



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA**  
**CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PÓRTICOS PLANOS METÁLICOS**  
**VIA ALGORITMOS GENÉTICOS**

**ÁLESON MIRANDA BARRETO**

**BARREIRAS-BA**  
**DEZEMBRO-2019**

**ÁLESON MIRANDA BARRETO**

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PÓRTICOS PLANOS METÁLICOS  
VIA ALGORITMOS GENÉTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do  
Oeste da Bahia, como requisito à obtenção do grau de  
Engenheiro Civil.

Orientador: Dr. Pedro Cláudio dos Santos Vieira

**BARREIRAS-BA  
DEZEMBRO-2019**

## FICHA CATALOGRÁFICA

---

B273 Barreto, Áleson Miranda.  
Otimização estrutural de pórticos planos metálicos via algoritmos genéticos. / Áleson  
Miranda Barreto. – 2019.  
96f.:il.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Cláudio dos Santos Vieira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) -  
Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das  
Tecnologias, Barreiras, BA, 2019.

1. Engenharia. I. Vieira, Pedro Cláudio dos Santos. II. Universidade Federal do  
Oeste da Bahia - Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD 620

---

**ÁLESON MIRANDA BARRETO**

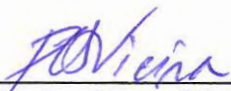
**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PÓRTICOS PLANOS METÁLICOS  
VIA ALGORITMOS GENÉTICOS**

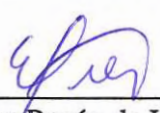
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do  
Oeste da Bahia, como requisito parcial à obtenção do  
grau de Engenheiro Civil.

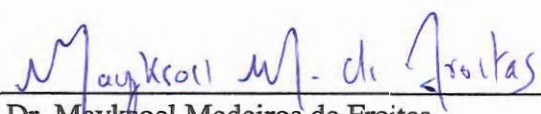
Aprovado em 02 de dezembro de 2019

**Banca Examinadora**

Orientador: \_\_\_\_\_

  
Prof. Dr. Pedro Cláudio dos Santos Vieira  
Universidade Federal do Oeste da Bahia

  
Prof. Dr. Elier Pavón de La Fé  
Universidade Federal do Oeste da Bahia

  
Prof. Dr. Mayksoel Medeiros de Freitas  
Universidade Federal do Oeste da Bahia

*Dedico esse trabalho à Deus e à toda minha  
família, em especial aos meus pais Aldir e  
Maria e ao meu irmão Álex.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as oportunidades concedidas, pelo discernimento, força para vencer as adversidades e por me permitir vencer essa jornada.

Aos meus pais, Aldir Heliodoro Barreto e Maria Eunice Miranda Barreto, pela garra de trabalhar incessantemente para oferecer a mim e ao meu irmão um futuro melhor e pelos ensinamentos transmitidos, em destaque: que não se deve medir esforços quando se busca a realização de um sonho.

À minha namorada Maira que, além de me apoiar, sempre me incentivou a ir em busca dos meus sonhos, levantar a cabeça e continuar, mesmo quando eu não acreditava ser possível.

Aos meus amigos Marcos Ribeiro, Eder, Douglas, Marcelo, Arnaldo Filho (Naldinho), Tainan, Alexandre, Kleber, José Carlos, e amigas Mariana, Marta, Mirla, Thábata, Edna que estiveram sempre dispostos a ajudar em qualquer situação.

Aos amigos de turma e em breve de profissão, com os quais convivi ao longo desses cinco difíceis anos, em especial ao Lucas, Miguel, Jhames e à Aline que sempre foram muito companheiros e solícitos. Sem dúvidas teria sido muito mais árduo sem esse apoio mútuo.

Agradeço ainda aos professores que tive ao longo de todo o ensino fundamental e médio, em especial ao Prof.º José Carlos que, além de professor, tornou-se um grande amigo, como já citado. Todos foram fundamentais na decisão de dar continuidade à minha formação, ingressando no ensino superior.

Aos professores da Universidade Federal do Oeste da Bahia que contribuíram para a minha formação profissional durante o curso, especialmente ao Prof.º Elier por seus conselhos e por ser um espelho de profissionalismo.

Aos professores Kaliana de Freitas e Gilson Silva por terem me cedido a oportunidade de ter sido seu monitor nos semestres 2016.2 e 2017.1.

Ao Prof.º Cláudio Alex Pires que, além de orientador de estágio e monitoria, foi também um orientador profissional, mostrando-se sempre disposto a contribuir com a formação teórica e também prática de todos nós alunos. Fica aqui registrado toda minha admiração.

Ao meu orientador, Prof. Pedro Vieira, pela disponibilidade, empenho, paciência e conselhos que sem dúvidas foram essenciais para realização desse trabalho e para a minha caminhada durante o curso.

Aos professores Elier Pavón de La Fé, já citado, e Mayksoel Medeiros de Freitas que cederam o seu tempo para a avaliação deste trabalho.

À toda equipe da CINFRA pelos ensinamentos, conselhos, paciência, cuidado e carinho que tiveram comigo ao longo de todo o meu tempo de estágio. Formou-se uma relação de amizade, construída ao longo do período em que tive a honra de fazer parte desse time. O meu muito obrigado à Diandra, Érico, Pedro, João, Vitor, Antônio Marcos, Valter e Prof.º Cláudio, já citado.

Ao Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias (CCET) da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), por ter proporcionado condições de desenvolver este trabalho.

## RESUMO

No presente trabalho, é desenvolvida uma ferramenta computacional para otimização de pórticos planos de estruturas metálicas. Para isso, criou-se rotinas para armazenar os dados, realizar a análise estrutural, dimensionar e otimizar pórticos planos por meio de Algoritmos Genéticos. A rotina de análise estrutural foi desenvolvida pelo Método da Rigidez Direta, com cargas nodais combinadas, para determinar os deslocamentos e reações nodais, além dos esforços internos dos membros. Na rotina de dimensionamento estrutural, foi realizada a verificação de perfis de aço laminados do tipo W, para cada membro de um pórtico, quanto aos seus atendimentos à norma brasileira referente a projetos de estruturas em aço e estruturas mistas. A rotina de otimização encarregou-se de realizar a otimização dimensional de determinados pórticos, através da técnica da computação evolutiva: Algoritmos Genéticos. As seleções dos indivíduos durante as gerações dos Algoritmos Genéticos, foram realizadas pelo método da roleta e os cruzamentos dos indivíduos selecionados, pelo cruzamento de um ponto. Foram estudados três problemas de pórticos planos. O primeiro, com apenas 2 elementos, teve a finalidade de validar as rotinas criadas com a execução de 3 casos com diferentes parâmetros genéticos. Enquanto isso, os outros dois pórticos (um com 3 pavimentos e 2 vãos, somando 15 elementos, e o outro com 10 pavimentos e 1 vão, somando 30 elementos, os quais já foram estudados por outros autores da literatura) ocuparam-se de analisar a aplicação dos Algoritmos Genéticos em estruturas com diferentes graus de complexidade. Foi possível validar as rotinas de análise e dimensionamento comparando seus resultados com o software *Ftool* e com cálculos manuais, respectivamente. A otimização dos pórticos foi satisfatória, encontrando soluções mais leves em comparação a outros trabalhos já realizados na literatura. Identificou-se que, para o pórtico com maior complexidade, ou seja, com maior quantidade de elementos e, conseqüentemente, maior quantidade de soluções possíveis, se faz necessário a utilização de agrupamentos dos elementos, a fim de diminuir o espaço de busca e melhorar o desempenho do algoritmo.

**Palavras-chave:** otimização estrutural; pórticos planos; estruturas metálicas; análise estrutural; Algoritmos Genéticos.

## LISTA FIGURAS

Figura 1 - Soluções otimizadas para uma treliça de um caso real.....	19
Figura 2 - Exemplo de pórtico plano.....	23
Figura 3 - Barra de pórtico e sua configuração deformada.....	23
Figura 4 - Coeficientes de rigidez de uma barra de pórtico plano no sistema local.....	24
Figura 5 - Coeficientes de rigidez axial e à flexão de uma barra prismática isolada.....	25
Figura 6 - Parâmetro de esbeltez $b/t$ de seções I.....	30
Figura 7 - Tipos de otimização estrutural.....	35
Figura 8 - Fluxograma para o AG genérico.....	37
Figura 9 - Tamanho da população x tamanho do indivíduo.....	38
Figura 10 - Representação do método de seleção da roleta.....	41
Figura 11 - Exemplo genérico de soluções locais e globais.....	42
Figura 12 - Exemplo de cruzamento uniforme.....	43
Figura 13 - Exemplo de cruzamento de um ponto.....	43
Figura 14 - Exemplo de cruzamento de dois pontos.....	44
Figura 15 - Exemplo de uma mutação binária simples.....	44
Figura 16 - Fluxograma do funcionamento do algoritmo de otimização.....	52
Figura 17 - Reações de engastamento de barras.....	54
Figura 18 - Convenção de sinais adotada.....	54
Figura 19 - Pórtico do problema para validação das rotinas.....	57
Figura 20 - Pórtico P01.....	59
Figura 21 - Pórtico P01 corrigido para o programa de otimização.....	60
Figura 22 - Pórtico do problema 2.....	62
Figura 23 - Pórtico P02.....	62
Figura 24 - Resultado do algoritmo para o pórtico P00 sem elitismo.....	65
Figura 25 - Aptidão dos melhores indivíduos ao longo das gerações para o pórtico P00... 70	
Figura 26 - Massa dos melhores indivíduos ao longo das gerações para o pórtico P00. .... 70	
Figura 27 - Resultado do algoritmo para o pórtico P00 do caso 2.....	71
Figura 28 - Resultado do algoritmo para o pórtico P00 do caso 3.....	72
Figura 29 - Média das aptidões dos indivíduos ao longo das gerações para o pórtico P00. 73	
Figura 30 - Aptidão dos melhores indivíduos do pórtico P01.....	74

Figura 31 - Massa dos melhores indivíduos dos cinco casos do pórtico P01.....	74
Figura 32 - Resultado do caso 3 do pórtico P01.....	75
Figura 33 - Resultado do caso 4 do pórtico P01.....	75
Figura 34 - Custos totais de material dos cinco casos para o pórtico P01.....	76
Figura 35 - Resultado do caso 5 do pórtico P01.....	77
Figura 36 - Aptidão dos melhores indivíduos para o pórtico P02.....	78
Figura 37 - Massa dos melhores indivíduos do pórtico P02. ....	79
Figura 38 - Resultado do caso 3 para o pórtico P02.....	80
Figura 39 - Restrição por elemento do pórtico P02 - Degertekin (2008).....	81
Figura 40 - Restrição por elemento do pórtico P02 - Kaveh (2010). ....	81
Figura 41 - Restrição por elemento do pórtico P02 - Carraro (2015).....	81
Figura 42 - Fatores de segurança das tensões e deslocamentos do caso 3. ....	82
Figura A.1 - Arquivo ".txt" de entrada para o pórtico P00, caso 1.....	90
Figura A.2 - Exemplo genérico de arquivo ".txt" de saída com resultados da otimização. ....	90
Figura A.3 - Exemplo genérico de arquivo ".txt" de saída com resumo de um problema. .	91
Figura B.1 - Esforços axiais do pórtico P00 calculados no <i>Ftool</i> . ....	92
Figura B.2 - Esforços cisalhantes do pórtico P00 calculados no <i>Ftool</i> . ....	93
Figura B.3 - Esforços de flexão do pórtico P00 calculados no <i>Ftool</i> .....	94
Figura B.4 - Deslocamentos nodais do pórtico P00 calculados no <i>Ftool</i> .....	95

## LISTA TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados. ....	31
Tabela 2 - Parâmetros referentes ao momento fletor resistente.....	33
Tabela 3 - Resumo dos parâmetros adotados no trabalho. ....	47
Tabela 4 - Variáveis resumo do pórtico para rotina de entrada.....	53
Tabela 5 - Parâmetros para rotina de entrada do Algoritmo Genético.....	53
Tabela 6 - Resumo dos problemas estudados.....	56
Tabela 7 - Dados do pórtico P00 para análise e dimensionamento estrutural.....	57
Tabela 8 - Coordenadas nodais dos membros do pórtico P00.....	57
Tabela 9 - Cargas nodais e condições de contorno do pórtico P00. ....	58
Tabela 10 - Casos estudados para pórtico P00. ....	58
Tabela 11 - Dados do pórtico P01 para análise e dimensionamento estrutural.....	60
Tabela 12 - Coordenadas nodais dos membros do pórtico P01.....	60
Tabela 13 - Cargas nodais e condições de contorno do pórtico P01. ....	61
Tabela 14 - Parâmetros de entrada do AG para os cinco casos do pórtico P01. ....	61
Tabela 15 - Dados do pórtico P02 para análise e dimensionamento estrutural.....	62
Tabela 16 - Coordenadas nodais dos membros do pórtico P02.....	63
Tabela 17 - Parâmetros de entrada do AG para os três casos do pórtico P02. ....	64
Tabela 18 - Cargas nodais e condições de contorno do pórtico P02. ....	64
Tabela 19 - Parâmetros do pórtico P00 para o Algoritmo Genético. ....	65
Tabela 20 - Comparação dos deslocamentos nodais geradas no <i>OEPPAG</i> e no <i>Ftool</i> .....	66
Tabela 21 - Comparação das reações nodais geradas no <i>OEPPAG</i> e no <i>Ftool</i> .....	66
Tabela 22 - Comparação das forças internas geradas no <i>OEPPAG</i> e no <i>Ftool</i> .....	67
Tabela 23 - Resumo dos 5 casos estudados para o pórtico P01. ....	76
Tabela 24 - Comparação dos resultados de outros autores com o caso 5 deste estudo.....	77
Tabela A.1 - Custos unitários de perfis de aço laminado de setembro de 2019.....	89

## LISTA DE SIGLAS

ABC	-	Colônia de Abelhas Artificiais
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACO	-	Otimização por Colônias de Formigas
AG	-	Algoritmos Genéticos
DE	-	Evolução Diferencial
ELS	-	Estados-limites de Serviço
ELU	-	Estados-limites Último
FLA	-	Flambagem Local da Alma
FLM	-	Flambagem Local da Mesa
FLT	-	Flambagem Lateral com Torção
HS	-	Busca Harmônica
MRD	-	Método da Rigidez Direta
NBR	-	Norma Brasileira
PSO	-	Otimização por Enxame de Partículas

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f'$	=	força ou ação aplicada no elemento
$k'$	=	coeficiente de rigidez de um corpo deformado
$d'$	=	deslocamento do nó na mesma direção e sentido da força aplicada
$\{f'\}$	=	vetor das forças generalizadas de barra no sistema local
$[k']$	=	matriz de rigidez de uma barra no sistema local
$\{d'\}$	=	vetor das deslocabilidades de barra no sistema local
$E$	=	módulo de elasticidade da barra
$A$	=	área da seção transversal da barra
$l$	=	comprimento da barra
$[r']$	=	chamada de matriz de rotação
$[k^{(e)}]$	=	matriz de rigidez do elemento no sistema local
$[K]$	=	matriz de rigidez global da estrutura
$\{F\}$	=	vetor das cargas nodais combinadas e reações nos apoios no sistema global
$\{d\}$	=	vetor das deslocabilidades nodais no sistema global
$R_d$	=	resistência de projeto
$S_d$	=	esforço sollicitação de projeto
$R_u$	=	resistências últimas
$\gamma_m$	=	coeficiente de ponderação das resistências
$\gamma_f$	=	coeficientes de ponderação das ações
$N_{t, Sd}$	=	força axial de tração sollicitante de cálculo
$N_{t, Rd}$	=	força axial de tração resistente de cálculo
$A_g$	=	área bruta da seção transversal da barra
$A_e$	=	área líquida efetiva da seção transversal da barra
$f_y$	=	resistência ao escoamento do aço

$f_u$	=	resistência à ruptura do aço
$\gamma_{a1}$	=	coeficiente de ponderação das resistências para análise de escoamento, flambagem e instabilidade do aço estrutural
$\gamma_{a2}$	=	coeficiente de ponderação das resistências para análise de ruptura do aço estrutural
$N_{c, Sd}$	=	força axial de compressão solicitante de cálculo
$N_{c, Rd}$	=	força axial de compressão resistente de cálculo
$\chi$	=	fator de redução associado à resistência à compressão
$\lambda_0$	=	parâmetro de esbeltez reduzido
$Q$	=	fator de redução total associado à flambagem local
$N_e$	=	força axial de flambagem elástica
$Q_a$	=	fator de redução que leva em conta a flambagem local da alma de seções I
$Q_s$	=	fator de redução que leva em conta a flambagem local da mesa de seções I
$b$	=	largura
$t$	=	espessura
$A_{ef}$	=	área efetiva da seção transversal
$b_{ef}$	=	largura efetiva
$N_e$	=	força axial de flambagem elástica
$E$	=	módulo de elasticidade do aço
$I$	=	momento de inércia da seção transversal em relação a um determinado eixo
$L$	=	comprimento do elemento isolado
$K$	=	coeficiente de flambagem
$M_{Sd}$	=	momento solicitante de cálculo
$V_{Sd}$	=	força cortante solicitante de cálculo
$M_{Rd}$	=	momento resistente de cálculo
$V_{Rd}$	=	força cortante resistente de cálculo
$M_{p\ell}$	=	momento fletor de plastificação da seção transversal, em que

$Z$	=	módulo de resistência plástico
$M_r$	=	momento fletor correspondente ao início do escoamento
$M_{cr}$	=	momento fletor de flambagem elástica
$\lambda$	=	parâmetro de esbeltez
$\lambda_p$	=	parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação
$\lambda_r$	=	parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento
$W$	=	módulo de resistência elástico da seção, relativo ao eixo de flexão
$W_{ef}$	=	módulo de resistência mínimo elástico da seção, relativo ao eixo de flexão
$N_{Sd}$	=	força axial solicitante de cálculo de compressão
$N_{Rd}$	=	força axial resistente de cálculo a compressão
$M_{x,Sd}$	=	momentos fletores solicitantes de cálculo, respectivamente em relação ao eixo $x$ da seção transversal já incluindo os efeitos de 2ª ordem
$M_{y,Sd}$	=	momentos fletores solicitantes de cálculo, respectivamente em relação ao eixo $y$ da seção transversal já incluindo os efeitos de 2ª ordem
$M_{x,Rd}$	=	momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação ao eixo $x$ da seção transversal
$M_{y,Rd}$	=	momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação ao eixo $y$ da seção transversal
$M1$	=	maior dos momentos nodais do membro, obtidos da análise estrutural
$C_m$	=	fator que depende da configuração do diagrama do momento fletor de 1ª ordem
$H$	=	altura total do pilar
$f(x)$	=	função objetivo
$N_e$	=	número de barras
$\alpha$	=	coeficiente de penalidade (aumenta a penalidade do membro caso alguma outra restrição não seja atendida)
$\sigma_i$	=	tensão no membro
$\sigma_i^a$	=	tensão limite (máximo ou mínima)
$\delta_i$	=	deslocamento nodal do membro

$\delta_i^a$	=	deslocamento limite do membro
$M$	=	número de graus de liberdade do membro
$p$	=	probabilidade de seleção de um indivíduo
$N_{pop}$	=	tamanho da população
$P_m$	=	probabilidade de mutação
$P_c$	=	probabilidade de cruzamento
$s(x)$	=	função de escalonamento
$a$ e $b$	=	coeficientes que variam a cada geração
$c$	=	constante ou fator de escala definido pelo usuário
$f_{med}$	=	média das aptidões dos indivíduos da geração
$f_{min}$	=	menor aptidão dentre os indivíduos da geração
$f_{máx}$	=	maior aptidão dentre os indivíduos da geração
$FS$	=	fator de segurança do membro
$FS_t$	=	fator de segurança em relação as tensões do membro
$FS_d$	=	fator de segurança em relação aos deslocamentos nodais do membro

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	18
1.2	JUSTIFICATIVA .....	18
1.3	OBJETIVOS .....	20
<b>1.3.1</b>	<b>Geral.....</b>	<b>20</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Específicos .....</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>22</b>
2.1	ANÁLISE ESTRUTURAL .....	22
2.2	DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS.....	27
<b>2.2.1</b>	<b>Critérios de Projeto Segundo a Norma Brasileira 8800 de 2008.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Elementos Tracionados .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Elementos Comprimidos .....</b>	<b>29</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Elementos Submetidos à Flexão Simples.....</b>	<b>32</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Elementos Submetidos à Flexão Composta.....</b>	<b>33</b>
<b>2.2.6</b>	<b>Deslocamento Máximo .....</b>	<b>34</b>
2.3	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL.....	35
<b>2.3.1</b>	<b>Terminologia .....</b>	<b>36</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Codificação .....</b>	<b>37</b>
<b>2.3.3</b>	<b>População Inicial.....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Função Aptidão .....</b>	<b>39</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Seleção.....</b>	<b>40</b>
<b>2.3.6</b>	<b>Operadores Genéticos .....</b>	<b>42</b>
<b>2.3.7</b>	<b>Seleção Elitista .....</b>	<b>45</b>
<b>2.3.8</b>	<b>Escalonamento .....</b>	<b>45</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>47</b>
3.1	DESENVOLVIMENTO DA FUNÇÃO DE APTIDÃO.....	48
3.2	ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO.....	51
<b>3.2.1</b>	<b>Rotina de Entrada (INPUT).....</b>	<b>52</b>

3.2.2	Rotina de Análise Estrutural ( <i>PORTAN</i> ) .....	53
3.2.3	Rotina de Dimensionamento ( <i>DIMENSIONAR</i> ).....	55
3.2.4	Rotina de Otimização ( <i>AG</i> ) .....	55
3.2.5	Rotina de Exportação dos Resultados ( <i>SAIDA</i> ).....	56
3.3	VALIDAÇÃO DAS ROTINAS .....	56
3.4	PROBLEMAS .....	59
3.4.1	Problema 1.....	59
3.4.2	Problema 2.....	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
4.1	VALIDAÇÃO DAS ROTINAS .....	65
4.1.1	Rotina de Análise .....	65
4.1.2	Rotina de Dimensionamento.....	67
4.1.3	Rotina de Otimização via Algoritmos Genéticos .....	69
4.2	PROBLEMAS .....	73
4.2.1	Problema 1.....	73
4.2.2	Problema 2.....	78
5	CONCLUSÕES.....	84
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	84
5.2	RECOMENDAÇÕES .....	84
	REFERÊNCIAS .....	85
	ANEXO A.....	89
	APÊNDICE A - ARQUIVOS EM FORMATO “.TXT” .....	90
	APÊNDICE B - RESULTADOS DO SOFTWARE <i>FTOOL</i> .....	92

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Com o passar dos anos, cada vez mais as edificações estão se modernizando e se verticalizando, afim de obterem um maior índice de aproveitamento dos espaços disponíveis para sua construção. Um edifício ao todo é considerado um sistema que pode ser dividido hierarquicamente com base no nível funcional de suas partes. Um subsistema é formado por um conjunto de elementos, que por sua vez são formados por um conjunto de componentes e cada componente por um conjunto de materiais.

De acordo com Caçador (2014), a estrutura é um dos subsistemas mais importantes do edifício, sendo responsável por cerca de 20% a 30% do custo de construção do edifício.

Nesse sentido, o uso do aço nessas estruturas surge como uma alternativa interessante, uma vez que, devido à alta resistência desse material, possibilita elementos de menores dimensões capazes de vencerem grandes vãos e alturas, se comparado a estruturas usuais de concreto armado.

