é denominado genoma ou DNA, e cada característica é um cromossomo. Na Tab. 2 pode-se visualizar o genoma de um determinado elemento da primeira geração, criado randomicamente.

ID	AB	BD	DE	C _X	C _Y	EF	FG	$\theta_{A\max}$	$\theta_{E\max}$	Viga ABDE	Viga EFG
42	656	549	297	-550	495	786	782	65	5	W200x52,0	W200x31,3

Tabela 2. Genoma do indivíduo 42, possui o comprimento de cada segmento e coordenadas da junta C, em milímetros, as inclinações (em graus) necessárias para a localização da posição de G e as vigas utilizadas. (Elaboração própria)

Cada indivíduo é avaliado pelas suas características e classificado de acordo com sua performance utilizando a melhor viga disponível. A classificação é realizada por meio de uma função de aptidão que pontua positivamente determinadas características consideradas boas e pune as indesejadas. Quanto maior a pontuação final, melhor é aquela configuração de acordo com os parâmetros estabelecidos.

3.1 Função de Aptidão

Os parâmetros de avaliação são criados de acordo com os objetivos desejados. A análise do problema definiu que para a melhor operação de içamento, a extremidade de G deveria alcançar a posição $W = (2750, 2500)$, os atuadores hidráulicos deveriam ter um equilíbrio entre o seu comprimento e força aplicada e que não deveria haver deformação plástica nas vigas. Sete parâmetros foram desenvolvidos e estão listados no quadro abaixo.

Parâmetro	Função	Significado
a	$1 - \frac{P1_{L_n}}{\max(P1_L)}$	Comprimento do atuador 1 do indivíduo comparado com o maior atuador 1 da população
b	$1 - \frac{P2_{L_n}}{\max(P2_L)}$	Comprimento do atuador 2 do indivíduo comparado com o maior atuador 2 da população
c	$1 - \frac{F_{P1_n}}{\max(F_{P1})}$	Força necessária no atuador 1 do indivíduo comparado com a maior força no atuador 1 da população
d	$1 - \frac{ F_{P2_n} }{\max(F_{P2})}$	Força necessária no atuador 2 do indivíduo comparado com a maior força no atuador 2 da população
e	$1 - \left(\frac{ G_{x_n} - W_x }{W_x}\right)^2$	Diferença da coordenada G _X para W _X
f	$1 - \left(\frac{ G_{y_n} - W_y }{W_y}\right)^2$	Diferença da coordenada G _Y para W _Y
g	$1 - \frac{\sqrt{G_{x_n}^2 + G_{y_n}^2}}{\sqrt{W_x^2 + W_y^2}}$	Distância entre o alcance da junta G para a localização desejada W
k	0, se $\sigma_{eq} > \sigma_{adm}$, ou 1	Zera a pontuação se não há viga que resulte em tensão abaixo de σ_{adm}

Tabela 3. Parâmetros da função de aptidão, características teoricamente ideais são pontuadas com 1,0 e as piores com zero. (Elaboração própria)

Por fim, aptidão de um indivíduo (Eq. Y) é dada pela média ponderada das pontuações a até f multiplicadas por gk.

$$Fit(n) = gk \frac{(a+b+c+d+4e+4f)}{12} \quad (22)$$

3.2. Reprodução e renovação da população

Após a avaliação de todos os membros daquela população, uma nova geração é criada e avaliada com o cruzamento dos melhores e eliminação dos piores. O procedimento é repetido pela quantidade de vezes que for necessário até que se obtenha uma população que teoricamente é formada pelos membros ideais. O fluxograma na Fig. 7 define como ocorre essa mudança na população.