A otimização é um processo matemático que vem sendo aplicada em diversas áreas, como: no planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos (ASANO et al., 2011), na agroindústria (CONSTANTINO, 2011), em redes de distribuição de águas (VIEIRA; SILVA, 2017), entre outras. Na Engenharia Estrutural, as técnicas de otimização têm por finalidade desenvolver projetos com melhor desempenho, dispondo seus elementos estruturais para suportar o carregamento a ser submetido sem risco para sua segurança, com mínima massa e máxima rigidez.

Dentre os métodos de otimização evolucionária, os Algoritmos Genéticos (AG) são algoritmos probabilísticos para otimização de sistemas baseados na teoria da evolução de Charles Darwin. O objetivo desses algoritmos é simular, matematicamente, a evolução das gerações em busca de melhores soluções candidatas para um dado problema.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

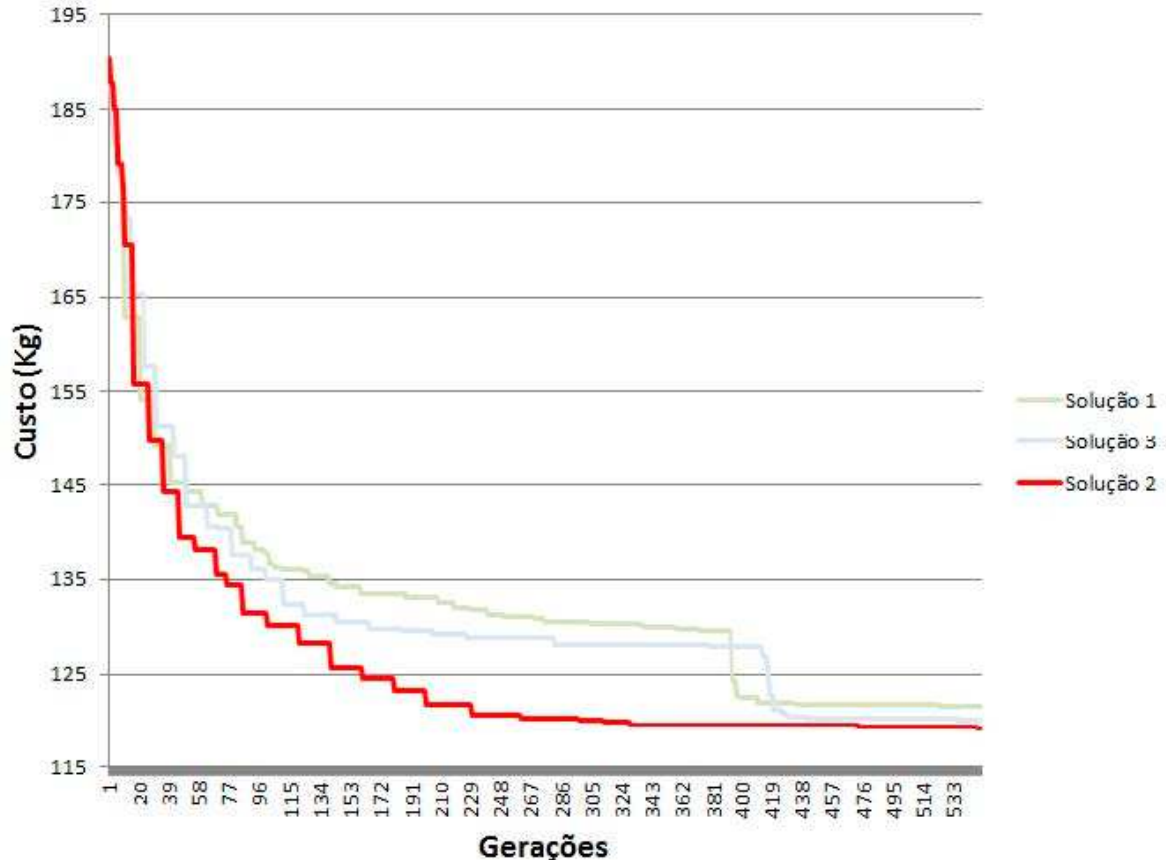
Atualmente, mesmo com o uso da tecnologia, é inevitável um processo de tentativa e erro na etapa de dimensionamento de um projeto estrutural de um edifício. O dilema surge do fato de que as variáveis necessárias durante as etapas de análise e dimensionamento estrutural sejam mutuamente dependentes. Para realizar a análise da estrutura precisa-se conhecer as propriedades dos seus elementos, como: material, área, inércia, entre outras. Por

sua vez, na etapa de dimensionamento, ou seja, de escolha dos perfis de cada elemento, necessita-se das ações que atuam em cada membro, oriundas do processo de análise.

Os programas existentes relacionados a dimensionamento estrutural, como *Cypacad* por exemplo, são responsáveis por efetuar a análise estrutural e, em seguida, verificar o atendimento das especificações das normas vigentes, baseando-se nas informações das barras, previamente definidas pelo usuário. Caso o projetista verifique que os elementos estão superdimensionados, ele poderá realizar uma otimização manual, selecionando novos perfis para a estrutura e solicitando ao programa que realize novamente as etapas anteriores. O mesmo pode ser feito caso as peças não atendam aos parâmetros estabelecidos.

Tendo essas considerações em mente, os processos matemáticos de otimização estrutural são uma alternativa para uma mudança no processo de projetar estruturas. Isso fica claro com os resultados, obtidos por Souza (2016a) no qual encontrou uma redução de 39,50% na massa total de uma estrutura treliçada para cobertura, projetada com o uso de AG. Enquanto que a massa do projeto realizado de modo convencional fora de 196,938 kg, nas otimizações realizadas, com três diferentes soluções, foram encontradas massas inferiores a 125 kg, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Soluções otimizadas para uma treliça de um caso real.



Fonte: (SOUZA, 2016a).

Em seu estudo, Gervásio (2008) afirma que graças às características naturais do aço, as estruturas metálicas permitem a otimização dos recursos naturais e a obtenção de um ambiente construído mais racional e eficaz, contribuindo desta forma para uma construção mais sustentável. Ele ainda relata que o futuro das próximas gerações, a médio ou longo prazo, direta ou indiretamente, pode ser comprometido pela indústria da construção, a qual é responsável por uma proporção bastante significativa nos impactos ambientais. Portanto, uma das prioridades do setor da construção deve ser o desenvolvimento de soluções inovadoras visando à minimização desse problema.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Geral

Este trabalho teve como objetivo a elaboração de uma ferramenta computacional capaz de auxiliar profissionais da engenharia a projetarem estruturas metálicas mais leves e que garantam a segurança de todo o sistema, usando o método dos Algoritmos Genéticos para otimização estrutural dimensional de pórticos planos simples, medianos e complexos.

#### 1.3.2 Específicos

- ✓ Desenvolver uma rotina computacional para análise de pórticos planos, com cargas nodais combinadas, pelo método da rigidez direta;
- ✓ Validar a rotina de análise estrutural realizando a análise de um pórtico plano com 2 elementos, pórtico P00, e comparando os seus resultados com os dados retornados pelo software *Ftool* após sua análise para o mesmo problema;
- ✓ Desenvolver uma rotina computacional para o dimensionamento de barras com perfis W sujeitas às tensões de tração, compressão, flexão simples e flexão composta, de acordo com a Norma Brasileira (NBR) para estruturas em aço, NBR 8800:2008, em situações de vigas que suportam pilares e pilares de edifícios de dois ou mais pavimentos;
- ✓ Validar a rotina de dimensionamento estrutural realizando a verificação de um pórtico plano com 2 elementos, pórtico P00, e comparando os seus resultados com o cálculo realizado manualmente para a verificação de um dos elementos do mesmo pórtico;
- ✓ Formular a função penalidade para cálculo da aptidão dos indivíduos, necessária para o Algoritmo Genético, de modo a atender as restrições da NBR 8800 de 2008;

- ✓ Desenvolver uma rotina computacional de otimização estrutural dimensional via algoritmos genéticos utilizando a linguagem *Python*, versão 3.7.
- ✓ Validar a rotina de otimização estrutural dimensional realizando uma análise gráfica do comportamento das aptidões médias dos indivíduos e as aptidões dos melhores indivíduos ao longo das gerações;
- ✓ Otimizar, em 5 diferentes combinações de parâmetros genéticos, um pórtico plano de 3 pavimentos e 2 vãos, pórtico P01, com 15 elementos e 12 nós ao todo, o qual já fora objeto de estudo de outros autores da literatura;
- ✓ Comparar os custos de materiais das 5 otimizações do pórtico P01, tomando como base os custos de insumos disponibilizados pelo site *ORSE – Orçamento Obras Sergipe*;
- ✓ Comparar os custos da melhor solução encontrada do pórtico P01, dentre as 5 combinações, com as soluções encontradas por outros autores da literatura, tomando como base os custos de insumos disponibilizados pelo site *ORSE – Orçamento Obras Sergipe*;
- ✓ Otimizar, em 3 diferentes combinações de parâmetros genéticos, um pórtico plano de 10 pavimentos e 1 vãos, pórtico P02, com 30 elementos e 22 nós ao todo, o qual já fora objeto de estudo de outros autores da literatura;

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 ANÁLISE ESTRUTURAL

Uma das etapas fundamentais no desenvolvimento de um projeto estrutural é a análise estrutural. É nela onde se prevê o comportamento do sistema diante das solicitações externas. Sua finalidade é obter deslocamentos, esforços e tensões, com o objetivo posterior de dimensionar a estrutura (SOUZA, 2016b).

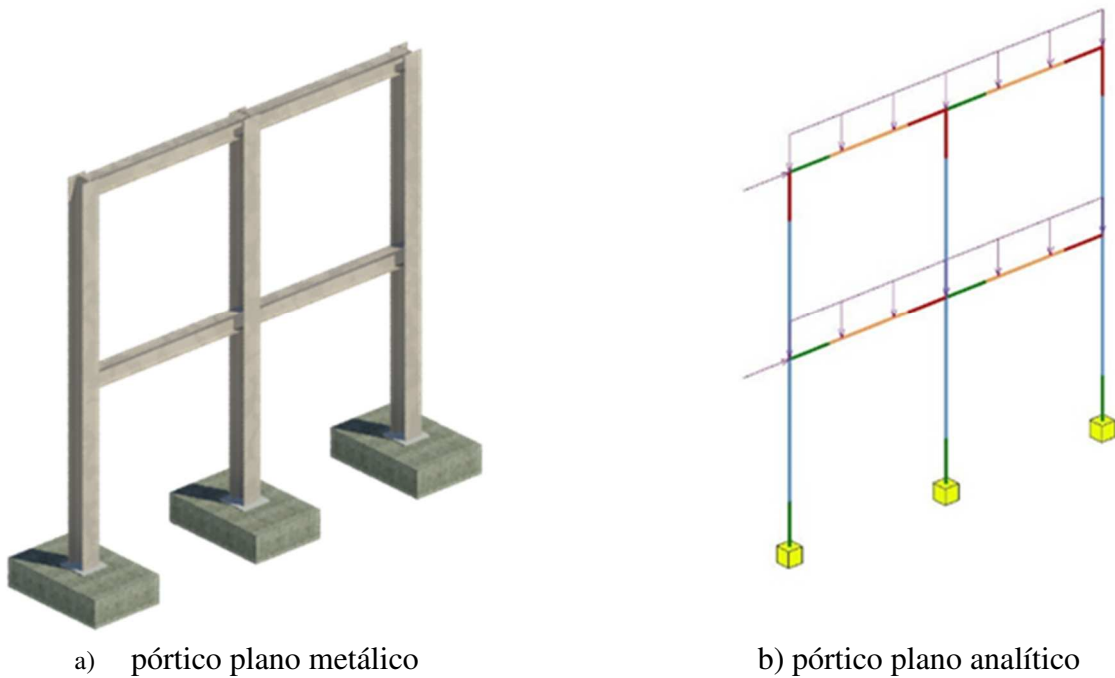
Os métodos de análise estrutural existentes que mais se destacam são o Método das Forças ou Método da Flexibilidade, e o Método dos Deslocamentos, também chamado por alguns autores de *Método da Rigidez Direta* (MRD). A formulação matricial do método da rigidez direta é especialmente conveniente para a implementação computacional.

De acordo com Weaver e Gere (1990), o MRD é um método que pode ser utilizado para a solução de qualquer estrutura reticulada onde as incógnitas são os deslocamentos do nós da estrutura. Ele faz uso do princípio da superposição, que assume que a relação entre ações e deslocamentos é linear e estabelece que os efeitos produzidos por várias causas podem ser obtidos combinando os efeitos devido às causas individuais.

As estruturas reticuladas são estruturas constituídas por membros que possuem uma de suas dimensões que se sobressai às outras. Os pontos de intersecção, os pontos de apoios e a extremidade livre de membro, são chamados de *nós*. Classifica-se as estruturas em seis categorias: vigas, treliças planas, treliças espaciais, grelhas, pórticos planos e pórticos espaciais. Viga é um elemento reto que tem um ou mais pontos de apoio. As treliças são idealizadas como um sistema de membros ligados entre si por rótulas, podendo ter seus membros dispostos num plano (treliças planas) ou em qualquer direção do espaço (treliças espaciais). Já a grelha é uma estrutura plana com membros que se cruzam ou se interceptam mutuamente. No caso dos pórticos, diferentes das treliças, seus membros são ligados por nós rígidos, dispostos em um único plano (pórtico plano) ou em direções arbitrárias (pórticos espaciais) (WEAVER; GERE, 1990). Um exemplo de pórtico plano é exibido na Figura 2.

A estrutura de uma edificação é composta por associação de pórticos ou treliças contraventadas com ligações flexíveis. Um modelo estrutural composto por pórticos é estável para ações tanto verticais quanto horizontais, diferentemente da estrutura com treliçadas na qual é estável apenas para ação de cargas verticais. Para garantir a estabilidade dessa última, deve-se associar uma subestrutura de contraventamento que leva à concentração de forças horizontais nas suas fundações, enquanto que a rigidez dos nós de um pórtico distribui as forças horizontais em todos os pilares (PFEIL, 2009).

Figura 2 - Exemplo de pórtico plano.



a) pórtico plano metálico

b) pórtico plano analítico

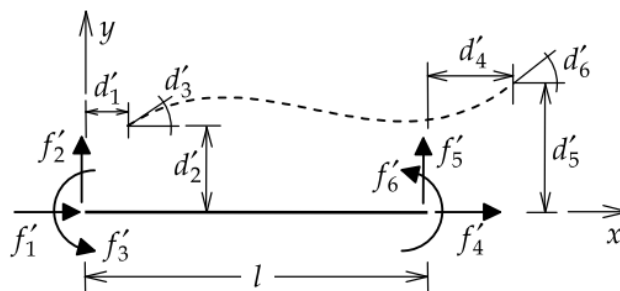
Fonte: Autor.

O MRD baseia-se na *Lei de Hooke*, mostrada na Equação (1), que relaciona força, deslocamento e rigidez de um corpo deformável submetido a uma ação (OLIVEIRA, 2018).

$$f' = k' \cdot d', \quad (1)$$

A configuração deformada de uma barra isolada de pórtico plano e o conjunto de forças e momentos que atuam nas extremidades da barra, paralelamente a seus eixos locais é apresentada na Figura 3.

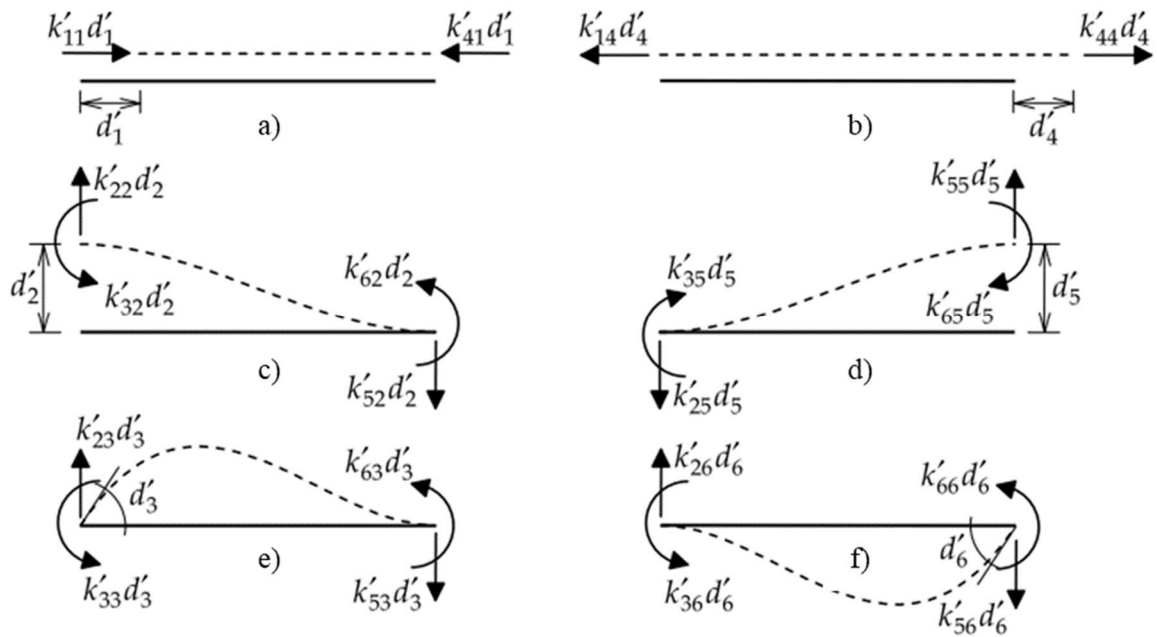
Figura 3 - Barra de pórtico e sua configuração deformada.



Fonte: (MARTHA, 2018a).

Para Martha (2018a), o coeficiente de rigidez de uma barra no seu eixo local é uma força ou momento que deve atuar na extremidade da barra isolada para equilibrá-la quando um deslocamento (ou rotação) unitário é imposto, isoladamente, em uma das suas extremidades. Na Figura 4 tem-se as possíveis configurações de deformações ou rotações em um membro isolado de um pórtico plano.

Figura 4 - Coeficientes de rigidez de uma barra de pórtico plano no sistema local.



Membros isolados submetidos à: a) compressão; b) tração. Membros isolados submetidos a flexão com: c) primeiro nó deslocável e segundo indeslocável; d) primeiro nó indeslocável e segundo deslocável; e) primeiro e segundo nó indeslocáveis com rotação positiva no primeiro nó; f) primeiro e segundo nó indeslocáveis com rotação positiva no segundo nó.

Fonte: (MARTHA, 2018a).

Seguindo a Equação (1), podemos escrever os dados das Figura 3 e Figura 4 na forma matricial, resultando na Equação (2).

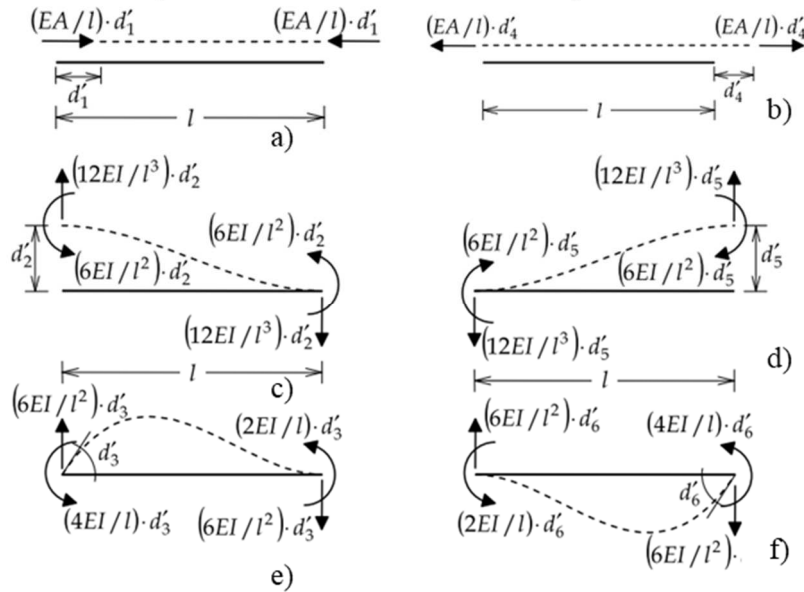
$$\begin{Bmatrix} f'_1 \\ f'_2 \\ f'_3 \\ f'_4 \\ f'_5 \\ f'_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k'_{11} & 0 & 0 & k'_{14} & 0 & 0 \\ 0 & k'_{22} & k'_{23} & 0 & k'_{25} & k'_{26} \\ 0 & k'_{32} & k'_{33} & 0 & k'_{34} & k'_{35} \\ k'_{41} & 0 & 0 & k'_{44} & 0 & 0 \\ 0 & k'_{52} & k'_{53} & 0 & k'_{55} & k'_{56} \\ 0 & k'_{61} & k'_{62} & 0 & k'_{64} & k'_{65} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d'_1 \\ d'_2 \\ d'_3 \\ d'_4 \\ d'_5 \\ d'_6 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\{f'\} = [k'] \cdot \{d'\}$$

Os valores do coeficiente de rigidez são calculados como na Figura 5 de modo que a matriz  $[k']$  torna-se como na Equação (3) a seguir.

$$[k'] = \begin{bmatrix} EA/l & 0 & 0 & -EA/l & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/l^3 & 6EI/l^2 & 0 & -12EI/l^3 & 6EI/l^2 \\ 0 & 6EI/l^2 & 4EI/l & 0 & -6EI/l^2 & 2EI/l \\ -EA/l & 0 & 0 & EA/l & 0 & 0 \\ 0 & -12EI/l^3 & -6EI/l^2 & 0 & 12EI/l^3 & -6EI/l^2 \\ 0 & 6EI/l^2 & 2EI/l & 0 & -6EI/l^2 & 4EI/l \end{bmatrix} \quad (3)$$

Figura 5 - Coeficientes de rigidez axial e à flexão de uma barra prismática isolada.



Membros isolados submetidos à: a) compressão; b) tração. Membros isolados submetidos a flexão com: c) primeiro nó deslocável e segundo indeslocável; d) primeiro nó indeslocável e segundo deslocável; e) primeiro e segundo nó indeslocáveis com rotação positiva no primeiro nó; f) primeiro e segundo nó indeslocáveis com rotação positiva no segundo nó.

Fonte: (MARTHA, 2018a).

De acordo com Weaver e Gere (1990), para problemas em que os apoios não permitem deslocamentos de translação nos nós, a matriz  $[k']$  é reduzida à matriz da Equação (4).

$$[k'] = \begin{bmatrix} EA/l & 0 & 0 \\ 0 & 4EI/l & 2EI/l \\ 0 & 2EI/l & 4EI/l \end{bmatrix} \quad (4)$$

A fim de que tanto as forças quanto os deslocamentos passem a ter a orientação global da estrutura, a matriz  $[k']$  deve ser multiplicada pela matriz  $[r']$ , chamada de matriz de rotação. Assim também, o vetor  $\{d'\}$  deve ser multiplicado pela transposta da matriz de rotação, na qual a matriz  $[r']$  tem os valores da Equação (5) (VIEIRA, 2019).

$$[r'] = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \frac{-\sin(\alpha)}{L} & \frac{-\sin(\alpha)}{L} \\ \sin(\alpha) & \frac{\cos(\alpha)}{L} & \frac{\cos(\alpha)}{L} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos(\alpha) & \frac{\sin(\alpha)}{L} & \frac{\sin(\alpha)}{L} \\ -\sin(\alpha) & \frac{-\cos(\alpha)}{L} & \frac{-\cos(\alpha)}{L} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

A Equação (2) agora passa ser:

$$\{f'\} = [r'] \cdot [k'] \cdot [r']^T \cdot \{d'\} \quad (6)$$

Feito isso, encontra-se a matriz de rigidez do elemento no sistema local  $[k^{(e)}]$  como segue na Equação (7).

$$[k^{(e)}] = [r'] \cdot [k'] \cdot [r']^T \quad (7)$$

Combinado as matrizes de rigidez de cada elemento, é montada a matriz de rigidez global da estrutura  $[K]$  de modo que o sistema passe a ser como na Equação (8).

$$\{F\} = [K] \cdot \{d\} \quad (8)$$

Com a matriz  $[K]$  montada e aplicada as condições de contorno dos apoios, encontra-se as suas respectivas reações. Feito isso, o vetor  $\{F\}$  estará completo e a única variável restante a ser encontrada é o vetor  $\{d\}$ .

Encontrado vetor  $\{d\}$ , o processo descrito é realizado de forma inversa até que se obtenham os vetores  $\{f'\}$  e  $\{d'\}$  da Equação (2) (BREBBIA, 1986).

## 2.2 DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS

### 2.2.1 Critérios de Projeto Segundo a Norma Brasileira 8800 de 2008

O projeto estrutural de uma edificação tem como objetivo garantir a segurança estrutural quanto a colapsos da estrutura e o bom desempenho da mesma, evitando-se grandes deslocamentos, vibrações e danos locais. Esse projeto pode ser dividido em três etapas: anteprojeto ou projeto básico, análise estrutural e dimensionamento e detalhamento (PFEIL, 2009).

Durante o dimensionamento, utiliza-se um conjunto de regras e especificações, reunidos em normas oficiais, que estabelecem bases comuns na elaboração de projetos. Segundo a NBR 8681 de 2003, o estado limite de uma estrutura é o estado em que a estrutura deixa de satisfazer sua finalidade. Na NBR 8800 de 2008, esses estados limites são: estados-limites últimos (ELU), que determinam a paralisação do uso da estrutura, pela sua simples ocorrência, e estados-limites de serviço (ELS), que, em sua ocorrência, repetição ou duração, causam efeitos estruturais que não atendem as condições especificadas para o uso da construção ou que indicam comprometimento da durabilidade da estrutura.

A NBR 8800 de 2008 considera os ELU e ELS como os estados relacionados com a segurança da estrutura sujeita às combinações mais desfavoráveis de ações previstas em toda a vida útil, durante a construção ou quando atuar uma ação especial ou excepcional e com o desempenho da estrutura sob condições normais de utilização, respectivamente.

Para verificar a segurança estrutural em cada seção da estrutura, utiliza-se os critérios da NBR 8681 (2003), que parte do critério da Equação (9):

$$R_d \geq S_d \quad (9)$$

onde a resistência de projeto  $R_d$ <sup>1</sup> deve ser maior que o esforço solicitação de projeto  $S_d$ .

A resistência de projeto é obtida por meio da Equação (10), em que se divide as resistências últimas  $R_u$  pelo respectivo coeficiente de ponderação  $\gamma_m$  que leva em conta as incertezas das resistências:

$$R_d = \frac{R_u}{\gamma_m} \quad (10)$$

A solicitação de cálculo  $S_d$  é obtida, com base nas combinações últimas das ações, multiplicando-se cada tipo de esforço que compõe a combinação pelos respectivos

---

<sup>1</sup> o índice  $d$  provém do inglês *design*.

coeficientes de ponderação  $\gamma_f$  que levam em conta as incertezas das solicitações. Como as ações podem atuar juntas, estas devem ser combinadas de acordo com Equação (11), considerando a probabilidade de atuarem simultaneamente sobre a estrutura, durante um período estabelecido:

$$S_d = \sum_{i=1}^m S_i \cdot \gamma_{f_i} \quad (11)$$

O índice  $i$  indica que para cada tipo de solicitação  $S_i$  (carga permanente - CP, carga accidental - CA ou carga devida aos ventos - CV), tem o seu nível de incerteza e estará associada a um correspondente  $\gamma_{f_i}$  (BELLEI, 2008).

É necessário realizar as combinações das ações de modo a expressar as situações mais desfavoráveis para a estrutura durante sua vida útil prevista. Essas combinações referem-se aos instantes nos quais cada ação variável, por sua vez, é dominante e é combinada às ações permanentes e às outras ações variáveis simultâneas que produzem acréscimos de solicitações desfavorável (PFEIL, 2009).

A verificação dos ELU e dos ELS deve ser realizada em função de combinações últimas e combinações de serviço, respectivamente (ABNT, 2008).

### 2.2.2 Elementos Tracionados

No dimensionamento, deve ser atendida a condição da Equação (12):

$$N_{t, Sd} \leq N_{t, Rd} \quad (12)$$

A NBR 8800 determina que a força axial de tração resistente de cálculo,  $N_{t, Rd}$ , a ser usada no dimensionamento é o menor dos valores obtidos nas Equações (13) e (14), considerando-se os estados-limites últimos de *escoamento da seção bruta* e *ruptura da seção líquida*, exceto para barras redondas com extremidades rosqueadas e barras ligadas por pinos.

$$N_{t, Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad \text{Escoamento da seção bruta} \quad (13)$$

$$N_{t, Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad \text{Escoamento da seção líquida} \quad (14)$$

tal que:

$\gamma_{a1} = 1,10$  em combinações normais;

$\gamma_{a1} = 1,35$  em combinações normais.

### 2.2.3 Elementos Comprimidos

No dimensionamento dessas barras, deve ser atendida a condição da Equação (15).

$$N_{c, Sd} \leq N_{c, Rd} \quad (15)$$

Segundo a NBR 8800:2008, a força axial de compressão resistente de cálculo,  $N_{c, Rd}$ , de uma barra, associada aos estados-limites últimos de instabilidade por flexão, por torção ou flexo-torção e de flambagem local, deve ser determinada pela expressão dada na Equação (16).

$$N_{c, Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (16)$$

O fator de redução associado à resistência à compressão,  $\chi$ , recebe um dos valores calculados pela Equação (17) e (18):

$$\text{– para } \lambda_0 \leq 1,50: \quad \chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (17)$$

$$\text{– para } \lambda_0 > 1,50: \quad \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (18)$$

onde,

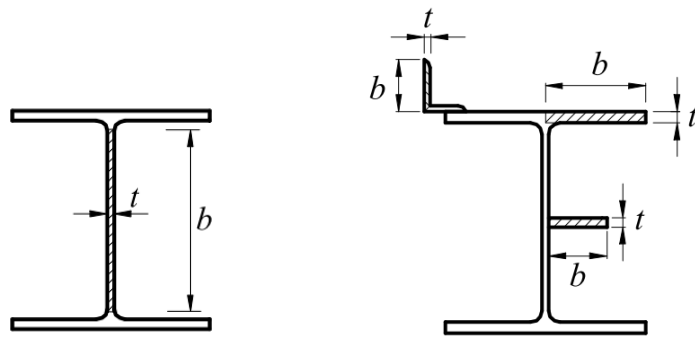
$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} = \text{parâmetro de esbeltez reduzido.}$$

O fator  $Q$  é calculado conforme o procedimento descrito no Anexo F da NBR 8800 de 2008. Ele dependerá do parâmetro de esbeltez  $b/t$  dos elementos componentes da seção transversal do perfil, onde a contribuição de cada um deles é considerada como na Equação (19).

$$Q = Q_a \cdot Q_s \quad (19)$$

Esse parâmetro de esbeltez varia de acordo o elemento do perfil. Para o caso de perfis W, seus valores se dão como apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Parâmetro de esbeltez  $b/t$  de seções I.



$$(b/t)_{lim} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$(b/t)_{lim} = 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

a) para almas de seções W laminadas      b) para mesas de seções W laminadas

Fonte: (ABNT, 2008).

No caso das almas das seções W, o fator  $Q_a$  é calculado conforme as Equações (20) ou (21), nos casos em que:

a)  $b/t \leq (b/t)_{lim}$ :

$$Q_a = 1 \tag{20}$$

b)  $b/t > (b/t)_{lim}$ :

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g}, \tag{21}$$

onde,

$A_g$  = área bruta da seção;

$A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef})t$ , em que,

$$b_{ef} = 1,92 t \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[ 1 - \frac{c_a}{b/t} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \leq b, \text{ onde,}$$

$c_a = 0,38$  para mesas ou almas de seções tubulares retangulares e  $0,34$  para todos os outros elementos.

Para as mesas das seções W, o fator  $Q_s$  é calculado conforme as Equações (22), (23) ou (24)(20), nos casos em que:

a)  $b/t \leq (b/t)_{lim}$ :

$$Q_s = 1 \tag{22}$$

b)  $b/t > (b/t)_{lim}$ :











$$Q_s = 1,415 - 0,74 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ para } 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (23)$$

$$Q_s = \frac{0,69E}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (24)$$

A força axial de flambagem elástica  $N_e$  para seção com dupla simetria no caso de flambagem por flexão é dada pela Equação (25), cujos valores do coeficiente de flambagem  $K$  podem ser encontrados na Tabela 1.

$$N_e = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2} \quad (25)$$

Tabela 1 - Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados.

A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem							
	Valores teóricos de $K$	0,5	0,7	1	1	2	2
	Valores recomendados de $K$	0,65	0,8	1,2	1	2,1	2
Código para condição de apoio		Rotação e translação impedidas					
		Rotação livre, translação impedida					
		Rotação impedida, translação livre					
		Rotação e translação livres					

Fonte: (ABNT, 2008).

## 2.2.4 Elementos Submetidos à Flexão Simples

Para o dimensionamento das vigas sujeitas a flexão simples pelo método dos estados limites últimos, calculam-se o momento e o esforço cortante resistentes de projeto e compará-los aos respectivos esforços solicitantes de projeto, como mostram as Equações (26) e (27). Além disso, devem-se verificar os deslocamentos no estado limite de utilização (PFEIL, 2009).

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (26)$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (27)$$

As vigas devem suportar as cargas perpendiculares ao seu eixo longitudinal e por isso os tipos de seções transversais mais adequados são aqueles com maior inércia no plano da flexão. Portanto, o ideal é concentrar as áreas em duas chapas, uma superior e uma inferior, ligando-as por uma chapa fina. Com isso, os perfis mais utilizados para vigas são os de seção I ou H (laminados ou soldados). Entretanto, seu emprego deve obedecer às limitações de flambagem (PFEIL, 2009).

De acordo com Souza (2009), os estados limites últimos aplicáveis a elementos submetidos à flexão são: Flambagem Lateral com Torção (FLT), Flambagem Local da Mesa (FLM) e Flambagem Local da Alma (FLA). O momento fletor resistente da seção será o menor entre os momentos resistentes para cada um dos estados limites aplicáveis.

O momento fletor resistente de cálculo devido a FLM e FLA será o menor das três situações das Equações (28), (29) e (30).

$$a) \quad M_{Rd} = \frac{M_{p\ell}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (28)$$

$$b) \quad M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[ M_{p\ell} - (M_{p\ell} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{p\ell}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (29)$$

$$c) \quad M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{p\ell}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r \text{ (não aplicável à FLA)} \quad (30)$$

onde:

$M_{p\ell} = Z \cdot f_y =$  momento fletor de plastificação da seção transversal, em que:

Os valores do  $M_r$ ,  $M_{cr}$ ,  $\lambda$ ,  $\lambda_p$  e  $\lambda_r$  são calculados de acordo com o estado limite verificado. Na Tabela 2 estão os valores desses parâmetros para os casos estudados nesse trabalho, que são: perfis laminados, tipo W, não submetidos à esforços de tração.

Tabela 2 - Parâmetros referentes ao momento fletor resistente.

Tipo de seção e eixo de flexão	Estados limites aplicáveis	$M_r$	$M_{cr}$	$\lambda$	$\lambda_p$	$\lambda_r$
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U não sujeitas a momento de torção, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLM	$0,7 \cdot f_y \cdot W$	$\frac{0,69E}{\lambda^2} W$	$b / t$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$0,83 \sqrt{\frac{E}{\left(\frac{0,7 f_y}{k_c}\right)}}$
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (não estudada nesse trabalho)	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U fletidas em relação ao eixo de menor momento de inércia	FLM	$0,7 \cdot f_y \cdot W$	$\frac{0,69E}{\lambda^2} W$	$b / t$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$0,83 \sqrt{\frac{E}{\left(\frac{0,7 f_y}{k_c}\right)}}$
	FLA	$f_y W_{ef}$	$\frac{(W_{ef})^2}{W} f_y$	$\frac{h}{t_w}$	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Fonte: (ABNT, 2008).

## 2.2.5 Elementos Submetidos à Flexão Composta

Nas estruturas em pórticos rígidos, os elementos estão sujeitos a ação simultânea de flexão e compressão. Esse fenômeno é também chamado de flexo-compressão e os elementos de vigas-colunas, vigas-pilar, entre outros.

Para verificação de um elemento sob flexo-compressão, deve-se verificá-lo isoladamente para os esforços de compressão e de flexão e, além disso, verificar a interação desses dois esforços por meio das Equações (31) e (32) de interação (SOUZA, 2009):

a) para  $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$  :

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (31)$$

b) para  $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2$  :

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left( \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (32)$$

O momento fletor máximo, que ocorre no meio do vão, originado da ação do esforço normal na estrutura deformada (efeito de 2.<sup>a</sup> ordem), pode ser escrito como uma amplificação do momento primário  $M_1$  na forma da Equação (33) (PFEIL, 2009).

$$M_{Sd,máx} = B1 \cdot M1, \quad (33)$$

onde  $B1$  é calculado conforma a Equação (34).

$$B1 = \frac{C_m}{1 - \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}}} \quad (34)$$

Conservadoramente, em casos de hastes com extremidades indeslocáveis sujeitas a cargas transversais favoráveis,  $C_m$  pode ser adotado igual 1 (SALMON; JOHNSON; MALHAS, 2008).

### 2.2.6 Deslocamento Máximo

A NBR 8800 de 2008, na sua Tabela C.1, apresenta os deslocamentos máximos admitidos para diversas situações. Segue duas situações da Tabela C.1 de deslocamentos máximos: vigas que suportam pilares e pilares de edifícios de dois ou mais pavimentos. O deslocamento máximo para o primeiro e segundo caso são calculados conforme as Equações (35) e (36), respectivamente.

$$d_{máx} = \frac{L}{500} \quad (35)$$

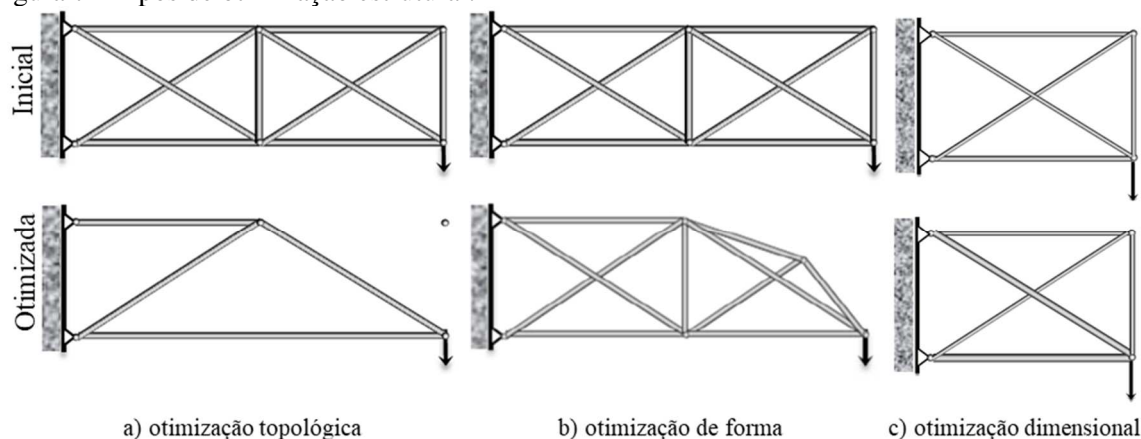
$$d_{máx} = \frac{H}{400} \quad (36)$$

## 2.3 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

A otimização estrutural pode ser dividida em três tipos: otimização de forma, otimização dimensional e otimização topológica (PIZZIRANI, 2003).

Como o próprio nome diz, na otimização de forma seu objetivo é encontrar a melhor forma da estrutura, ou seja, como os elementos estão distribuídos no sistema. Já na otimização dimensional, a forma é conhecida e o objetivo é otimizar a estrutura ajustando o tamanho dos componentes. A otimização topológica é a mais geral dentro do campo da otimização estrutural, pois seu propósito geral é encontrar a distribuição ótima do material dentro de um elemento. Na Figura 7, temos exemplos dos três tipos de otimização estrutural.

Figura 7 - Tipos de otimização estrutural.



Fonte: (PIZZIRANI, 2003).

Os métodos de otimização dividem-se em dois grandes grupos: *métodos determinísticos* e *métodos não-determinísticos*. Os métodos determinísticos são também denominados de métodos clássicos e baseiam-se, em geral, no cálculo de derivadas de primeira ordem ou em aproximações destas, ou também no cálculo de derivadas parciais de segunda ordem. Já os métodos de otimização não-determinísticos, são técnicas que imitam, de forma simplificada, fenômenos ou processos encontrados na natureza (OLIVIERI, 2004).

No contexto dos métodos não-determinísticos, Olivieri (2004) destaca a Inteligência Computacional e suas ramificações: a *computação evolutiva*, a *lógica fuzzy* e as *redes neurais artificiais*.

As técnicas de computação evolucionária (ou evolutiva) foram inspiradas na teoria da evolução das espécies ou na observação de colônias de insetos buscando alimento, ou ainda no sistema imunológico dos mamíferos defendendo o organismo contra invasores (HIROSHI; TAKAHASHI, 2011).

Segundo Hiroshi e Takahashi (2011), atualmente existem diversas técnicas evolutivas, das quais podemos citar: Otimização por Colônias de Formigas (ACO), Otimização por Enxame de Partículas (PSO), Colônia de Abelhas Artificiais (ABC) Busca Harmônica (HS) e Evolução Diferencial (DE), além de diversos algoritmos evolutivos híbridos. Hiroshi e Takahashi (2011) complementam que a que mais destaca para resolução de problemas de engenharia são os Algoritmos Genéticos (AG).

Algoritmos genéticos são algoritmos de otimização numérica inspirados tanto na seleção natural quanto na genética natural. O método é geral, capaz de ser aplicado a uma gama extremamente ampla de problemas. Os algoritmos são simples de entender e o código de computador necessário é fácil de escrever (COLEY, 2009).

Desde o início, os cientistas da computação tiveram visões de sistemas que imitavam um ou mais dos atributos da vida. A ideia de usar uma população de soluções para resolver problemas práticos de otimização de engenharia foi considerada várias vezes durante os anos 1950 e 1960. No entanto, os AG foram, em essência, inventado por John Holland nos anos 60 (COLEY, 2009).

Conforme Silva (2011), dentre os demais algoritmos evolucionários, nota-se que os AG faz uso de uma nomenclatura muito mais próxima da utilizada em genética das populações para definir seus componentes e operadores.

### **2.3.1 Terminologia**

Devido ao fato de os Algoritmos Genéticos serem uma metáfora da evolução dos seres vivos, que incorpora alguns conceitos da genética, eles possuem muitos termos originados da biologia. A seguir, a lista mostra alguns dos principais termos encontrados na literatura e que serão utilizados ao longo deste trabalho (RIBEIRO, 2008).

- *Geração*: número de interações que o programa executa durante o processo evolutivo. Quanto mais complexo for o problema em estudo, maior será quantidade de gerações;
- *Cromossomo*: cadeias binárias de comprimento finito que carregam as informações genéticas do indivíduo, representam um ponto no espaço de busca;
- *Indivíduos*: uma possível solução do problema. É representado pelo cromossomo e pelas variáveis do problema;
- *População*: conjunto de indivíduos, informado pelo usuário, que irá ser analisado para determinação das melhores soluções. Estimativa inicial;
- *Genótipo*: informação contida no cromossomo e uma solução potencial para um problema;

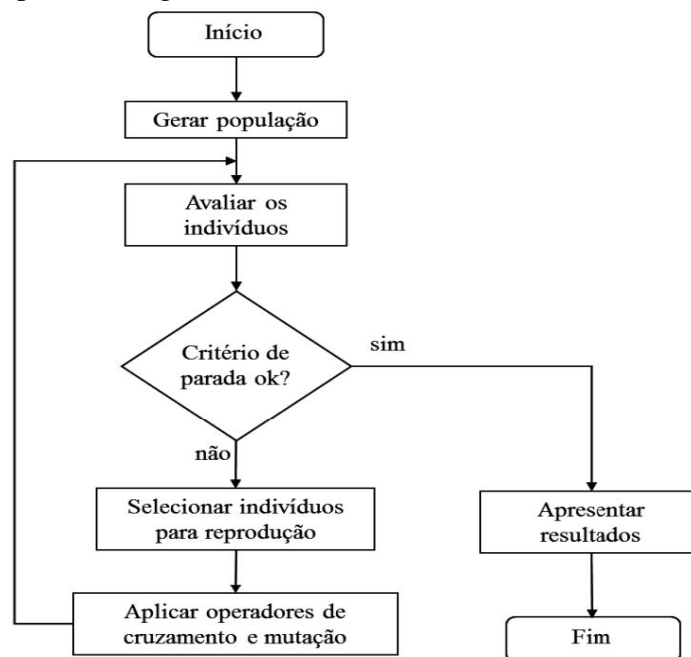
- *Função Aptidão*: função que mede a adequabilidade de um cromossomo.

Após ser gerada uma população de cromossomos, que representam possíveis soluções de um problema, a população é avaliada e cada cromossomo recebe uma avaliação, ou seja, a sua aptidão. Assim como na lei de Darwin, os cromossomos com maior probabilidade para os mais aptos são selecionados para a próxima geração. Através de uma reprodução simulada por meio de dois operadores genéticos, cruzamento e mutação, os selecionados transferem suas características para seus descendentes. Até que seja encontrada uma solução satisfatória todo o processo é repetido.

A Figura 8 apresenta um fluxograma genérico capaz de englobar a maioria dos Algoritmos Genéticos existentes.

Em processos de otimização estrutural, um cromossomo é um vetor de binário que gera a área do elemento e um indivíduo é um arranjo com os parâmetros de cada membro da estrutura.

Figura 8 - Fluxograma para o AG genérico.



Fonte: (PINHO, 2013).

### 2.3.2 Codificação

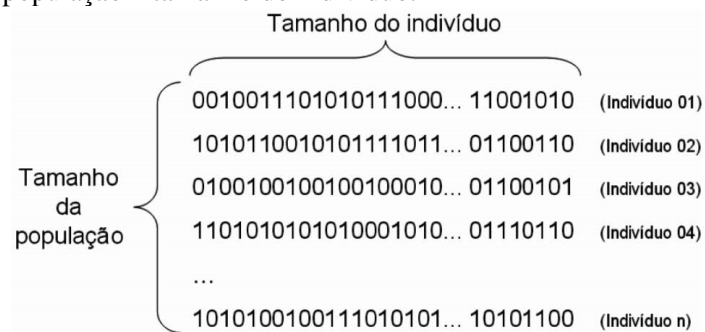
Os AG utilizam uma forma de representação codificada na identificação das variáveis e seus limites envolvidos no projeto visando a solução de um problema. Essa representação ou codificação das variáveis do projeto deve ser simples sem perder as características de representação do problema em questão e proporcionar um grande impacto no desempenho de busca (RIBEIRO, 2008).