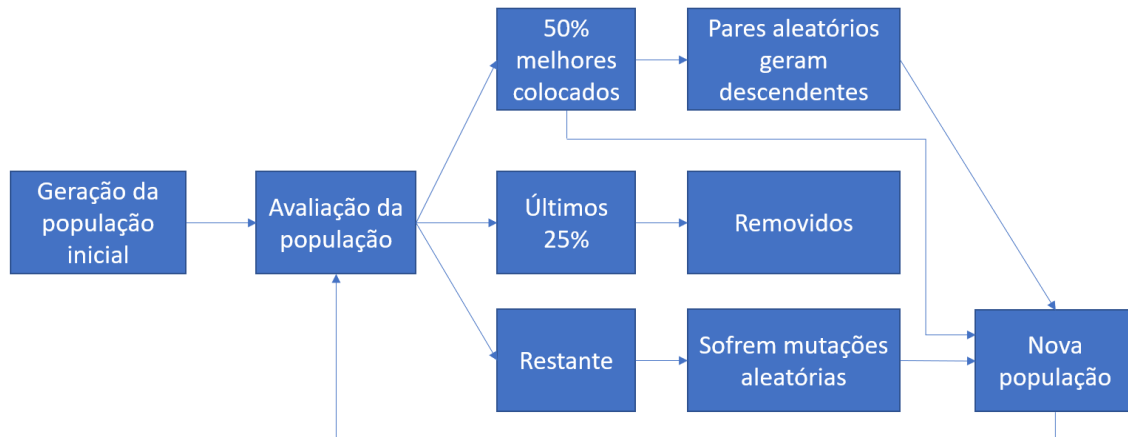


Figura 7. Definição de uma nova população (Elaboração própria)

A cada quatro gerações, quatro indivíduos extras entre os últimos colocados são removidos para que a população diminua. O DNA dos elementos provenientes de reprodução entre um par de indivíduos ocorre de acordo com a Eq. 24 aplicada a cada cromossomo, P é um número aleatório entre 0 e 1 gerado para cada gene de cada novo membro.

$$crom = P crom_{doador1} + (1 - P) crom_{doador2} \tag{24}$$

Nos elementos que sofrem uma mutação aleatória ocorre uma mudança de até 20% para mais ou para menos em três dos seus cromossomos sorteados ao acaso.

3.3. Solução

Após 60 gerações a população já havia convergido para um resultado em que todos os indivíduos tinham características que proporcionam o alcance das coordenadas do alvo Fig. 8.

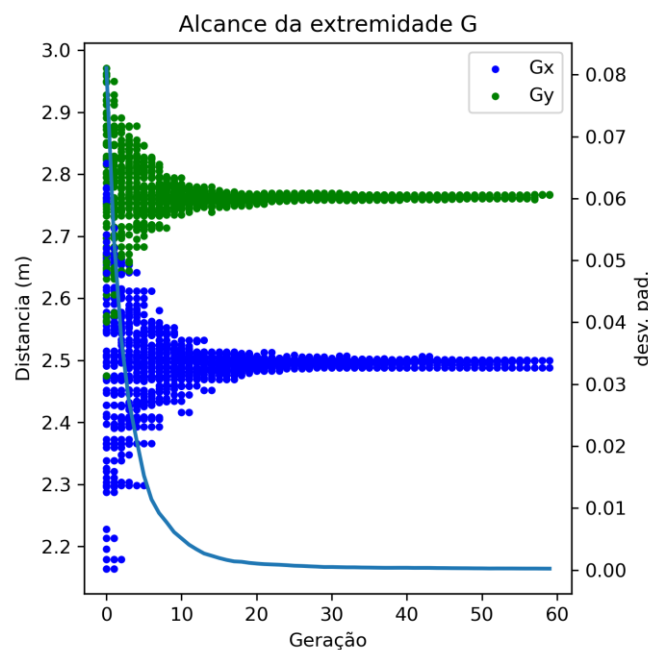


Figura 8. Convergência de (G_x, G_y) na direção do ponto (2750, 2500) com a evolução das gerações. O desvio padrão é referente o valor de aptidão dos membros daquela população, que tende a zero com a convergência.

(Elaboração própria)

Com base nos dados gerados durante a solução é possível compreender as características que foram selecionadas e propagadas. Na Fig. 9 podemos ver a força exercida pelos atuadores, que na primeira geração era completamente dispersa, contudo uma carga intermediária que possibilita o alcance do alvo foi propagada.