Segundo Bernadino (2008), há várias formas de representação das variáveis do problema a ser resolvido por um algoritmo genético. Os principais tipos são:

- *Binária*: pode ser utilizado para codificar soluções em diversos tipos de problemas. Os principais são números inteiros e contínuos;
- *Real*: usualmente a mais adequada para problemas com variáveis contínuas, como as áreas dos membros de um sistema estrutural;
- *Permutação de símbolos*: adequado para o caso de problemas onde alguma ordenação é importante;
- *Árvore*: estrutura de dados conveniente para representar uma expressão algébrica em problemas de regressão simbólica.

A relação entre tamanho do indivíduo e de sua população, que utiliza a representação binária, é mostrada na Figura 9.

Figura 9 - Tamanho da população x tamanho do indivíduo.



Fonte: (PINHO, 2013).

### 2.3.3 População Inicial

Uma população é uma coleção de indivíduos. Além disso é constituída por uma série de indivíduos que estão sendo testados a partir de parâmetros que definem o indivíduo e de informações que caracterizam o espaço de pesquisa (SIVANANDAM; DEEPA, 2008).

Segundo Soares (2006), a população inicial de indivíduos pode ser obtida de duas formas: geradas aleatoriamente ou geradas por meio de uma heurística, relacionada às características específicas do problema.

É importante que a maior diversidade possível seja representada, independente da forma como é gerada a população. Para que o algoritmo funcione segundo a teoria da seleção natural é preciso que a técnica utilizada para a geração da população inicial cubra a maior área possível do espaço de busca, sendo necessário que os indivíduos possuam diferentes graus de adaptabilidade ao ambiente (TANOMARU, 1995).

De acordo com Torabi (2006), para aumentar a eficiência de um AG, é importante uma boa definição da população inicial, com tamanho razoável. Uma população pequena pode acarretar em um espaço de busca deficiente e com variedade genética muito pequena. Já populações muito grandes demandam muito tempo para se chegar a uma solução e acarretam em maiores esforços computacionais (FALCONE, 2004). Linden (2005) estabelece um intervalo entre 50 e 70 indivíduos por população para a solução dos problemas, no entanto, devendo atentar-se para a complexidade de cada problema.

### 2.3.4 Função Aptidão

A função de aptidão da população  $F(x)$  deve refletir os objetivos a serem alcançados na resolução do problema e é derivada diretamente das condições impostas por este (KOZA, 2006).

Também chamada de função de avaliação, a função aptidão avalia a capacidade de sobrevivência dos indivíduos da população durante o processo evolutivo. Essa medida avaliada pela função de aptidão serve como base para a classificação das soluções indicando a sua qualidade, ou seja, suas chances de passar para a geração posterior (RIBEIRO, 2008).

Uma limitação dos AG é não possuírem a habilidade de solucionar problemas com restrições, porém a maioria dos problemas apresentam restrições. Uma maneira de transformar um problema irrestrito em um problema restrito é a adição de uma função de penalidade  $pen(x)$  que incorpore todas as restrições do problema. Através dessa função o indivíduo somente será penalizado se alguma restrição for violada (FONSECA, 2007).

Para Ribeiro (2008), cada indivíduo possui um valor de aptidão que está associado a ele. Para um problema de otimização com restrições estruturais, a função aptidão pode ser definida como mostra a Equação (37).

$$F(x) = f(x) + pen(x) \quad (37)$$

em que,

$f(x)$  = função objetivo que, em geral, está ligada direta ou indiretamente ao critério econômico.

Visando a otimização do volume de uma estrutura, Lemonge (2010) apresenta como função objetivo  $f(x)$  a Equação (38) que diz: encontre o conjunto de áreas  $x = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_n\}$  que minimize o volume da estrutura.

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N_e} A_i L_i, \quad (38)$$

em que,

$N_e$  = sendo o número de barras;

$A$  = área da seção transversal do elemento;

$L$  = comprimento da  $i$ -ésima barra da estrutura.

Em estruturas reticuladas, as restrições em problemas de otimização referem-se, geralmente, a deslocamentos máximos dos nós, tensões máximas admissíveis, frequências de vibrações e cargas críticas de flambagem (SILVA, 2011).

De acordo com Adeli e Sarma (2006), uma função quadrática pode ser usada como função de penalidade para restringir problemas de otimização estrutural com relação aos deslocamentos máximos dos nós e as tensões máximas admissíveis, na forma:

$$pen(x) = \alpha \left[ \sum_{i=1}^{N_e} \left( \frac{|\sigma_i|}{|\sigma_i^a|} - 1 \right)^2 + \sum_{i=1}^M \left( \frac{|\delta_i|}{|\delta_i^a|} - 1 \right)^2 \right] \quad (39)$$

Nos dois termos da Equação (39) quanto mais as frações  $|\sigma_i|/|\sigma_i^a|$  e  $|\delta_i|/|\delta_i^a|$  se aproximam do valor 1, ou seja, quanto mais bem aproveitado o elemento, menor será a penalidade do indivíduo.

Além disso, Adeli e Sarma (2006) acrescentam à equação objetivo, Equação (38), a massa específica  $\rho$  do membro, a fim de otimizar a massa ao invés do volume, e um fator de normalização  $L_f$ , necessário para que a função objetivo e a função se tornem numericamente próximos um do outro, de modo que um termo não domine o outro. Com isso, a função aptidão torna-se:

$$f(x) = \frac{1}{L_f} \sum_{i=1}^{N_e} \rho_i A_i L_i + \alpha \left[ \sum_{i=1}^{N_e} \left( \frac{|\sigma_i|}{|\sigma_i^a|} - 1 \right)^2 + \sum_{i=1}^M \left( \frac{|\delta_i|}{|\delta_i^a|} - 1 \right)^2 \right]. \quad (40)$$

### 2.3.5 Seleção

Após os indivíduos terem passado pela função de aptidão, chega à etapa de selecionar os genitores do processo de reprodução. Nesta fase, os cromossomos com grande aptidão recebem uma maior probabilidade de serem copiados para uma população intermediária, de onde serão escolhidos para reprodução, aleatoriamente. Por outro lado, os indivíduos cujas funções de aptidão forem baixas, serão provavelmente descartados. Existem diferentes métodos de seleção: seleção por classificação, seleção por roleta, seleção por torneio, seleção elitista, dentre outros (OLIVIERI, 2004).

De acordo com Coley (2009), o método de seleção mais comum é o da roleta ou seleção proporcional à aptidão. Esse método faz uma analogia a uma roleta, porque considera que toda a população forma uma roleta, na qual cada indivíduo tem uma faixa proporcional a sua aptidão, de modo que, os indivíduos mais aptos terão maiores chances de serem escolhidos.

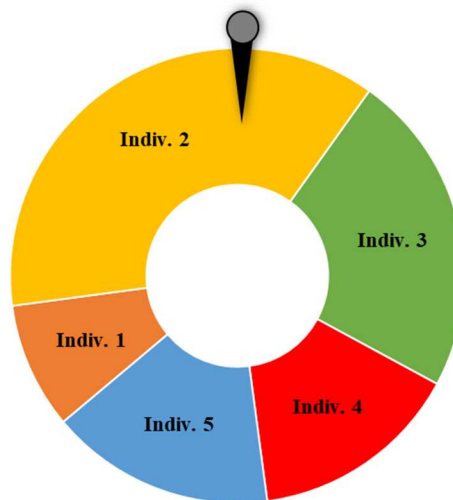
Segundo Pinho (2013), o método de seleção roleta foi proposto inicialmente por Holland em 1975.

Ribeiro (2008) expressa a probabilidade de seleção  $p_i$  de um indivíduo com aptidão  $F_i$ , em uma população de tamanho  $N_{pop}$  como na Equação (41).

$$p_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^{N_{pop}} F_i} \quad (41)$$

Na Figura 10, tem-se uma representação do método de seleção da roleta para uma população com 5 indivíduos e suas aptidões proporcionais.

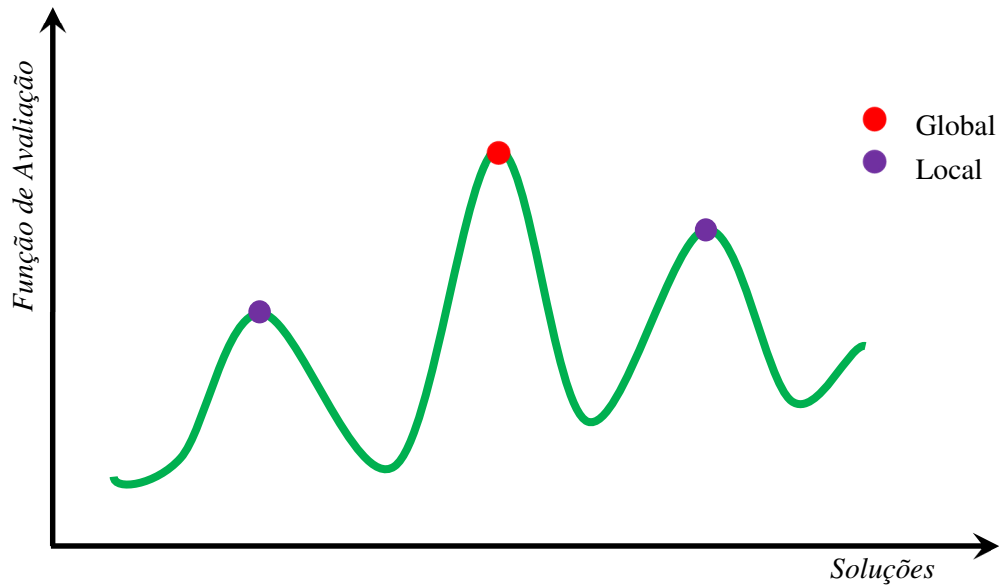
Figura 10 - Representação do método de seleção da roleta.



Fonte: Autor.

A desvantagem do método da roleta é possuir uma alta variância, que pode levar sorteios de um mesmo indivíduo que possui alto valor de aptidão, diminuindo a diversidade da população. Esta falha pode ocasionar uma convergência prematura do algoritmo para uma solução local, e, por outro lado, quando a evolução está avançada, observa-se uma estagnação do algoritmo (BARBOZA, 2005). Um exemplo genérico de soluções locais e globais pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 - Exemplo genérico de soluções locais e globais.



Fonte: Autor.

### 2.3.6 Operadores Genéticos

Os operadores genéticos têm a finalidade de melhorar as características de aptidão adquirida nas gerações anteriores, transformando a população ao longo de suas gerações. Portanto, são extremamente importantes pois possibilitam a exploração de diferentes pontos do domínio do problema, à medida que diversifica o espaço de busca. Os principais operadores estão listados abaixo (RIBEIRO, 2008).

#### 2.3.6.1 Cruzamento (Crossover)

Na reprodução sexuada, como aparece no mundo real, o material genético dos dois pais é misturado quando os gametas dos pais se fundem. Geralmente, os cromossomos são divididos aleatoriamente e mesclados, com a consequência de que alguns genes de uma criança vêm de um dos pais, enquanto outros vêm do outro pai. Esse mecanismo é chamado de cruzamento.

Bodenhofer (2004) relata que essa é uma ferramenta muito poderosa para introduzir novo material genético e manter a diversidade genética, mas com a propriedade notável de que bons pais também produzem filhos com bom desempenho ou até melhores. Várias investigações chegaram à conclusão de que o *crossover* é a razão pela qual as espécies sexualmente reprodutoras se adaptaram mais rápido do que as que se reproduzem assexuadamente.

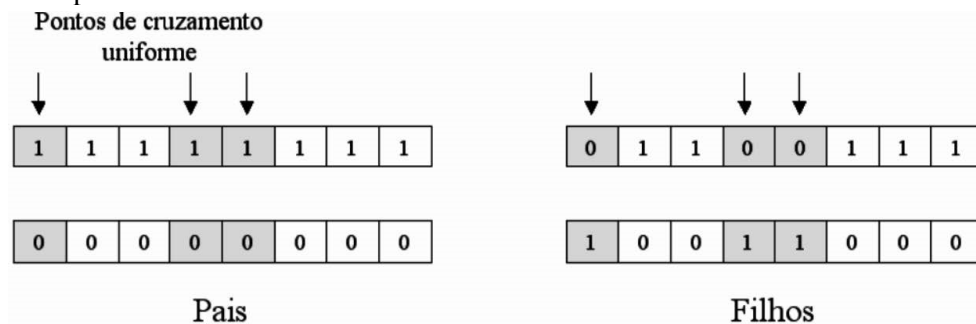
Existem vários métodos de cruzamento, e eles diferem entre si pela escolha do lócus (posição de um bit) do indivíduo a ser trocado entre os indivíduos pais, e pela maneira como será feita esta troca (PINHO et al., 2013).

A seguir são listados os tipos mais comuns de cruzamentos encontrados na literatura:

a) *Cruzamento uniforme:*

O cruzamento uniforme é baseado em um indivíduo binário criado aleatoriamente, chamado de máscara (SYSWERDA, 1989). Indivíduos pais são solicitados a mudar os bits nas posições onde a posição correspondente na máscara é zero. Caso contrário, nenhuma troca de bits é executada. A porcentagem de bits trocados entre dois indivíduos pais pode variar de 0 a 50%, controlando a porcentagem de zeros no indivíduo de máscara (ADELI; SARMA, 2006). Exemplo de cruzamento uniforme é visto na Figura 12.

Figura 12 - Exemplo de cruzamento uniforme.

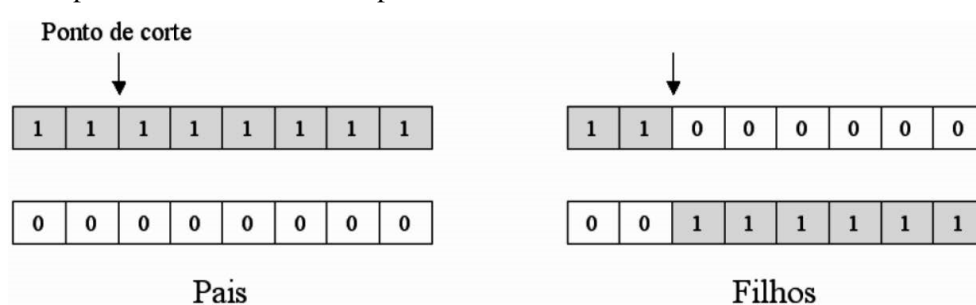


Fonte: (PINHO, 2013).

b) *Cruzamento de um ponto*

Neste tipo de cruzamento, um ponto de corte é escolhido aleatoriamente e a partir deste ponto as informações genéticas dos pais serão trocadas. As informações anteriores a este ponto em um dos pais são ligadas às informações posteriores a este ponto no outro pai (BARBOZA, 2005). Exemplo de cruzamento de um ponto é visto na Figura 13.

Figura 13 - Exemplo de cruzamento de um ponto.

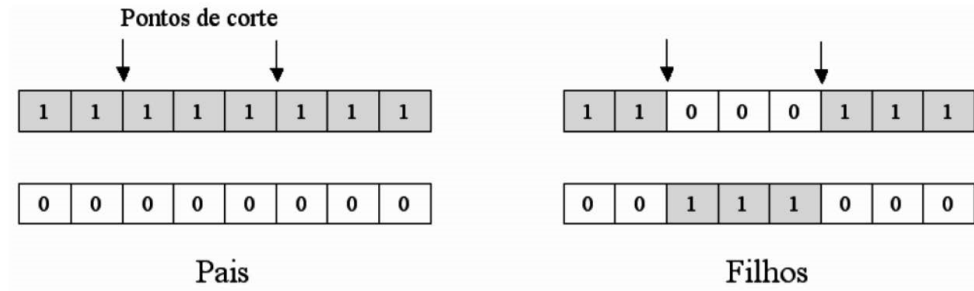


Fonte: (PINHO, 2013).

c) *Cruzamento de dois pontos*

Já no cruzamento de dois pontos, dois pontos de corte são escolhidos aleatoriamente e a partir destes pontos as informações genéticas dos pais serão trocadas. Todo o material genético dos pais existente entre os dois pontos de corte é trocado e o restante mantém-se inalterado (BARBOZA, 2005). Exemplo de cruzamento de um ponto é visto na Figura 14.

Figura 14 - Exemplo de cruzamento de dois pontos.



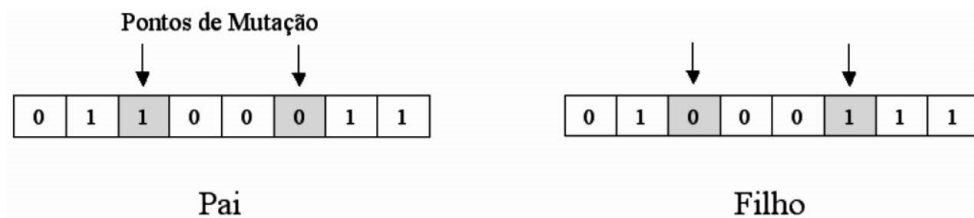
Fonte: (PINHO, 2013).

2.3.6.2 Mutação

Para Ribeiro (2008), o operador mutação altera, de forma arbitrária, um ou mais componentes de uma dada estrutura, com a função de introduzir e manter a diversidade genética de uma população, como exemplificado na Figura 15. Sendo assim, a mutação assegura que a probabilidade de examinar qualquer ponto do espaço de busca nunca seja zero, e também contorna o problema de mínimos locais.

O processo de mutação protege o algoritmo da perda de material genético potencialmente útil pela aplicação dos operadores reprodução e recombinação, além de permitir que o algoritmo faça buscas em diferentes regiões do espaço.

Figura 15 - Exemplo de uma mutação binária simples.



Fonte: (PINHO, 2013).

Segundo Coley (2009), a probabilidade de mutação  $P_m$  é tipicamente na ordem de 0,001, isto é, um bit em cada mil sofrerá mutação. Porém, assim como tudo nos AG, a configuração correta para probabilidade de mutação  $P_m$  será dependente do problema, podendo ser calculada conforme a Equação (42).

$$P_m = \frac{1}{TSLeng} \quad (42)$$

em que,  $TSLeng$  é igual ao tamanho do cromossomo multiplicado pela quantidade de variáveis desconhecidas.

### 2.3.7 Seleção Elitista

A seleção elitista não é necessariamente um método de seleção, entretanto, tal método pode ser utilizado em conjunto com outros métodos de seleção.

A maioria dos métodos de seleção descarta a geração anterior e consideram apenas os descendentes obtidos para composição da geração futura. Desta forma, a técnica elitista consiste em copiar o indivíduo melhor avaliado de uma geração para a seguinte, evitando a perda de informações importantes presentes nesses indivíduos (BENTO; KAGAN, 2008).

De acordo com Heitkötter (1999), o uso do elitismo garante que o peso máximo da população nunca diminua a partir da primeira geração até a próxima, o que acaba produzindo como resultado uma convergência acentuada da população.

### 2.3.8 Escalonamento

Nas primeiras gerações da execução de um AG, é interessante que a seleção não seja um processo muito rigoroso, de modo que mesmo indivíduos de baixa qualidade relativa tenham alguma chance de evoluir. Em contrapartida, nas últimas gerações é interessante aumentar a pressão seletiva, pois os indivíduos tendem a ter valores de adequabilidade muito próximos, o que acaba dificultando que os melhores indivíduos se destaquem na população (TANOMARU, 1995).

Na tentativa de resolver o problema de pressão seletiva, surgiram variações do AG com alguns métodos de escalonamentos: escalamento linear, graduação, corte pelo desvio padrão e o de “nicho” e compartilhamento (TANOMARU, 1995). Neste trabalho, foi utilizado o método de escalonamento linear. Para esse método, Goldberg (1989) apresenta a expressão da Equação (43).

$$s(x) = a \cdot f(x) + b \quad (43)$$

Os coeficientes  $a$  e  $b$  podem receber valores distintos, a depender da veracidade da desigualdade da Equação (44).

$$f_{\min} \geq \frac{c \cdot f_{\text{med}} - f_{\text{máx}}}{c - 1} \quad (44)$$

Caso a desigualdade da Equação (44) seja verdadeira,  $a$  e  $b$  receberam os valores como na Equação (45):

$$\begin{cases} a = \frac{f_{\text{med}}(c-1)}{f_{\text{máx}} - f_{\text{med}}} \\ b = (1-a) \cdot f_{\text{med}} \end{cases} \quad (45)$$

Em caso de ser falsa, terão seus valores como na Equação (46).

$$\begin{cases} a = \frac{f_{\text{med}}}{f_{\text{máx}} - f_{\text{min}}} \\ b = -\frac{f_{\text{med}} \cdot f_{\text{min}}}{f_{\text{med}} - f_{\text{min}}} \end{cases} \quad (46)$$

É fundamental a escolha do fator de escala  $c$  apropriada para cada problema. Tanomaru (1995) explica que uma alta pressão seletiva tende a fazer a diversidade cair rapidamente, levando a população a convergir em poucas gerações, podendo resultar em convergência prematura, e que por outro lado uma baixa pressão seletiva pode tornar o processo de busca proibitivamente lento.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na Tabela 3 a seguir, encontram-se em resumo as limitações, o alcance e demais parâmetros que foram utilizados nesse trabalho.

Tabela 3 - Resumo dos parâmetros adotados no trabalho.

<b>Análise Estrutural</b>	
Método:	Método da Rigidez Direta (MRD)
Estrutura:	Reticulada - Pórticos Planos
Carregamento:	Cargas nodais combinadas
<b>Dimensionamento</b>	
Norma:	NBR 8800:2008
Tipos de Tensões:	Tração; Compressão; Flexão Simples; Flexão Composta
Perfis:	W, laminados
Catálogos:	1 - <i>Perfis estruturais Gerdau: Tabela de Bitolas</i> ; 2 - <i>AISC Shapes Database V15.1H - Historics na versão LRFD 3</i>
Situações:	Vigas que suportam pilares; Pilares de edifícios de dois ou mais pavimentos
<b>Otimização Estrutural</b>	
Tipo:	Otimização Dimensional
Método:	Não-determinístico
Computação Evolutiva:	Algoritmos Genéticos
Método de Seleção:	Método da Roleta
Tipo de cruzamento:	Cruzamento de um ponto
Linguagem de Programação:	<i>Python 3.7</i>

### 3.1 DESENVOLVIMENTO DA FUNÇÃO DE APTIDÃO

Para que o método de otimização via algoritmos genéticos se adequasse ao objetivo do algoritmo desenvolvido nesse trabalho, se fez necessário o estudo da função aptidão e realizar algumas adaptações na mesma. Essas alterações foram realizadas a partir da equação apresentada por Adeli e Sarma (2006), Equação (40).

As frações do termo referente a função  $pen(x)$  foram aqui denominadas de *fatores de segurança*, sendo:

$FS_t$  = fator de segurança em relação as tensões do membro;

$FS_d$  = fator de segurança em relação aos deslocamentos nodais do membro.

De modo a atender aos critérios exigidos pela NBR 8800 de 2008 nas Equações (12), (15), (26), (31) e (32), os  $FS_t$  de cada membro dependerá dos esforços nos quais ele está submetido, podendo receber os seguintes valores:

a) para elementos tracionados:

$$FS_t = \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \quad (47)$$

b) para elementos comprimidos:

$$FS_t = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \quad (48)$$

c) para elementos submetidos à flexão:

$$FS_t = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \quad (49)$$

d) para elementos submetidos às ações simultâneas de compressão e flexão, quando:

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

$$FS_t = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{z,Sd}}{M_{z,Rd}} \right) \quad (50)$$

e) para elementos submetidos às ações simultâneas de compressão e flexão, quando:

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

$$FS_t = \frac{N_{c,Sd}}{2N_{c,Rd}} + \frac{M_{z,Sd}}{M_{z,Rd}} \quad (51)$$

Como esse trabalho tratou-se de estudos em pórticos planos, ou seja, apenas em duas direções, os esforços de momentos serão considerados apenas no eixo  $z$ , como são utilizados nas Equações (50) e (51). Além disso, não foram utilizadas as tensões cisalhantes como fatores de segurança nos problemas estudados, pelo fato delas geralmente não governarem o dimensionamento, com exceção de casos específicos como vigas curtas ou com furos (CARRARO, 2015).

Em qualquer um dos casos listados acima,  $FS_t$  assumirá um valor que se aproximará de 0 quando as tensões solicitantes são muito menores que as tensões resistentes do elemento, ou seja,

$$S_d \ll R_d \quad \Rightarrow \quad FS_t \rightarrow 0, \quad (52)$$

significando que ele está sendo mal aproveitado, ou um valor que se aproximará de 1 quando as tensões solicitantes são menores, porém próximas, às tensões resistentes do elemento, ou seja,

$$S_d \rightarrow R_d \quad \Rightarrow \quad FS_t \rightarrow 1, \quad (53)$$

significando que ele está sendo bem aproveitado.

De maneira análoga ao  $FS_t$ , o  $FS_d$  receberá o seguinte valor:

$$FS_d = \frac{\text{maior}\{d_i\}}{d_{\text{máx}}} \quad (54)$$

No presente trabalho, o deslocamento máximo são calculados a partir das Equações (35) e (36), em que  $L$  e  $H$  são considerados iguais ao comprimento total de seus respectivos elementos.

A função penalidade torna-se então:

$$\text{pen}(x) = \alpha \left[ \sum_{i=1}^{Ne} (FS_t - 1)^2 + \sum_{i=1}^M (FS_d - 1)^2 \right] \quad (55)$$

É de interesse que, na solução resultante da última geração do algoritmo, nenhum  $FS$  dos elementos assumam valores maiores que 1. Sendo assim, a Equação (39) deixa de ser satisfatória em situações em que os fatores de segurança são muito próximos de 1, porém maiores. Quando isso acontece, os termos da mesma equação se aproximam de 0, de modo que o coeficiente de penalidade  $\alpha$  não tenha eficiência e elementos com  $FS$  não tão próximos de 1, porém menor, obtenha penalidades maiores que o anterior. Por exemplo:

Seja  $FS = 1,008$  e  $\alpha = 1,5$ :

$$\begin{aligned} pen(x) &= 1,5 \cdot (1,008 - 1)^2 \\ pen(x) &= 1,5 \cdot (0,000064) \\ pen(x) &= 0,000096. \end{aligned} \tag{56}$$

No entanto, para  $FS = 0,90$ :

$$\begin{aligned} pen(x) &= (0,90 - 1)^2 \\ pen(x) &= 0,01. \end{aligned} \tag{57}$$

Esse fato faz com o algoritmo tenha convergência para soluções com fatores de segurança maiores que 1.

Para corrigir essa inadequação, a função penalidade foi adaptada para a forma seguir, nos casos em que:

a)  $FS_t > 1$ :

$$pen(x) = FS_t \tag{58}$$

b)  $FS_d > 1$ :

$$pen(x) = FS_d \tag{59}$$

c)  $FS_t > 1$  e  $FS_d > 1$ :

$$pen(x) = FS_t + FS_d \tag{60}$$

Com essa adaptação, os elementos cujo fator de segurança não ultrapasse o valor limite,  $FS \leq 1$ , continuarão sendo penalizados conforme a Equação (55), com  $\alpha = 1$ , tendo valor máximo igual a 1. Já aqueles cujo fator de segurança ultrapasse o valor 1, utilizarão uma das Equações (58), (59) ou (60) como função  $pen(x)$ , sendo penalizado com valor mínimo também maior que 1. Desse modo, a penalidade desse caso será sempre maior que qualquer penalidade do caso anterior e, quanto maior for o valor do  $FS$ , maior será a penalidade do elemento.

A função objetivo também sofrera alteração com o propósito de se adequar as informações fornecidas nos catálogos *Perfis Estruturais Gerdau: Tabela de Bitolas* e *AISC Shapes Database V15.1H - Historic. Edição LRFD 3*, utilizados nesse trabalho. Nesses catálogos são fornecidos os valores da massa de cada perfil pelo comprimento unitário do mesmo  $\omega(kg/m)$ .

Logo, para obtermos a otimização da massa basta utilizarmos a função objetivo como sendo:

$$f(x) = \frac{1}{L_f} \sum_{i=1}^{Ne} \omega_i L_i . \quad (61)$$

Portanto, a função  $F(x)$  passa a ser:

$$F(x) = \frac{1}{L_f} \sum_{i=1}^{Ne} \omega_i L_i + pen(x), \quad (62)$$

em que,  $pen(x)$  assumirá um dos valores Equações (55), (58), (59) ou (60).

Para que se possa trabalhar com um algoritmo de maximização e o objetivo desse trabalho é que a função  $F(x)$  tenha o menor valor possível, a função aptidão utilizada para os problemas desse trabalho foi:

$$F'(x) = \frac{1}{F(x)}, \quad (63)$$

ou seja,

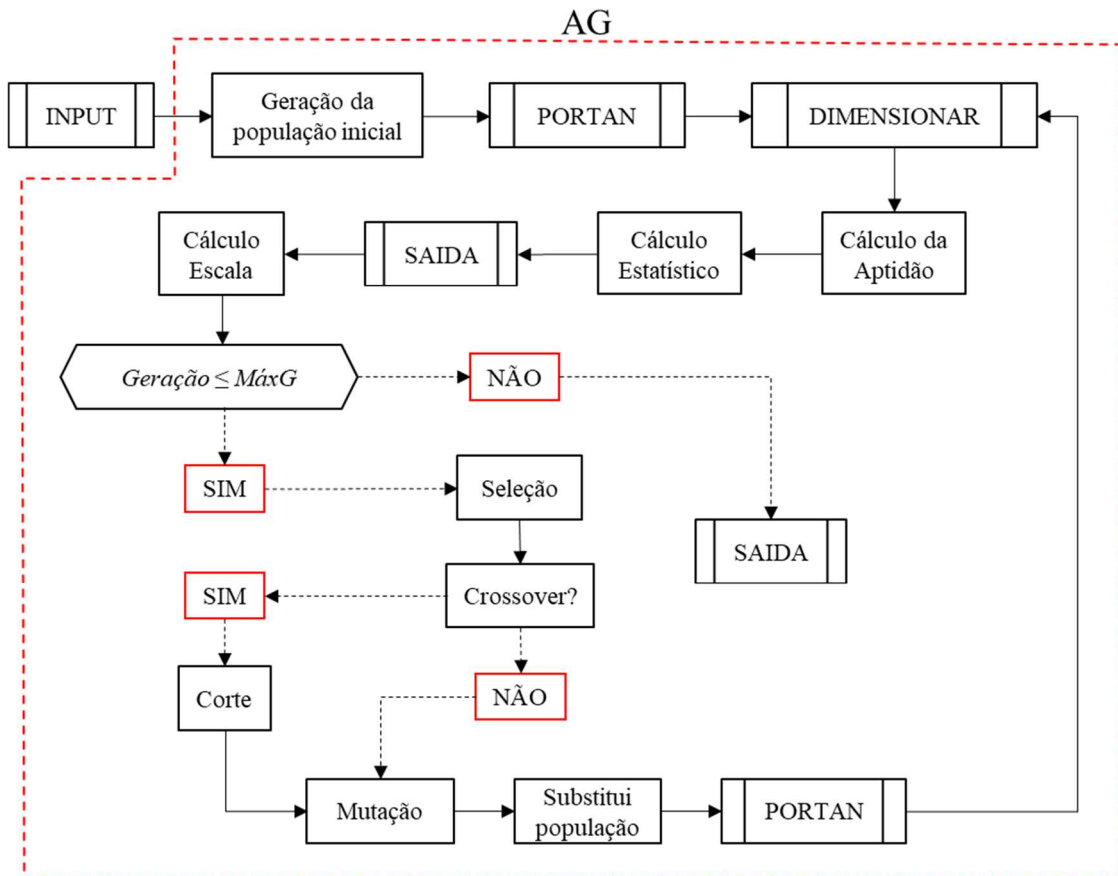
$$F'(x) = \frac{1}{\frac{1}{L_f} \sum_{i=1}^{Ne} \omega_i L_i + pen(x)} . \quad (64)$$

### 3.2 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

O desenvolvimento do algoritmo de otimização foi realizado através da linguagem computacional *Python*, versão 3.7, com rotinas desenvolvidas utilizando somente a biblioteca padrão da linguagem, ou seja, sem a utilização de módulos externos. O algoritmo contará com cinco grandes rotinas: rotina de entrada de dados (*INPUT*), rotina de análise estrutural (*PORTAN*), rotina de dimensionamento (*DIMENSIONAR*), rotina de otimização via Algoritmos Genéticos e rotina de saída de dados (*SAIDA*).

A Figura 16 a seguir, apresenta um fluxograma do algoritmo como um todo, no qual a rotina de otimização via Algoritmos Genéticos (*AG*) engloba todas as demais rotinas, com exceção da rotina *INPUT*, e suas respectivas sub-rotinas.

Figura 16 - Fluxograma do funcionamento do algoritmo de otimização.



Fonte: Autor.

### 3.2.1 Rotina de Entrada (INPUT)

Por meio de um arquivo externo com extensão “.txt”, a rotina de entrada *INPUT* estará encarregada de receber um resumo das informações do pórtico e em seguida os detalhes dessas informações. Ela também é responsável por armazenar os parâmetros necessários para otimização do Algoritmo Genético.

As informações do pórtico que devem ser armazenadas inicialmente são as apresentadas na Tabela 4, em que todas as variáveis são valores inteiros. Após esses dados, são passados à rotina de entrada os detalhes da estrutura: as coordenadas de cada nó (cm); o tipo, a conectividade e condição de rigidez de cada membro; o carregamento atuante (kN ou kN.cm) em cada nó com suas respectivas direções e as condições de contorno dos apoios.

Para que a condição de rigidez nos membros seja identificada, é necessário atribuir um dos valores a seguir à variável *IRZ*, a depender do caso e questão:

- IRZ* = 11, para nós inicial e final rigidamente conectados;
- IRZ* = 12, para nó final rótula e inicial rígido;
- IRZ* = 21, para nó inicial rótula e final rígido;
- IRZ* = 22, para nó inicial e final rótulas.

Tabela 4 - Variáveis resumo do pórtico para rotina de entrada.

Variável	Descrição	Variável	Descrição
$N_n$	número de nós	$N_{ne}$	número de nós por elemento
$N_e$	número de elementos	$N_{cn}$	número de cargas nodais
$N_{GL}$	número de graus de liberdade dos nós	$N_{cc}$	número de condições de contorno
$E$	módulo de elasticidade do aço	$f_y$	tensão de escoamento do aço
$f_u$	tensão de ruptura do aço	$ORT$	orientação do perfil <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Orientação com maior inércia = 1. Orientação com menor inércia = 2.

Outra informação a ser passada é o tipo de elemento (pilar ou viga), pois só assim o programa saberá qual das Equações (35) ou (36) ele deverá utilizar para o cálculo do deslocamento máximo.

Quanto as condições de contorno, para os nós que servirão de apoio à estrutura deverá ser atribuído o valor 0 na direção em que o deslocamento será impedido.

Essa rotina deve também receber as variáveis listadas na Tabela 5, utilizadas na rotina AG, e os dados dos perfis do catálogo selecionado também por meio de arquivos “.txt”.

Tabela 5 - Parâmetros para rotina de entrada do Algoritmo Genético.

Variável	Descrição	Variável	Descrição
$N_{pop}$	tamanho da população	$MáxG$	quantidade total de gerações
$N_v$	número de variáveis <sup>1</sup>	$P_c$	probabilidade de cruzamento
$N_{cromo}$	tamanho do cromossomo	$c$	fator de escala
$Elt$	aplicação do elitismo <sup>2</sup>	$L_f$	fator de normalização

<sup>1</sup>Nos problemas estudados, será igual ao número de membros da estrutura. <sup>2</sup>Sim = 1, Não = 0.

Na Figura A.1 do Apêndice A encontra-se um exemplo de arquivo de entrada, o qual fora utilizado para o problema do pórtico P00, caso 1.

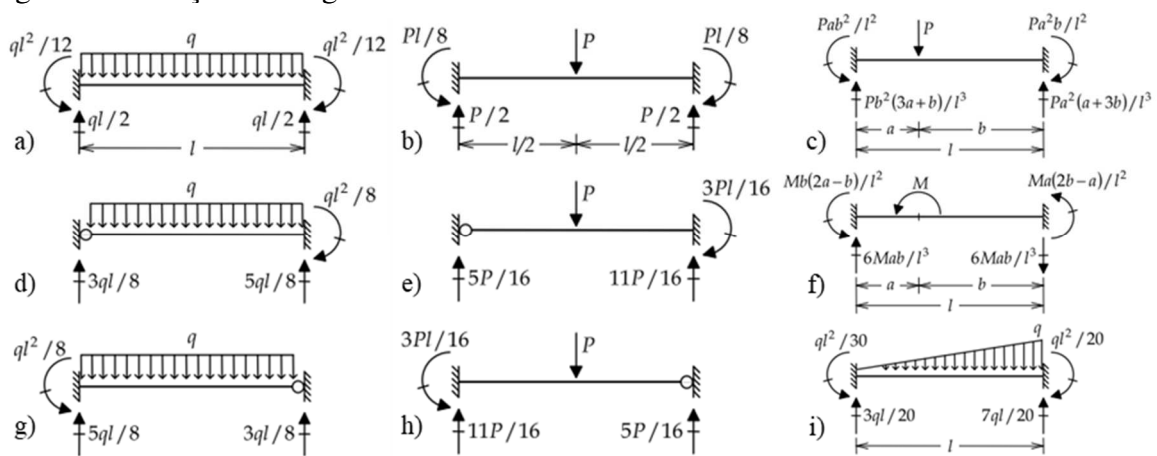
### 3.2.2 Rotina de Análise Estrutural (PORTAN)

A rotina *PORTAN* foi desenvolvida baseando-se nos códigos em linguagem *FORTRAN*, disponibilizados por Brebbia (1986). Ela é responsável por obter os esforços do sistema utilizando o Método da Rigidez Direta, detalhado no item 2.1. Essa rotina realiza a análise de toda a estrutura, através do método matricial, obtendo assim os deslocamentos nodais e esforços solicitantes nos membros.

Para a utilização do MRD na rotina *PORTAN*, as ações inseridas utilizadas para análise devem ser as *cargas nodais combinadas*, que resultam da combinação das *cargas nodais* propriamente ditas com as *cargas equivalentes nodais*. As *cargas nodais* propriamente ditas são forças e momentos que atuam diretamente sobre os nós e, segundo Martha (2018a), as *cargas equivalentes nodais* são as cargas nodais provenientes das reações de engastamento perfeito dos elementos de barra, calculados conforme Figura 17, com sentidos invertidos.

Além disso, as *cargas nodais combinadas* devem ser inseridas considerando a convenção de sinais adotadas como na Figura 18.

Figura 17 - Reações de engastamento de barras.



a) membro com primeiro e segundo nó engastados e carregamento distribuído; b) membro com primeiro e segundo nó engastados e carga concentrada centralizada; c) membro com primeiro e segundo nó engastados e carga concentrada; d) membro com primeiro com rotação permitida, segundo nó engastado e carregamento distribuído; e) membro com primeiro com rotação permitida, segundo nó engastado e carga concentrada; f) membro com primeiro e segundo nó engastados e momento concentrado; g) membro com primeiro nó engastado, segundo nó com rotação permitida e carregamento distribuído; h) membro com primeiro nó engastado, segundo nó com rotação permitida e carga concentrada; i) membro com primeiro e segundo nó engastados e carga triangular.

Fonte: (MARTHA, 2018a).

Figura 18 - Convenção de sinais adotada.

Deslocamentos horizontais	$\rightarrow +$	$\leftarrow -$	Momentos	$\curvearrowright +$	$\curvearrowleft -$
Deslocamentos verticais	$\uparrow +$	$\downarrow -$		Esforços axiais em extremidades de barra	$\rightarrow + \leftarrow -$
Rotações	$\curvearrowright +$	$\curvearrowleft -$	Esforços cortantes em extremidades de barra	$\uparrow + \downarrow -$	$\downarrow - \uparrow +$
Forças horizontais	$\rightarrow +$	$\leftarrow -$	Momentos fletores em extremidades de barra	$\oplus + \ominus -$	$\ominus - \oplus +$
Forças verticais	$\uparrow +$	$\downarrow -$			

Fonte: (MARTHA, 2018a)

### 3.2.3 Rotina de Dimensionamento (*DIMENSIONAR*)

Seguindo os preceitos da NBR 8800 de 2008 descritos no item 2.1, a rotina de dimensionamento calcula os esforços resistentes de projeto de cada elemento, necessários para garantir a segurança da estrutura. Os resultados dessa rotina serão utilizados na função de penalidade para o cálculo da aptidão total do indivíduo, pois é nessa função que são calculados os fatores de segurança relativos às tensões e ao deslocamento.

Essa rotina restringe-se a apenas perfis do tipo W e laminados. O tipo de aço poderá ser escolhido pelo usuário bastando informar o seu módulo de elasticidade  $E$ , sua tensão de escoamento  $f_y$  e tensão de ruptura  $f_u$ . Nos pórticos estudados, usou-se aço de baixa liga e alta resistência mecânica: A572 Grau 50 ( $f_y = 34,5 \text{ kN/cm}^2$  e  $f_u = 45,0 \text{ kN/cm}^2$ ).

### 3.2.4 Rotina de Otimização (*AG*)

Sendo a principal de todo o programa, a rotina do algoritmo genético é responsável por interligar as outras rotinas citadas e as suas respectivas sub-rotinas. É nela em que a estrutura será otimizada, os indivíduos serão gerados, enviados para análise e dimensionamento.

Nos problemas atendidos pela ferramenta desenvolvida nesse trabalho, a população inicial é gerada aleatoriamente com tantos cromossomos forem membros, para cada indivíduo da população. Após serem gerados em codificação binária, estes são convertidos em valores decimais (reais), que se relacionam a valores de áreas de seções transversais de perfis metálicos.

Posteriormente, os indivíduos são avaliados e punidos para que possam evoluir nas próximas gerações. Em seguida, é realizada o cálculo estatístico, para identificar quais dos indivíduos possuem maior e menor aptidão e a média dessas aptidões. Logo após, é feita a seleção dos indivíduos utilizando o método da roleta para tal. Nos indivíduos selecionados, são aplicados os operadores cruzamento de um ponto e a mutação. O cruzamento ocorre a depender da probabilidade de cruzamento fornecida pelo usuário, enquanto que a mutação ocorre de acordo a probabilidade calculada através da Equação (42), em que a quantidade de variáveis desconhecidas é igual a quantidade de elementos da estrutura.

Os resultados com o melhor arranjo de perfis, ou seja, com o indivíduo de maior valor da função aptidão encontrado em todas as gerações, são exportados por meio da rotina *SAIDA*.

### 3.2.5 Rotina de Exportação dos Resultados (SAIDA)

Por fim, mas não menos importante, a rotina *SAIDA* encarrega-se de que o indivíduo mais apto ao longo de todas as gerações seja exibido no arquivo “*XX-Resultados.txt*”, após a quantidade desejada de gerações for executada através da rotina *AG*.

O valor *XX* é igual ao nome do arquivo de entrada recebido na rotina *INPUT*. Por exemplo: seja o arquivo de entrada “*TCC.txt*”, o resultado do programa é visto no arquivo externo “*TCC-Resultados.txt*” criado por ele. Os dados exibidos no arquivo de saída são:

- as informações da estrutura, resumidas e detalhadas, recebidas na rotina *INPUT*;
- a aptidão e o arranjo de perfis do sistema com suas respectivas áreas (decimal e real), fatores de segurança, pesos<sup>2</sup> e massas (por elemento e total), para  $N_{pop}$  indivíduos em *MáxG* gerações;
- os deslocamentos, reações e forças internas nodais de cada elemento, para  $N_{pop}$  indivíduos em *MáxG* gerações;
- os mesmos dados dos itens b) e c), desta vez apenas para o melhor indivíduo, indicando qual fora o indivíduo, sua aptidão e a aptidão média da geração;
- e no final, os mesmos dados dos itens b) e c), desta vez apenas para o melhor indivíduo dentre todas as geração, indicando qual fora a geração, qual o indivíduo dessa geração e sua aptidão.

Nas Figura A.2 e Figura A.3 do Apêndice A, encontram-se exemplos genérico de um arquivo “.txt” de saída com os resultados da otimização de um determinado problema e os dados resumo do mesmo problema, respectivamente.

### 3.3 VALIDAÇÃO DAS ROTINAS

Na Tabela 6 a seguir, encontra-se um resumo dos problemas que foram objetos de estudo durante a elaboração do presente trabalho.

Tabela 6 - Resumo dos problemas estudados.

Pórtico	Origem	Pavimentos	Vãos	Membros	Nó	Tarefa	Catálogo	Casos
P00	Autor	1	1	2	3	Validação	1	3
P01	Literatura	3	2	15	12	Otimização; Comparação de custos;	1	5
P02	Literatura	10	1	30	22	Otimização	2	3

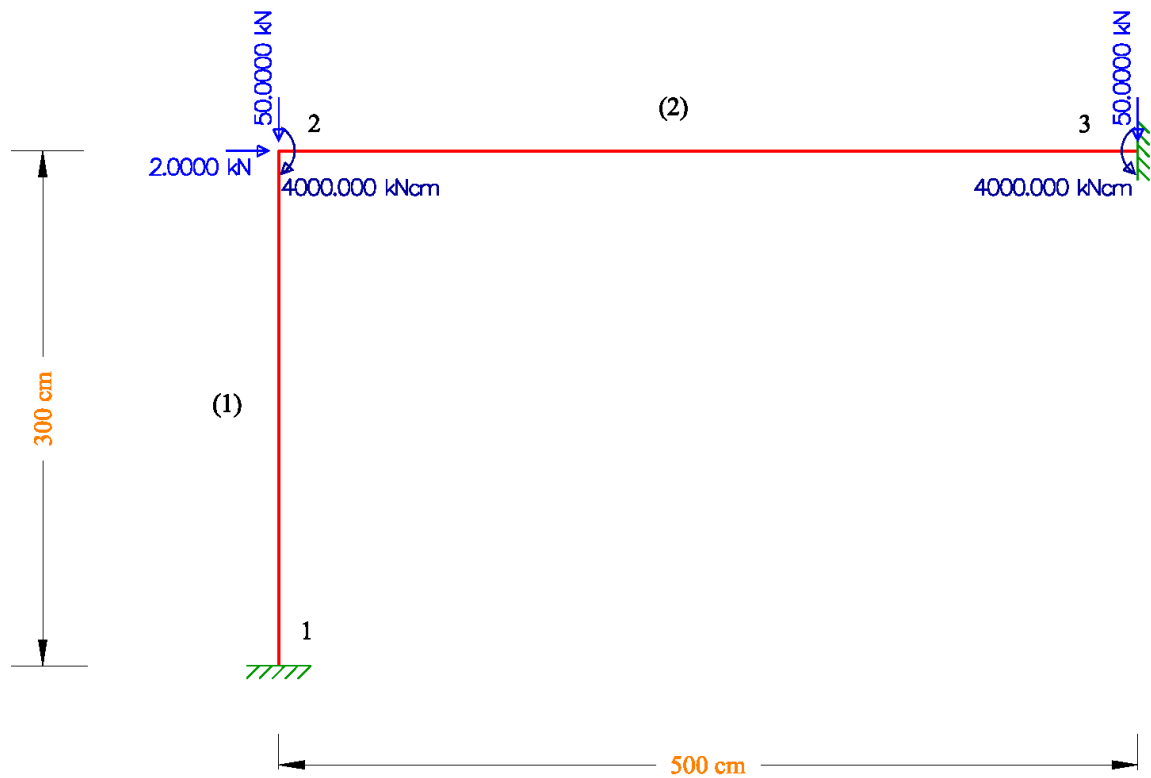
<sup>2</sup>Aqui, a coluna peso não está relacionada à força gravitacional, mas sim ao valor da função penalidade.