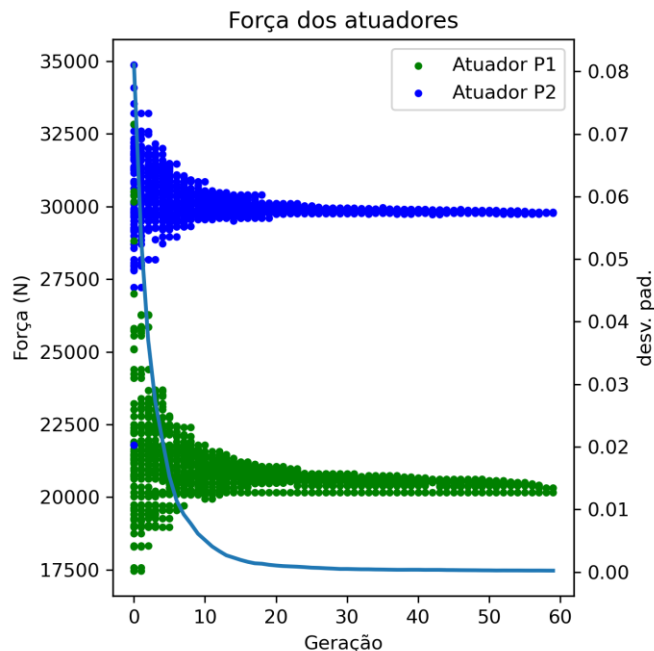


Figura 9. Módulo da força atuante em cada um dos pistões na extensão máxima (Elaboração própria)

Já na Fig. 10 nota-se uma baixa tensão na seção crítica da viga ABDE, provavelmente em razão da mudança para um perfil maior caso a tensão admissível tenha sido superada. Todavia, o algoritmo tomou decisões a aumentar esta tensão para se aproximar novamente da tensão admissível.

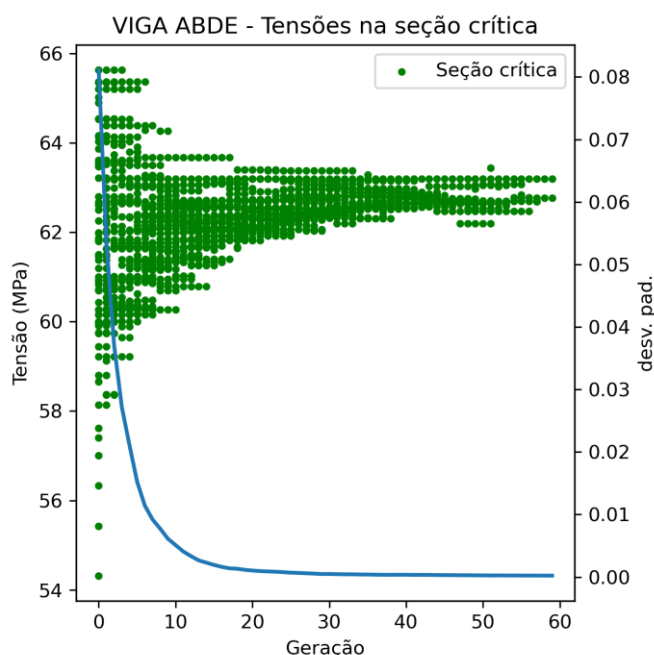


Figura 10. Evolução da tensão na seção crítica da viga ABDE

Na Fig. 11 foi possível identificar a tomada de decisão entre duas vigas diferentes. Houve a propensão à escolha de um perfil menor que resulta numa tensão próxima da admissível em detrimento ao uso de uma seção maior. (Elaboração própria)

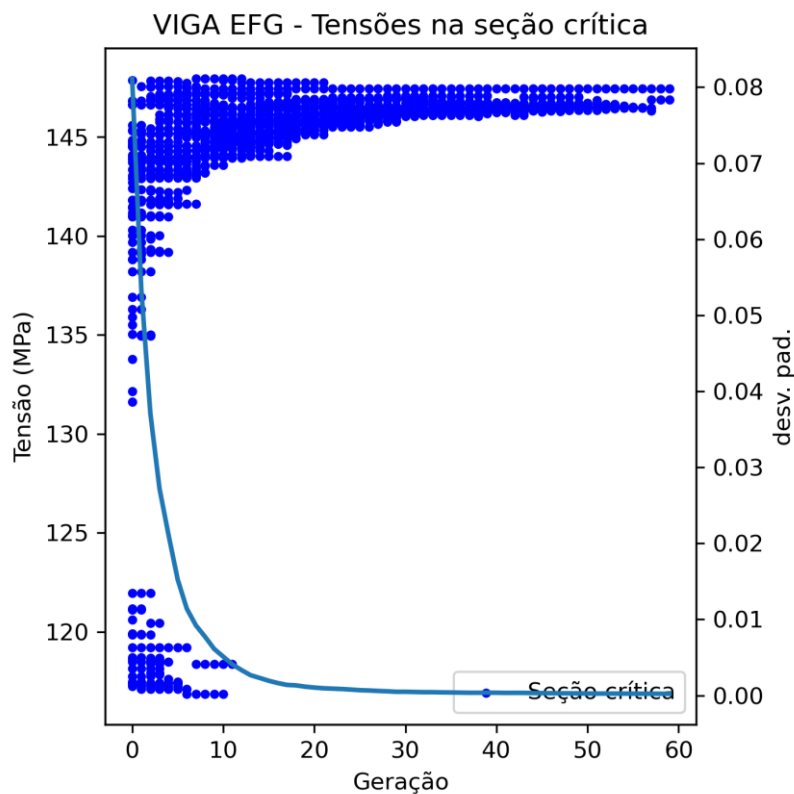


Figura 11. Analisando o gráfico é possível perceber que foram propagados os genes que utilizavam um perfil menor para se aproximar do limite da tensão admissível. (Elaboração própria)