Para validar a eficiência as rotinas, foram realizados três testes, todos eles utilizando um pórtico composto por 1 pilar de 3 metros de altura e uma viga com 5 metros de vão, 3 nós, sendo o primeiro e o último engastados, e carregamentos como mostrados na Figura 19. Os parâmetros para os cálculos de análise e dimensionamento encontram-se na Tabela 7 e os demais dados do pórtico na Tabelas 8 e 9. Chamamos esse pórtico de Problema 0 (P00).

Tabela 7 - Dados do pórtico P00 para análise e dimensionamento estrutural.

$N_n$	$N_e$	$N_{GL}$	$N_{ne}$	$N_{cn}$	$N_{cc}$	$E$	$f_y$	$f_u$
3	2	3	2	5	6	20000	34,5	45,0

Figura 19 - Pórtico do problema para validação das rotinas.



Fonte: Autor.

Tabela 8 - Coordenadas nodais dos membros do pórtico P00.

Membro	Nó			Nó			IRZ	Tipo
	$i$	$x$ (cm)	$y$ (cm)	$j$	$x$ (cm)	$y$ (cm)		
1	1	0	0	2	0	300	11	Pilar
2	2	0	300	3	500	300	11	Viga

A condição de contorno com valor igual a 0 significa que não será permitido deslocamento daquele nó, naquela direção.

Tabela 9 - Cargas nodais e condições de contorno do pórtico P00.

Nó	Direção	Carga	Condição de contorno
1	1	-	0,0
	2	-	0,0
	3	-	0,0
2	1	2,0000 kN	-
	2	-50,0000 kN	-
	3	-4000,0000 kN.cm	-
3	1	-	0,0
	2	-50,0000 kN	0,0
	3	4000,0000 kN.cm	0,0

O primeiro teste consistiu em verificar os resultados fornecidos na rotina *PORTAN* comparando-os com os resultados gerados no software *Ftool – Two-Dimensional Frame Analysis Tool, versão 4.00.04 Básica*, para o pórtico P00 e com o mesmo conjunto de perfis.

Em seguida, fora testada a rotina *DIMENSIONAR*. Para isso, calculou-se manualmente os fatores de segurança do elemento 1 do pórtico P00 e comparou-os aos fatores de segurança gerados nessa rotina, para o mesmo elemento.

O último teste teve a finalidade de avaliar o comportamento do Algoritmo Genético. Para tanto, foram examinadas as aptidões máximas e médias das aptidões dos indivíduos ao longo das gerações, para 3 caso com diferentes parâmetros genéticos, Tabela 10. Foi verificado a existência ou não da convergência do algoritmo para soluções mais aptas e se essas soluções estão atendendo aos critérios da NBR 8800 de 2008, ou seja, todos os membros do pórtico com  $FS \leq 1$ .

Tabela 10 - Casos estudados para pórtico P00.

Caso	$N_{pop}$	$N_{cromo}$	$MáxG$	$P_c$	$c$	$Elt$	$E$	$f_y$	$f_u$
1	50	12	100	0,7	2	0	20000	34,5	45,0
2	50	12	100	0,7	2	1	20000	34,5	45,0
3	60	12	100	0,7	2	1	20000	34,5	45,0

### 3.4 PROBLEMAS

Afim de quantificar e qualificar os resultados do software, foram otimizados 2 problemas que foram objeto de estudo de outros autores: Pezeshk e Camp (2000), Carraro (2015) e Yamamoto (2015).

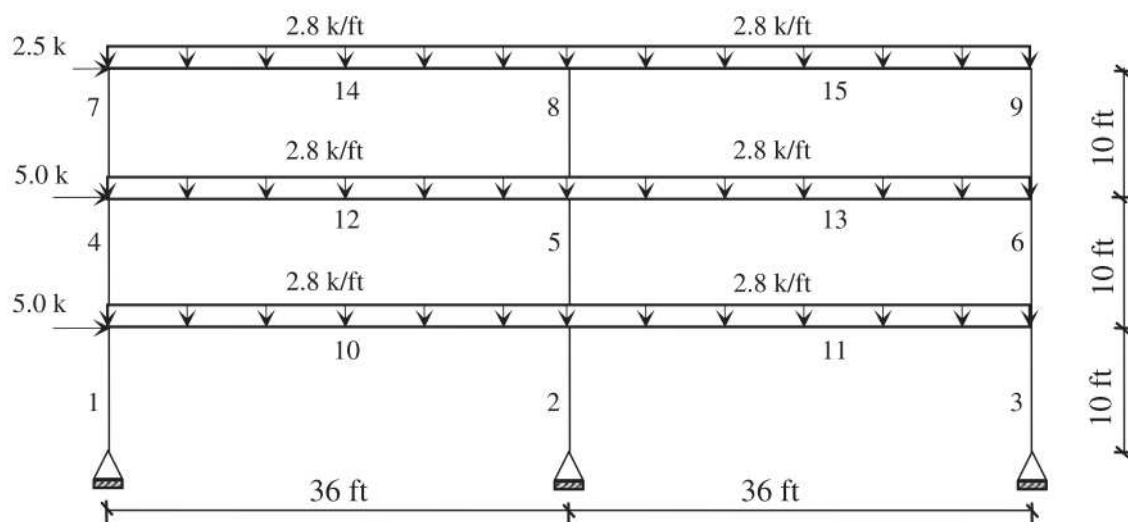
#### 3.4.1 Problema 1

O primeiro problema trata-se de um pórtico plano com 15 membros, dispostos em 2 vãos e 3 pavimentos, o qual chamaremos de P01. Nos trabalhos de Pezeshk e Camp (2000), Degertekin (2008), Carraro (2015) e Yamamoto (2015), os elementos foram agrupados entre pilares e vigas de modo que em um grupo todos os elementos devem ter o mesmo perfil. No entanto, essa restrição não foi imposta nesse trabalho. Além disso, o catálogo utilizado por esses autores foi o *AISC Shapes Database V15.1H - Historics* na versão LRFD 3 com 267 perfis do tipo W e, para esse estudo, utilizou-se o catálogo *Perfis estruturais Gerdau: Tabela de Bitolas*, que contém 88 perfis do tipo W, aço A572 Grau 50.

Os carregamentos da Figura 20 já se encontram fatoradas com as provisões normativas, dispensando uma posterior ponderação das ações.

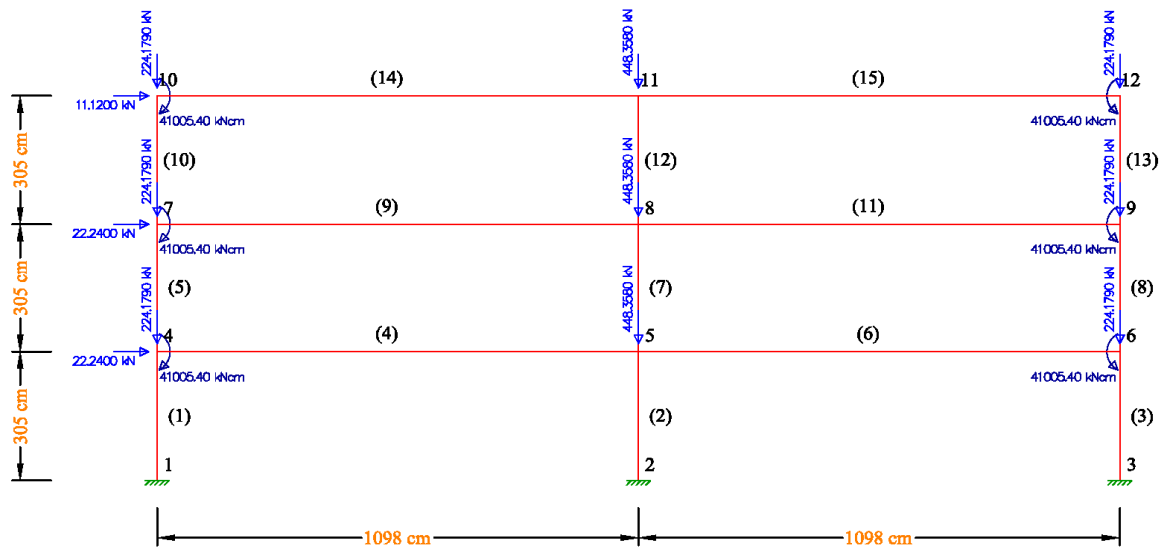
Para que o problema se enquadre ao programa de otimização, foram necessárias duas alterações: converter as suas unidades de medidas ( $1 \text{ k} = 4,448 \text{ kN}$  e  $1 \text{ ft} = 30,48 \text{ cm}$ ) e transformar as cargas distribuídas nas barras em cargas nodais combinadas. Feito isso, o pórtico P01 que será utilizado para otimização é o exibido na Figura 21. Seus parâmetros necessários para os as rotinas *INPUT* e *DIMENSIONAR* estão expostos na Tabela 11.

Figura 20 - Pórtico P01.



Fonte: (PEZESHK; CAMP, 2000).

Figura 21 - Pórtico P01 corrigido para o programa de otimização.



Fonte: Autor.

Tabela 11 - Dados do pórtico P01 para análise e dimensionamento estrutural.

$N_n$	$N_e$	$N_{GL}$	$N_{ne}$	$N_{cn}$	$N_{cc}$	$E$	$f_y$	$f_u$
12	15	3	2	18	9	20000	34,5	45,0

Para melhor interpretação das informações do pórtico P01, seus dados seguem apresentados nas Tabela 12 e 13.

Tabela 12 - Coordenadas nodais dos membros do pórtico P01.

Elemento	Nó			Nó			IRZ	Tipo
	$i$	$x$ (cm)	$y$ (cm)	$j$	$x$ (cm)	$y$ (cm)		
1	1	0	0	4	0	305	11	Pilar
2	2	1098	0	5	1098	305	11	Pilar
3	3	2196	0	6	2196	305	11	Pilar
4	4	0	305	5	1098	305	11	Viga
5	4	0	305	7	0	610	11	Pilar
6	5	1098	305	6	2196	305	11	Viga
7	5	1098	305	8	1098	610	11	Pilar
8	6	2196	305	9	2196	610	11	Pilar
9	7	0	610	8	1098	610	11	Viga
10	7	0	610	10	0	915	11	Pilar
11	8	1098	610	9	2196	610	11	Viga
12	8	1098	610	11	1098	915	11	Pilar
13	9	2196	610	12	2196	915	11	Pilar
14	10	0	915	11	1098	915	11	Viga
15	11	1098	915	12	2196	915	11	Viga

Tabela 13 - Cargas nodais e condições de contorno do pórtico P01.

Nó	Direção	Carga	Contorno	Nó	Direção	Carga	Contorno
1	1	-	0,0	7	1	22,25 kN	-
	2	-	0,0		2	-224,28 kN	-
	3	-	0,0		3	-41043,24 kN.cm	-
2	1	-	0,0	8	1	-	-
	2	-	0,0		2	-448,56 kN	-
	3	-	0,0		3	-	-
3	1	-	0,0	9	1	-	-
	2	-	0,0		2	-224,28 kN	-
	3	-	0,0		3	41043,24 kN.cm	-
4	1	22,25 kN	-	10	1	11,13 kN	-
	2	-224,28 kN	-		2	-224,28 kN	-
	3	-41043,24 kN.cm	-		3	-41043,24 kN.cm	-
5	2	-448,56 kN	-	11	2	-448,56 kN	-
6	2	-224,28 kN	-	12	2	-224,28 kN	-
	3	41043,24 kN.cm	-		3	41043,24 kN.cm	-

Para esse problema, estudou-se cinco diferentes casos, com variações nos parâmetros de entrada para o AG. Esses casos estão mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros de entrada do AG para os cinco casos do pórtico P01.

Caso	$N_{pop}$	$N_v$	$N_{cromo}$	$MáxG$	$P_c$	$c$	$El_t$	$L_f$
1	70	15	12	900	0,8	2	1	1000
2	60	15	12	900	0,7	5	1	1000
3	50	15	12	900	0,6	10	1	1000
4	90	15	12	900	0,7	16	1	1000
5	140	15	12	900	0,6	3	1	1000

### 3.4.2 Problema 2

O segundo problema estudado foi um pórtico plano com 10 pavimentos e 1 vão, composto por 20 pilares e 10 vigas, somando ao todo 30 elementos. Nessa estrutura os autores, já citados no problema 1, agruparam os elementos em 9 grupos: 5 de pilares e 4 de vigas, como mostra a Figura 22. Não se utilizou o agrupamento, permitindo que todos os membros possam ter seções diferentes, porém foi utilizado o mesmo catálogo que nos trabalhos anteriores: *AISC Shapes Database V15.1H – Historics*. na versão LRFD 3.

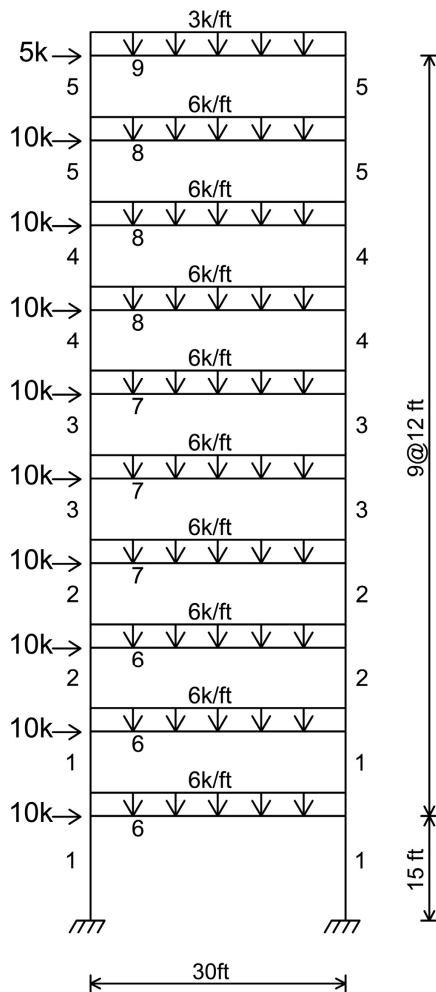
Os parâmetros de entrada que serão utilizados nas rotinas de análise e dimensionamentos encontram-se na Tabela 15.

Tabela 15 - Dados do pórtico P02 para análise e dimensionamento estrutural.

$N_n$	$N_e$	$N_{GL}$	$N_{ne}$	$N_{cn}$	$N_{cc}$	$E$	$f_y$	$f_u$
22	30	3	2	50	6	20000	34,5	45,0

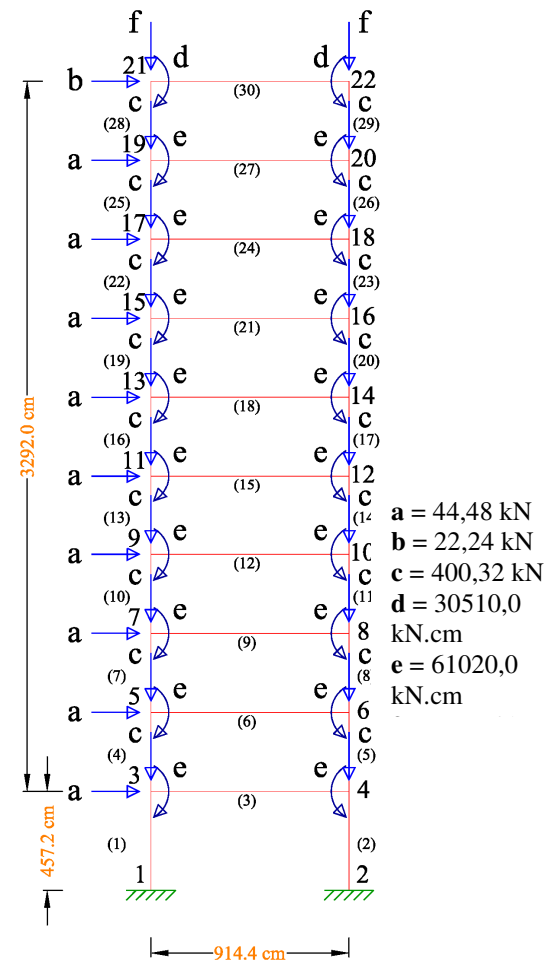
Assim como no problema 1, foi necessário realizar a conversão das unidades de medida e transpor as cargas distribuídas para os nós, como na Figura 17. Esse pórtico resultante o chamamos de pórtico P02. O pórtico após a adaptação está mostrado na Figura 23.

Figura 22 - Pórtico do problema 2.



Fonte: (PEZESHK; CAMP, 2000).

Figura 23 - Pórtico P02.



a = 44,48 kN  
b = 22,24 kN  
c = 400,32 kN  
d = 30510,0 kN.cm  
e = 61020,0 kN.cm

Fonte: Autor.

A seguir estão listadas, na Tabela 16, as coordenadas nodais e a condição de rigidez e o tipo de cada elemento do problema.

Tabela 16 - Coordenadas nodais dos membros do pórtico P02.

Elemento	Nó			Nó			IRZ	Tipo
	<i>i</i>	x (cm)	y (cm)	<i>j</i>	x (cm)	y (cm)		
1	1	0	0	3	0	457,2	11	Pilar
2	2	914,4	0	4	914,4	457,2	11	Pilar
3	3	0	457,2	4	914,4	457,2	11	Viga
4	3	0	457,2	5	0	822,96	11	Pilar
5	4	914,4	457,2	6	914,4	822,96	11	Pilar
6	5	0	822,96	6	914,4	822,96	11	Viga
7	5	0	822,96	7	0	1188,72	11	Pilar
8	6	914,4	822,96	8	914,4	1188,72	11	Pilar
9	7	0	1188,72	8	914,4	1188,72	11	Viga
10	7	0	1188,72	9	0	1554,48	11	Pilar
11	8	914,4	1188,72	10	914,4	1554,48	11	Pilar
12	9	0	1554,48	10	914,4	1554,48	11	Viga
13	9	0	1554,48	11	0	1920,24	11	Pilar
14	10	914,4	1554,48	12	914,4	1920,24	11	Pilar
15	11	0	1920,24	12	914,4	1920,24	11	Viga
16	11	0	1920,24	13	0	2286	11	Pilar
17	12	914,4	1920,24	14	914,4	2286	11	Pilar
18	13	0	2286	14	914,4	2286	11	Viga
19	13	0	2286	15	0	2651,76	11	Pilar
20	14	914,4	2286	16	914,4	2651,76	11	Pilar
21	15	0	2651,76	16	914,4	2651,76	11	Viga
22	15	0	2651,76	17	0	3017,52	11	Pilar
23	16	914,4	2651,76	18	914,4	3017,52	11	Pilar
24	17	0	3017,52	18	914,4	3017,52	11	Viga
25	17	0	3017,52	19	0	3383,28	11	Pilar
26	18	914,4	3017,52	20	914,4	3383,28	11	Pilar
27	19	0	3383,28	20	914,4	3383,28	11	Viga
28	19	0	3383,28	21	0	3749,04	11	Pilar
29	20	914,4	3383,28	22	914,4	3749,04	11	Pilar
30	21	0	3749,04	22	914,4	3749,04	11	Viga

Neste segundo problema, foram analisadas as soluções do AG para três diferentes casos, cujos parâmetros encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 - Parâmetros de entrada do AG para os três casos do pórtico P02.

Caso	$N_{pop}$	$N_e$	$N_{cromo}$	$MáxG$	$P_c$	$c$	$Elt$	$L_f$
1	80	30	12	500	0,8	8	1	2000
2	200	30	12	600	0,8	14	1	2000
3	300	30	12	600	0,8	8	1	2000

Para melhor visualização das cargas nodais combinadas que atuantes no pórtico P02, elas estão apresentadas na Tabela 18 que segue.

Tabela 18 - Cargas nodais e condições de contorno do pórtico P02.

Nó	Direção	Carga	Contorno	Nó	Direção	Carga	Contorno
1	1	-	0,0	12	1	-	-
	2	-	0,0		2	-400,32 kN	-
	3	-	0,0		3	61020,00 kN.cm	-
2	1	-	0,0	13	1	44,48 kN	-
	2	-	0,0		2	-400,32 kN	-
	3	-	0,0		3	-61020,00 kN.cm	-
3	1	44,48 kN	-	14	1	-	-
	2	-400,32 kN	-		2	-400,32 kN	-
	3	-61020,00 kN.cm	-		3	61020,00 kN.cm	-
4	1	-	-	15	1	44,48 kN	-
	2	-400,32 kN	-		2	-400,32 kN	-
	3	61020,00 kN.cm	-		3	-61020,00 kN.cm	-
5	1	44,48 kN	-	16	1	-	-
	2	-400,32 kN	-		2	-400,32 kN	-
	3	-61020,00 kN.cm	-		3	61020,00 kN.cm	-
6	1	-	-	17	1	44,48 kN	-
	2	-400,32 kN	-		2	-400,32 kN	-
	3	61020,00 kN.cm	-		3	-61020,00 kN.cm	-
7	1	44,48 kN	-	18	1	-	-
	2	-400,32 kN	-		2	-400,32 kN	-
	3	-61020,00 kN.cm	-		3	61020,00 kN.cm	-
8	1	-	-	19	1	44,48 kN	-
	2	-400,32 kN	-		2	-400,32 kN	-
	3	61020,00 kN.cm	-		3	-61020,00 kN.cm	-
9	1	44,48 kN	-	20	1	-	-
	2	-400,32 kN	-		2	-400,32 kN	-
	3	-61020,00 kN.cm	-		3	61020,00 kN.cm	-
10	1	-	-	21	1	22,24 kN	-
	2	-400,32 kN	-		2	-200,16 kN	-
	3	61020,00 kN.cm	-		3	-30510,00 kN.cm	-
11	1	44,48 kN	-	22	1	-	-
	2	-400,32 kN	-		2	-200,16 kN	-
	3	-61020,00 kN.cm	-		3	30510,00 kN.cm	-



Em seguida, utilizou-se os mesmos perfis no software *Ftool – Two-Dimensional Frame Analysis Tool*, versão 4.00.04 Básica para encontrar os esforços da estrutura. Os resultados encontram-se expostos nas Figuras B.1, B.2, B.3 e B.4 do Apêndice B. Posteriormente, encontram-se os mesmos dados nas Tabela 20, 21 e 22, para melhor observação e comparação deles com os do programa de otimização, que nomeamos de *OEPPAG*.

Tabela 20 - Comparação dos deslocamentos nodais geradas no *OEPPAG* e no *Ftool*.

Nó	Programa	Deslocamentos nodais		
		$U_x$ (cm)	$U_y$ (cm)	$R_z$ (rad)
1	<i>OEPPAG</i>	0,000000	0,000000	0,000000
	<i>Ftool</i>	0,000000	0,000000	0,000000
2	<i>OEPPAG</i>	0,006128	-0,025409	-0,016440
	<i>Ftool</i>	0,006128	-0,025409	-0,016440
3	<i>OEPPAG</i>	0,000000	0,000000	0,000000
	<i>Ftool</i>	0,000000	0,000000	0,000000

Fonte: Autor.

em que,

$U_x$  = Deslocamentos na direção do eixo  $x$ ;

$U_y$  = Deslocamentos na direção do eixo  $y$ ;

$R_z$  = Rotação em torno do eixo  $x$ .

Tabela 21 - Comparação das reações nodais geradas no *OEPPAG* e no *Ftool*.

Nó	Programa	Reações nodais		
		$P_x$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_z$ (kN.cm)
1	<i>OEPPAG</i>	2,755097	39,638171	-275,166511
	<i>Ftool</i>	2,755097	39,638171	-275,166511
2	<i>OEPPAG</i>	0,000000	0,000000	0,000000
	<i>Ftool</i>	0,000000	0,000000	0,000000
3	<i>OEPPAG</i>	-4,755097	60,361829	-5732,276887
	<i>Ftool</i>	-4,755097	60,361829	-5732,276887

Fonte: Autor.

em que,

$P_x$  = Força de reação na direção do eixo  $x$ ;

$P_y$  = Força de reação na direção do eixo  $y$ ;

$P_z$  = Momento de reação na direção do eixo  $z$ .

Tabela 22 - Comparação das forças internas geradas no *OEPPAG* e no *Ftool*.

Elemento	Nó	Programa	Forças internas		
			$F_x$ (kN)	$F_y$ (kN)	$M_z$ (kN.cm)
1	1	<i>OEPPAG</i>	39,107656	-1,882074	-188,025127
		<i>Ftool</i>	39,107656	-1,882074	-188,025127
	2	<i>OEPPAG</i>	-39,107656	1,882074	-376,597213
		<i>Ftool</i>	-39,107656	1,882074	-376,597213
2	2	<i>OEPPAG</i>	3,882074	-10,892344	-3623,402787
		<i>Ftool</i>	3,882074	-10,892344	-3623,402787
	3	<i>OEPPAG</i>	-3,882074	10,892344	-1822,769331
		<i>Ftool</i>	-3,882074	10,892344	-1822,769331

Fonte: Autor.

em que,

$F_x$  = Força interna axial;

$F_y$  = Força interna cisalhante;

$M_z$  = Momento interno na direção do eixo  $z$ .

Notou-se que todos os valores produzidos da análise estrutural dos dois programas são iguais, validando assim a rotina de análise *PORTAN* do algoritmo de otimização *OEPPAG*.

#### 4.1.2 Rotina de Dimensionamento

A força interna axial no elemento 1 é diferente de 0, positiva no nó  $i$  e negativa no nó  $j$ . Além disso, o momento interno no mesmo elemento também é diferente de 0. Sendo assim, pela convenção adotada descrita na Figura 18, esse elemento está submetido à compressão e à efeitos de momento, caracterizando uma flexão composta. Nesse caso, necessitou-se calcular os valores de  $N_{c,Rd}$  e  $M_{Rd}$ .

Calculou-se inicialmente os valores de  $Q$  e  $N_e$ . Para alma da seção  $b/t = 20,48$ , dado na coluna 21 do catálogo e  $(b/t)_{lim} = 1,49 \cdot \sqrt{(20000/34,5)} = 35,87$ . Já para as mesas da seção,  $b/t = 7,18$ , na coluna 20 do catálogo e  $(b/t)_{lim} = 0,56 \cdot \sqrt{(20000/34,5)} = 13,48$ . Como para os dois casos  $b/t < (b/t)_{lim}$ , daí  $Q_a = Q_s = Q = 1$ .

A força axial de flambagem elástica  $N_e$  obteve o valor a seguir:

$$N_e = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 126,0}{(0,65 \cdot 300)^2} = 208,200223 \text{ kN} \quad (65)$$

em que,

$I = 126,0$ , considerado que pilar estará sujeito a flexões em duas direções, adotou-se o caso mais crítico, onde  $I = I_y$ , dado na coluna 14;

$K = 0,65$ , obtido na Tabela 1.

Com esses valores podemos então calcular o valor de  $\lambda_0$ :

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{1 \cdot 23,4 \cdot 34,5}{208,200223}} = 1,9691413 \quad (66)$$

Tendo que  $\lambda_0 > 1,5$ :

$$\chi = \frac{0,877}{(1,9691413)^2} = 0,22617564 \quad (67)$$

Pode-se então calcular o  $N_{c,Rd}$ :

$$N_{c,Rd} = \frac{0,226176 \cdot 1 \cdot 23,4 \cdot 34,5}{1,10} = 165,99236 \text{ kN} \quad (68)$$

Verificou-se o perfil quanto aos limites de FLA e FLM. Para isso, foi necessário encontrar o valor de  $\lambda$  e para os dois casos  $\lambda_p$ .

Para a Flambagem Local da Alma,  $\lambda = 20,48$  e  $\lambda_p = 1,12 \cdot \sqrt{(20000/34,5)} = 26,97$ . Como  $\lambda < \lambda_p$ , e  $M_{pl} = 38,5 \cdot 34,5 = 1328,25 \text{ kN} \cdot \text{cm}$  podemos calcular o momento resistente de cálculo do elemento, para o estado limite de FLA, através da Equação (28), sendo:

$$M_{Rd} = \frac{1328,25}{1,10} = 1207,5 \text{ kN} \cdot \text{cm} \quad (69)$$

Já para o estado limite de Flambagem Local da Mesa,  $\lambda = 7,18$  e  $\lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{(20000/34,5)} = 9,149325$ . Como  $\lambda < \lambda_p$ , o momento resistente de cálculo do elemento, para o estado limite de FLM, poderá ser calculado através da Equação (28), resultando no mesmo valor da Equação (69). Logo, esse será o valor do  $M_{Rd}$ .

Para  $C_m = 1$ ,  $B_1$  passa a ser como na Equação (70).

$$B_1 = \frac{1}{1 - \frac{39,638171}{165,99236}} = 1,313707. \quad (70)$$

O valor do momento fletor solicitante de cálculo amplificado assume o valor da Equação (71).

$$M_{Sd} = 1,313707 \cdot 551,362475 = 724,3286448 \text{ kN} \cdot \text{cm} \quad (71)$$

Diante de uma combinação de ações, foi necessário calcular  $N_{c,Sd} / N_{c,Rd} = 39,638171/165,99236 = 0,2387952$ . Como  $N_{c,Sd} / N_{c,Rd} > 0,2$ :

$$FS_t = \frac{39,638171}{165,99236} + \frac{8}{9} \left( \frac{724,328645}{1207,5} \right) \quad (72)$$

$$FS_t = 0,772002$$

O deslocamento máximo permitido nesse para esse elemento fora:

$$d_{m\acute{a}x} = \frac{300}{500} = 0,6 \quad (73)$$

Assim, o fator de segurança relativo ao deslocamento fora calculado como na Equação (54), resultando em:

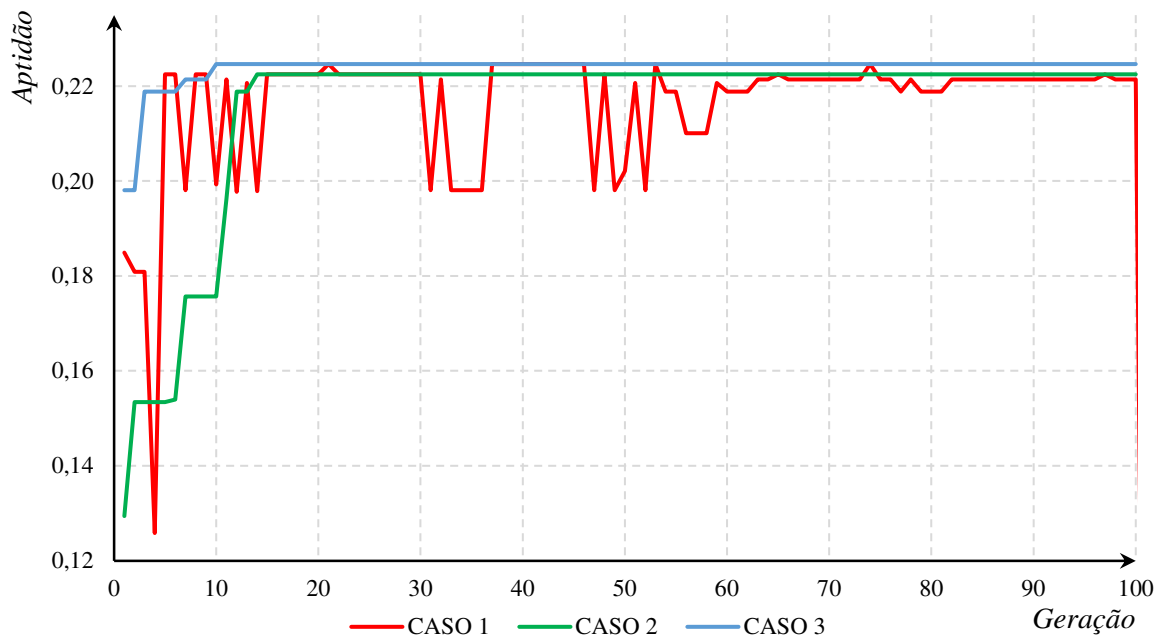
$$FS_d = \frac{0,025409}{0,6} = 0,0423483 \quad (74)$$

Os valores obtidos nas Equações (72) e (74) são iguais aos exibidos na Figura 24, validando assim a rotina *DIMENSIONAR*.

### 4.1.3 Rotina de Otimização via Algoritmos Genéticos

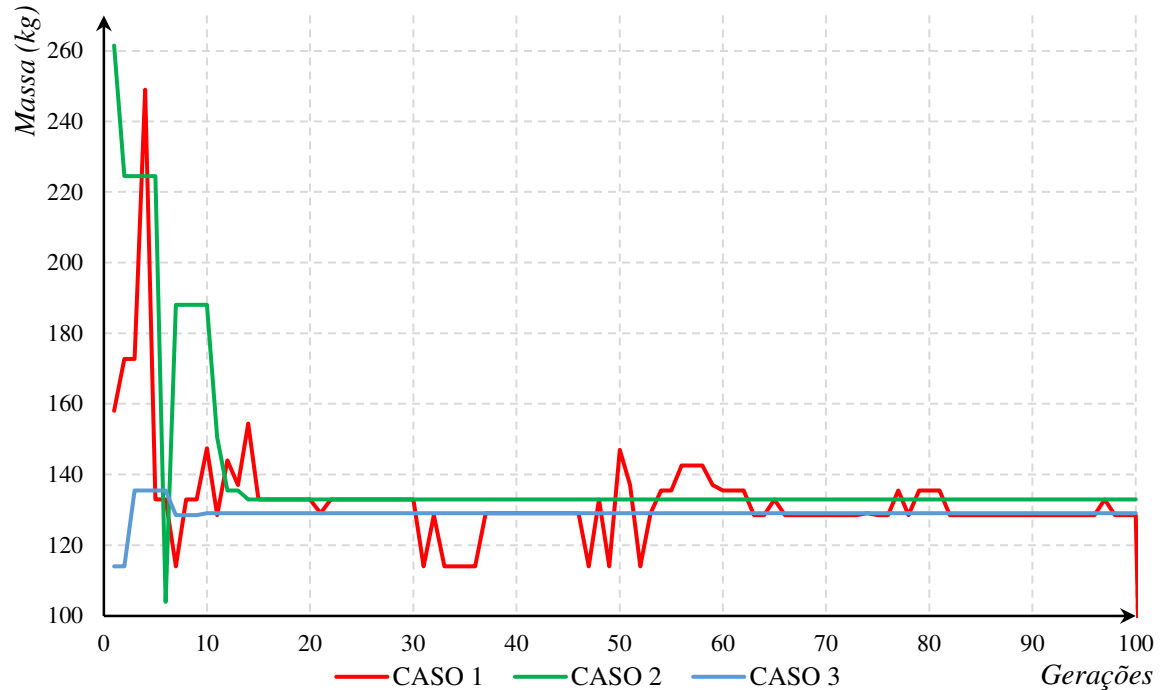
O comportamento dos três casos da Tabela 10 estão expostos nas Figura 25 e Figura 26. Nota-se que, para o caso 1 sem utilização do elitismo, a aptidão dos melhores indivíduos teve grandes variações ao longo das gerações. Além disso, ele convergiu para uma solução com a menor aptidão entre os três casos, mesmo tendo encontrado a melhor solução na geração 21, como mostra a Figura 24.

Figura 25 - Aptidão dos melhores indivíduos ao longo das gerações para o pórtico P00.



Fonte: Autor.

Figura 26 - Massa dos melhores indivíduos ao longo das gerações para o pórtico P00.



Fonte: Autor.

No caso 2, não há diminuição da aptidão dos melhores indivíduos ao longo das gerações permanecendo-se constante a partir da 14ª geração. Isso ocorre pelo fato de a aplicação do elitismo não permitir que o melhor indivíduo da geração  $i-1$  seja menos apto que o melhor indivíduo da geração  $i$ . Nesse caso foi encontrada uma solução que atende os critérios normativos,  $FS_l \leq 1$  e  $FS_d \leq 1$  para todos os elementos, porém essa solução possui

uma massa maior que a solução encontrada nos demais casos, como mostrada na Figura 27. Isso foi resolvido aumentando o tamanho da população, como no caso 3.

Figura 27 - Resultado do algoritmo para o pórtico P00 do caso 2.

```

184572 #####
184573 MELHOR SOLUÇÃO
184574 #####
184575 GERAÇÃO: 014 | INDIVÍDUO: 47 | APTIDÃO: 0.217483
184576 =====
184577 Elemento  Perfil  Decimal (cm²)  Área (cm²)  FSt  FSc  Peso  Massa (kg)
184578 -----
184579 1  8|W200x19,3  25.0952  25.1  0.8855  0.0394  0.9359  57.9
184580 2  7|W200x15,0  19.1079  19.4  0.7746  0.0236  1.0041  75.0
184581 -----
184582 TOTAL = 1.9401 132.9
184583 -----
184584 DESLOCAMENTOS NODAIS FINAIS
184585 -----
184586 NÓ          UX (cm)          UY (cm)          RZ (rad)
184587 1           0.000000          0.000000          0.000000
184588 2           0.005884          -0.023621         -0.016627
184589 3           0.000000          0.000000          0.000000
184590 -----
184591 REAÇÕES NODAIS
184592 -----
184593 NÓ          PX (kN)          PY (kN)          MZ (kN.cm)
184594 1           2.565620          39.525486         -256.258653
184595 2           0.000000          -0.000000          0.000000
184596 3          -4.565620          60.474514         -5750.684391
184597 -----
184598 FORÇAS INTERNAS
184599 -----
184600 BARRA  NÓ          PX (kN)          PY (kN)          MZ (kN.cm)
184601 1      1           39.525486         -2.565620         -256.258653
184602      2          -39.525486          2.565620          -513.427293
184603 2      2           4.565620         -10.474514        -3486.572707
184604      3          -4.565620          10.474514         -1750.684391
184605 -----
184606 =====
184607
184608

```

User Defined language file - AMB-TCCII length : 15.085.942 lines : 184.608

Fonte: Autor.

Após aumentar o tamanho da população e manter o elitismo, o algoritmo apresentou um melhor resultado, dentre os três casos avaliados. O caso 3 convergiu para a mesma solução encontrada no caso 1, porém em um número menor de gerações, a partir da 10ª, comprovando a eficiência do elitismo, apesar do risco de cair em solução locais como no caso 2. O resultado do caso 3 encontra-se na Figura 28.

Figura 28 - Resultado do algoritmo para o pórtico P00 do caso 3.

```

220572 #####
220573 MELHOR SOLUÇÃO
220574 #####
220575 GERAÇÃO: 010 | INDIVÍDUO: 48 | APTIDÃO: 0.219621
220576 =====
220577 Elemento Perfil Decimal (cm²) Área (cm²) FSt FSd Peso Massa (kg)
220578 -----
220579 1 2|W150x18,0 23.3429 23.4 0.7720 0.0423 0.9691 54.0
220580 2 7|W200x15,0 19.9111 19.4 0.7668 0.0254 1.0042 75.0
220581 -----
220582 TOTAL = 1.9733 129.0
220583 -----
220584 DESLOCAMENTOS NODAIS FINAIS
220585 -----
220586 NÓ UX (cm) UY (cm) RZ (rad)
220587 1 0.000000 0.000000 0.000000
220588 2 0.006128 -0.025409 -0.016440
220589 3 0.000000 0.000000 0.000000
220590 -----
220591 REAÇÕES NODAIS
220592 -----
220593 NÓ PX (kN) PY (kN) MZ (kN.cm)
220594 1 2.755097 39.638171 -275.166511
220595 2 -0.000000 0.000000 0.000000
220596 3 -4.755097 60.361829 -5732.276887
220597 -----
220598 FORÇAS INTERNAS
220599 -----
220600 BARRA NÓ PX (kN) PY (kN) MZ (kN.cm)
220601 1 1 39.638171 -2.755097 -275.166511
220602 2 -39.638171 2.755097 -551.362475
220603 2 2 4.755097 -10.361829 -3448.637525
220604 3 -4.755097 10.361829 -1732.276887
220605 -----
220606 =====
220607 =====
220608 =====

```

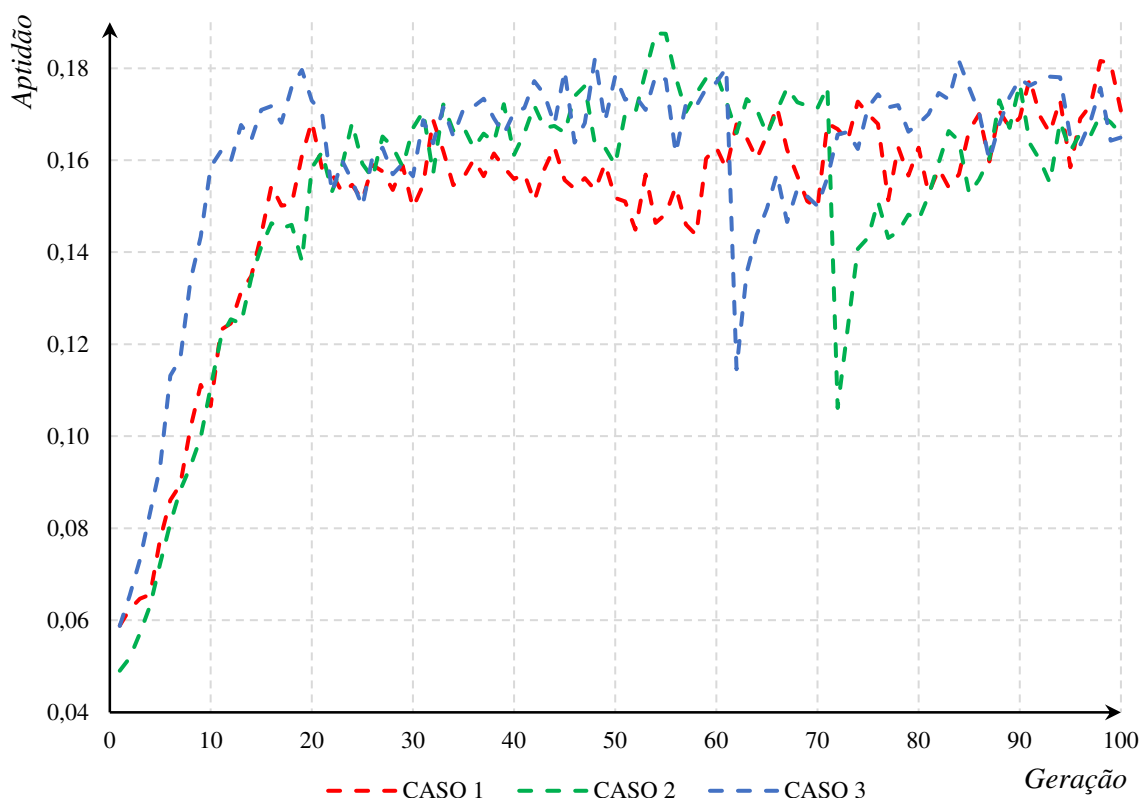
User Defined language file - AMB-TCCII length : 18.031.947 lines : 220.608

Fonte: Autor.

Por última análise, verificou-se como os indivíduos estão se comportando ao longo de cada geração através da média desses indivíduos, apresentadas na Figura 29. Percebe-se que os indivíduos, em média, estão evoluindo, tornando-se mais aptos a serem soluções do problema, a cada geração.

Logo, concluímos que a *Rotina de Otimização via Algoritmo Genético* comporta-se como esperado, trazendo soluções que atendem os preceitos estabelecidos pela NBR 8800 de 2008, com estruturas mais leves a cada geração. Portanto, podemos iniciar a otimização dos problemas propostos.

Figura 29 - Média das aptidões dos indivíduos ao longo das gerações para o pórtico P00.



Fonte: Autor.

## 4.2 PROBLEMAS

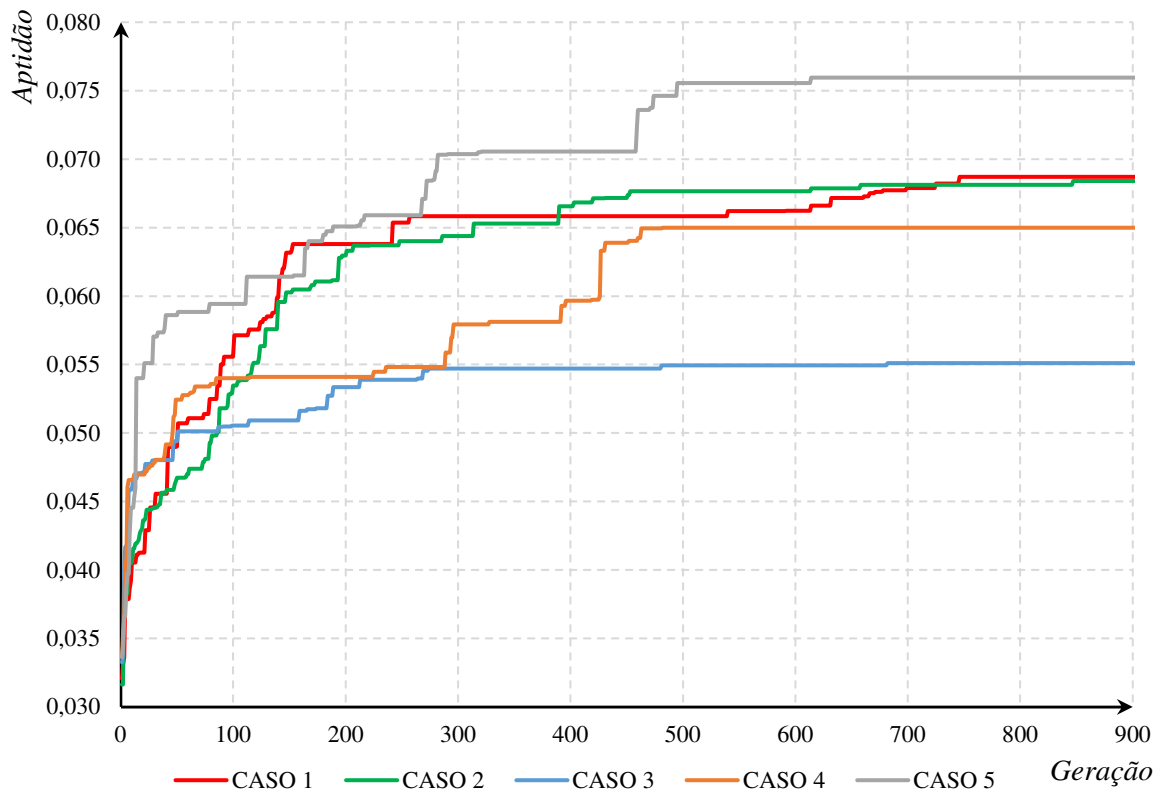
### 4.2.1 Problema 1

Realizado o processamento da estrutura para os cinco casos descritos na Tabela 11, confeccionou-se o gráfico da Figura 30. Nesse gráfico observa-se que os casos 5 e 3 destacaram-se quanto aos demais. O primeiro por ter encontrado soluções para o problema com aptidão muito superiores aos restantes, enquanto que o segundo por ter encontrado soluções para o problema com aptidão muito inferiores aos outros casos. As massas encontradas nos casos estão expostas no Figura 31.