4. RESULTADO

O programa indica um vencedor considerado ideal para os objetivos programados, neste caso o DNA do indivíduo mais apto está na Tab. 3.

ID	AB	BD	DE	C _X	C _Y	EF	FG	$\theta_{A \max}$	$\theta_{E \max}$	Viga ABDE	Viga EFG
1	1023	607	762	-583	619	741	962	62	12	W150x18,0	W150x13,0

Tabela 3. Código genético do resultado

A Fig. 12 apresenta desenho com as dimensões básicas da estrutura

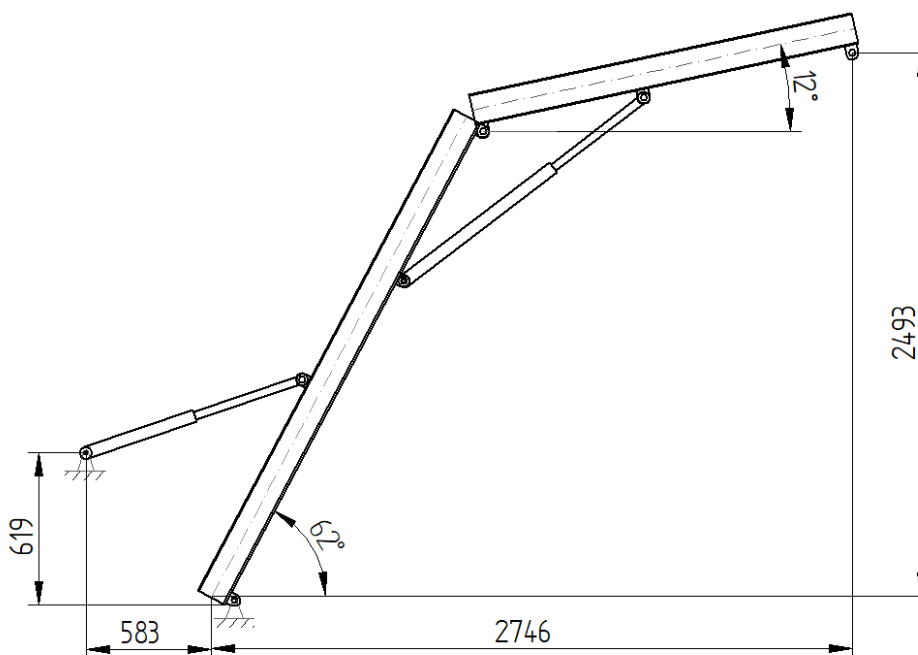


Figura 12. Braço do guindaste (Elaboração própria)

Podemos concluir que o processo de otimização foi realizado de acordo com as características desejadas e produziu uma estrutura que já está dimensionada. É possível recalculá-la para diferentes cargas ou diferentes objetivos modificando os parâmetros de aptidão. Em uma situação em que é necessário criar estruturas semelhantes para diferentes demandas, o emprego do método desenvolvido pode gerar economia de gastos com pessoal e recursos.

O único tempo gasto é a codificação do problema uma vez. Para todas as próximas vezes se obtém uma nova estrutura já dimensionada em um período curtíssimo, no caso deste artigo em dois minutos de processamento em um computador comum se obteve um resultado.

5. REFERÊNCIAS

HIBBELER, R.C. **Mecânica – Estática**. Décima Segunda Edição. Livros Técnicos e Científicos Editora: Pearson Education do Brasil, São Paulo, 2011.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**. Sétima Edição. Livros Técnicos e Editora: Pearson Education do Brasil, São Paulo, 2010.

SILVA, Angelo José Moreira. **Implementação de um Algoritmo Genético utilizando o modelo de ilhas**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p.84, 2005.

ASM INTERNATIONAL. **Carbon and Alloy Steels, Metals Handbook Desk Edition**. Segunda Edição. Livros Técnicos e Científicos Editora: ASM International, 1998

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.