A maior diferença entre esses dois casos está no tamanho da população escolhido para cada um. Eles se caracterizam com as maiores e menores populações, o que podemos relacionar às aptidões dos seus indivíduos. O quinto caso possui uma população quase três vezes maior que a população do caso 3.

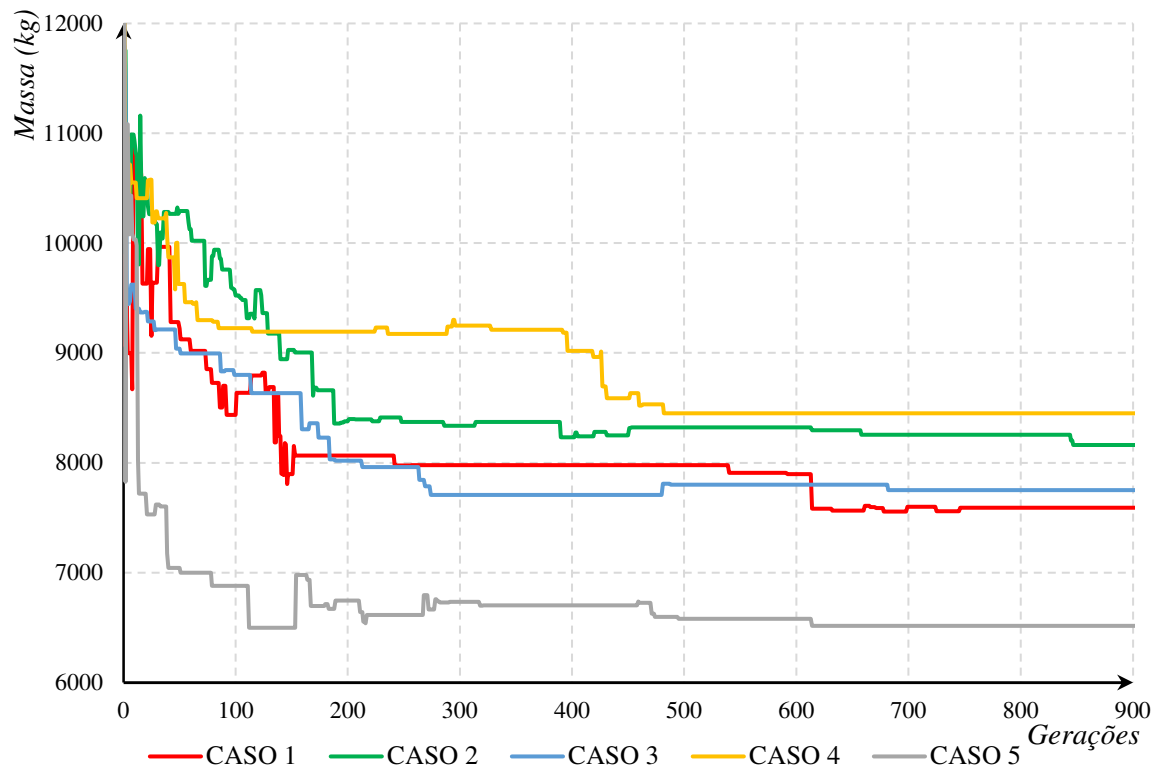
Além de possuir aptidão menor que os demais, o caso 3 foi o único que não convergiu para indivíduos que de fato atendessem os critérios da NBR 8800 (2008), como pode ser visto na Figura 32, onde os elementos 1, 3, 5 e 8 possuem fatores de segurança relativos as tensões maiores que 1.

Figura 30 - Aptidão dos melhores indivíduos do pórtico P01.



Fonte: Autor.

Figura 31 - Massa dos melhores indivíduos dos cinco casos do pórtico P01.



Fonte: Autor.

Figura 32 - Resultado do caso 3 do pórtico P01.

MELHOR SOLUÇÃO								
GERAÇÃO: 682		INDIVÍDUO: 25		APTIDÃO: 0.055109				
Elemento	Perfil	Decimal (cm <sup>2</sup> )	Área (cm <sup>2</sup> )	FSt	FSd	Peso	Massa (kg)	
1	87 W610x155,0	206.6857	198.1	1.0581	0.9475	1.0609	472.8	
2	45 HP310x110,0 (H)	140.8984	141.0	0.9040	0.8499	0.0318	335.5	
3	87 W610x155,0	198.8730	198.1	1.0597	0.6505	1.1819	472.8	
4	19 W200x86,0 (H)	110.0127	110.9	0.3701	0.2632	0.9396	944.3	
5	75 W530x66,0	83.3619	83.6	1.6193	0.9933	1.6194	201.3	
6	1 W150x13,0	5.9651	16.6	0.8440	0.2361	0.6079	142.7	
7	42 HP310x93,0 (H)	118.4825	119.2	0.6922	0.9567	0.0966	283.6	
8	88 W610x174,0	291.8952	222.8	1.0341	0.9227	1.0401	530.7	
9	85 W610x125,0	163.0952	160.1	0.2059	0.2759	1.1548	1372.5	
10	59 W360x122,0 (H)	153.8222	155.3	0.9630	0.9933	0.0014	372.1	
11	68 W460x60,0	77.2286	76.2	0.2788	0.2657	1.0593	658.8	
12	12 W200x35,9 (H)	44.8095	45.7	0.7885	0.9567	0.0466	109.5	
13	59 W360x122,0 (H)	155.1365	155.3	0.9861	0.9730	0.0009	372.1	
14	68 W460x60,0	76.1333	76.2	0.5865	0.2379	0.7518	658.8	
15	65 W410x75,0	95.7016	95.8	0.4808	0.2703	0.8021	823.5	
TOTAL						=	10.3950	7751.0

Fonte: Autor.

O melhor indivíduo do caso 4, que teve resultados melhores que o caso 3, estão expostos na Figura 33. Note que neste, todos os elementos possuem fatores de segurança menores que 1, sendo essa uma solução real do problema.

Figura 33 - Resultado do caso 4 do pórtico P01.

MELHOR SOLUÇÃO								
GERAÇÃO: 482		INDIVÍDUO: 75		APTIDÃO: 0.064998				
Elemento	Perfil	Decimal (cm <sup>2</sup> )	Área (cm <sup>2</sup> )	FSt	FSd	Peso	Massa (kg)	
1	27 HP250x62,0 (H)	79.7841	79.6	0.8965	0.8922	0.0223	189.1	
2	46 W310x117,0 (H)	150.8286	149.9	0.6728	0.9306	0.1118	356.9	
3	30 HP250x85,0 (H)	108.1143	108.5	0.7200	0.9698	0.0793	259.2	
4	75 W530x66,0	84.3841	83.6	0.4808	0.2585	0.8194	724.7	
5	31 W250x89,0 (H)	113.1524	113.9	0.9302	0.9274	0.0102	271.4	
6	85 W610x125,0	160.7587	160.1	0.1875	0.2694	1.1939	1372.5	
7	54 W360x72,0	91.2476	91.3	0.7133	0.9306	0.0870	219.6	
8	33 W250x115,0 (H)	145.7905	146.1	0.9802	0.9698	0.0013	350.8	
9	85 W610x125,0	163.2413	160.1	0.1812	0.2576	1.2216	1372.5	
10	19 W200x86,0 (H)	111.4730	110.9	0.9552	0.9274	0.0073	262.3	
11	34 W310x21,0	27.3587	27.2	0.3464	0.2535	0.9845	230.6	
12	27 HP250x62,0 (H)	80.5873	79.6	0.5628	0.9124	0.1988	189.1	
13	47 HP310x125,0 (H)	158.4952	159.0	0.7326	0.8812	0.0856	381.2	
14	78 W530x82,0	104.0984	104.5	0.4783	0.1918	0.9254	900.4	
15	85 W610x125,0	161.7810	160.1	0.2717	0.1918	1.1837	1372.5	
TOTAL						=	6.9322	8452.8

Fonte: Autor.

Enquanto aos casos 1, 2 e 4, o tamanho de suas populações são relativamente próximos. Dos três, o melhor resultado se deu no caso 1 (com menor população) e o pior resultado no caso 4 (com maior população). Diferentemente da relação entre os casos 3 e 5, os parâmetros que tiveram influência no desempenho do AG foram a probabilidade de cruzamento e o fator de escala. O caso 1 possui a maior probabilidade de cruzamento dos três, 80%, e o caso 4 o maior fator de escala, contribuindo para a convergência de uma solução local.

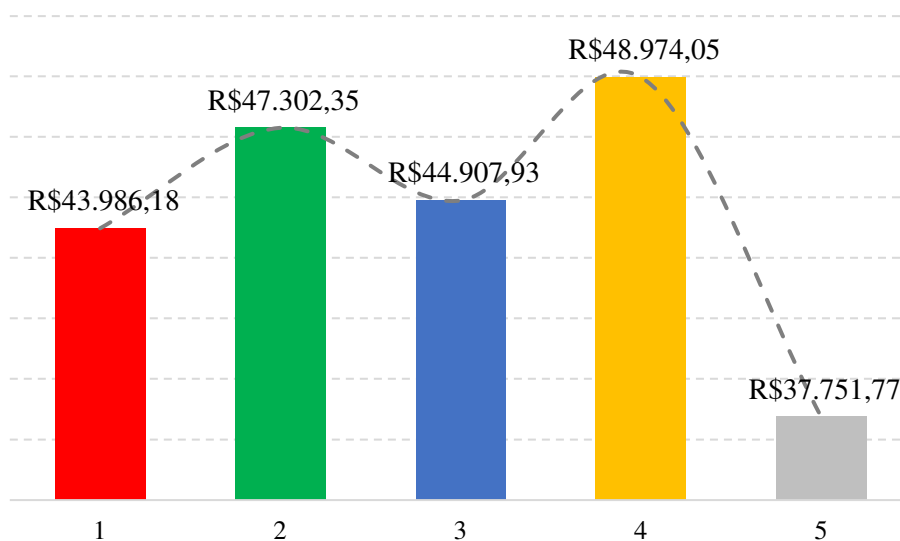
Tomando como base a média dos custos de perfis laminados, disponibilizados pelo site *ORSE - Orçamento Obras Sergipe*<sup>3</sup>, calculou-se o custo total dos materiais das melhores soluções. Esses custos estão apresentados na Tabela 23 e em seguida no Figura 34.

Assumindo que um profissional, sem utilizar qualquer método de otimização, consiga projetar a mesma estrutura como na solução do caso 4, a estrutura otimizada no caso 5 seria 1076,0 kg mais leve e custaria R\$ 6.234,41 a menos em material.

Tabela 23 - Resumo dos 5 casos estudados para o pórtico P01.

Caso	Geração de Convergência	Aptidão	Massa (Kg)	Custo Unit. (R\$/kg)	Custo Total
1	746	0,068716	7591,9	5,79	R\$ 43.986,18
2	847	0,068411	8164,2	5,79	R\$ 47.302,35
3	682	0,055109	7751,0	5,79	R\$ 44.907,93
4	482	0,064998	8452,8	5,79	R\$ 48.974,05
5	614	0,075968	6515,8	5,79	R\$ 37.751,77

Figura 34 - Custos totais de material dos cinco casos para o pórtico P01.



Fonte: Autor.

<sup>3</sup>Os perfis e seus custo unitários encontram-se no Anexo A.

A otimização do pórtico P01, dada no caso 5, está apresentada na Figura 35.

Figura 35 - Resultado do caso 5 do pórtico P01.

MELHOR SOLUÇÃO								
GERAÇÃO: 614		INDIVÍDUO: 35		APTIDÃO: 0.075968				
Elemento	Perfil	Decimal (cm <sup>2</sup> )	Área (cm <sup>2</sup> )	FSt	FSD	Peso	Massa (kg)	
1	42 HP310x93,0 (H)	119.6508	119.2	0.8763	0.8324	0.0434	283.6	
2	42 HP310x93,0 (H)	118.7746	119.2	0.8146	0.9033	0.0437	283.6	
3	59 W360x122,0 (H)	154.7714	155.3	0.8408	0.9679	0.0264	372.1	
4	61 W410x46,1	61.0190	59.2	0.4052	0.2509	0.9149	506.2	
5	59 W360x122,0 (H)	152.8730	155.3	0.9852	0.9814	0.0006	372.1	
6	28 W250x73,0 (H)	93.4381	92.7	0.1651	0.2689	1.2316	801.5	
7	27 HP250x62,0 (H)	78.1778	79.6	0.6975	0.9521	0.0938	189.1	
8	46 W310x117,0 (H)	149.2952	149.9	0.9506	0.9679	0.0035	356.9	
9	60 W410x38,8	50.7968	50.3	0.2129	0.2726	1.1486	426.0	
10	59 W360x122,0 (H)	154.4794	155.3	0.9292	0.9814	0.0054	372.1	
11	1 W150x13,0	12.6825	16.6	0.1896	0.2645	1.1977	142.7	
12	12 W200x35,9 (H)	45.6127	45.7	0.9057	0.9521	0.0112	109.5	
13	46 W310x117,0 (H)	152.5079	149.9	0.9213	0.9104	0.0142	356.9	
14	85 W610x125,0	168.4984	160.1	0.2227	0.2423	1.1784	1372.5	
15	67 W460x52,0	66.0571	66.6	0.5998	0.2423	0.7343	571.0	
TOTAL						=	6.6476	6515.8

Fonte: Autor.

Utilizou-se o resultado do caso 5 para compara-lo com os resultados que os outros autores tiveram em seus trabalhos, como é feito na Tabela 24.

Tabela 24 - Comparação dos resultados de outros autores com o caso 5 deste estudo.

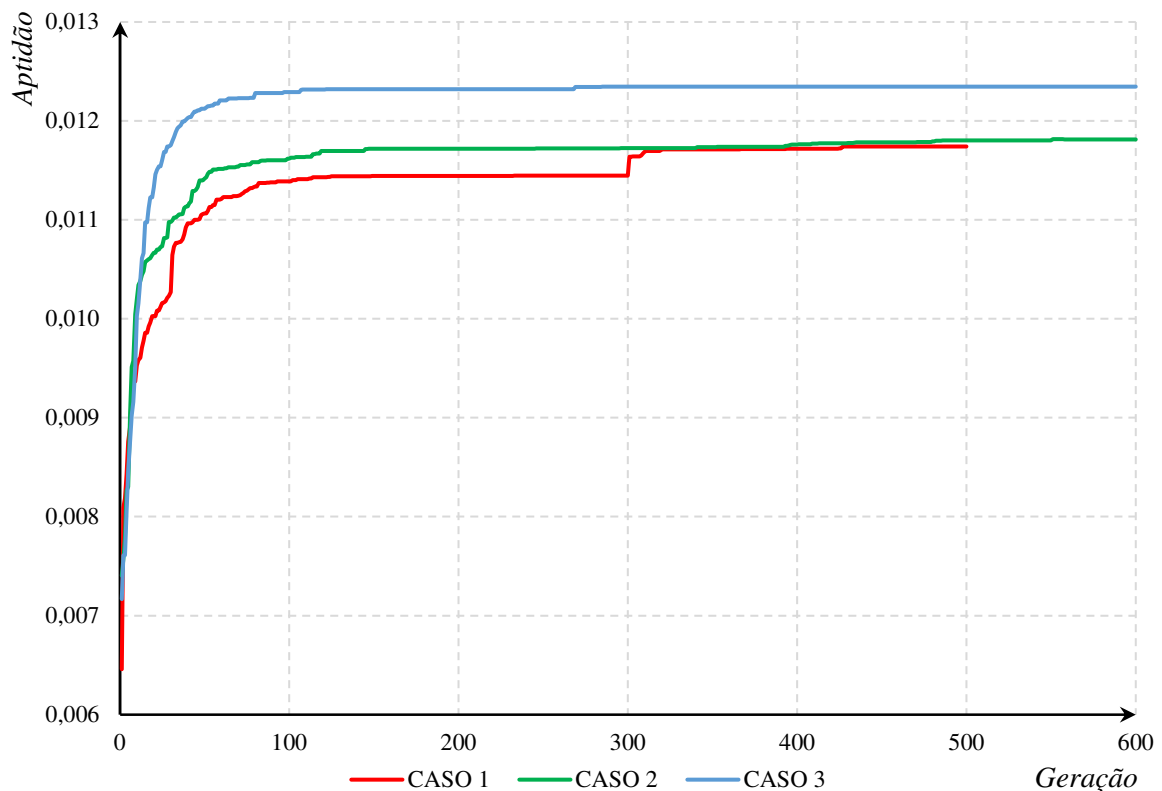
Elemento	Perfis			
	Pezeshk e Chen (2000)	Carraro (2015)	Yanamoto (2015)	Este estudo
1	W10x68	W10x60	W10x77	HP310x93,0(H)
2	W10x68	W10x60	W10x77	HP310x93,0(H)
3	W10x68	W10x60	W10x77	W360x122,0(H)
4	W24x62	W24x62	W24x62	W410x46,1
5	W10x68	W10x60	W10x77	W360x122,0(H)
6	W24x62	W24x62	W24x62	W250x73,0(H)
7	W10x68	W10x60	W10x77	HP250x62,0(H)
8	W10x68	W10x60	W10x77	W310x117,0(H)
9	W24x62	W24x62	W24x62	W410x38,8
10	W10x68	W10x60	W10x77	W360x122,0(H)
11	W24x62	W24x62	W24x62	W150x13,0
12	W10x68	W10x60	W10x77	W200x35,9(H)
13	W10x68	W10x60	W10x77	W310x117,0(H)
14	W24x62	W24x62	W24x62	W610x125,0
15	W24x62	W24x62	W24x62	W460x52,0
Gerações	1800	320	320	614
Massa (lb)	19512	18792	20322	14365
Massa (kg)	8850,49	8523,90	9217,90	6515,84
Custo Total	R\$ 51.278,36	R\$ 49.386,17	R\$ 53.407,07	R\$ 37.751,77

Percebe-se que, dos 4 estudos, a solução encontrada no presente trabalho para o pórtico P01 foi a mais leve e, conseqüentemente, a com menor custo de material. Apesar de ter necessitado de um número maior de interações que nos casos de Carraro (2015) e Yamamoto (2015), o arranjo encontrado no caso 5 é, no mínimo, 23,56% mais econômico que os demais casos, em termos de materiais.

#### 4.2.2 Problema 2

De maneira análoga ao problema 1, os resultados do processamento dos três casos descritos na Tabela 14, foram plotados e exibidos na Figura 36.

Figura 36 - Aptidão dos melhores indivíduos para o pórtico P02.

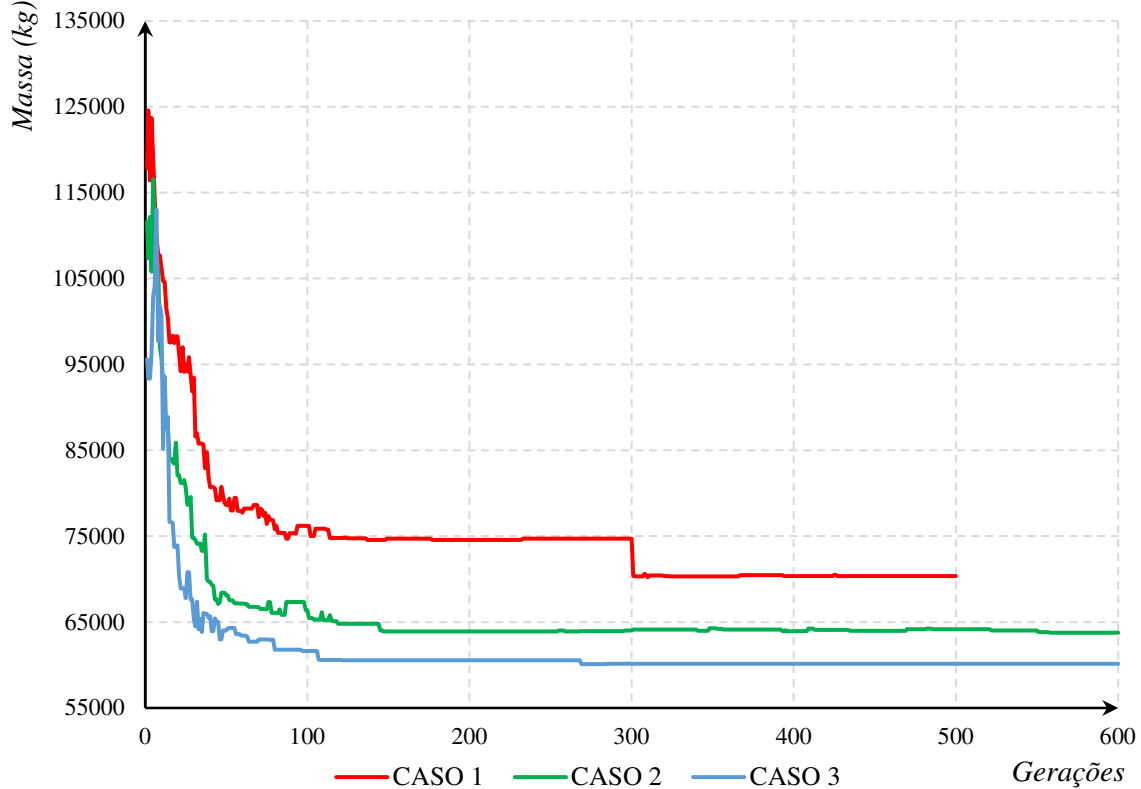


Fonte: Autor.

Dos três casos, o mais satisfatório foi o 3. Esse caso, a partir da 285ª geração não teve mais variação da aptidão dos indivíduos. Nesse problema fica mais evidente a importância da escolha do tamanho da população para o desempenho do algoritmo. Com um número menor de indivíduos verificados por geração, os casos 1 e 2, mesmo nas suas últimas gerações não conseguiram encontrar uma solução tão apta quanto a encontrada pelo caso 3, desde a sua 5ª geração. Nota-se que mesmo tendo tamanho de população bem distintos, os casos 1 e 2 convergiram para solução com aptidões relativamente próxima, o que pode ter sido motivado pelo fator de escala no caso 2 ser bem maior que no 3.

Analisando agora o gráfico da Figura 37, os indivíduos do caso 3 tiveram menor massa do que os indivíduos dos casos 1 e 2, como já era esperado por estarem mais aptos às soluções.

Figura 37 - Massa dos melhores indivíduos do pórtico P02.



Fonte: Autor.

Em relação aos casos 1 e 2, apesar de suas aptidões convergirem para valores próximos, suas massas diferem em escala maior que entre os casos 2 e 3, cujas aptidões são bem diferentes. Esse fato nos revela que, após os indivíduos estarem mais amadurecidos, a função de penalidade passa a ter influência significativamente maior.

Apesar do caso 3 ter se destacado dentre os demais, sua solução não foi apta o suficiente à ponto de atender a todos os critérios, como pode ser visto na Figura 38.

Figura 38 - Resultado do caso 3 para o pórtico P02.

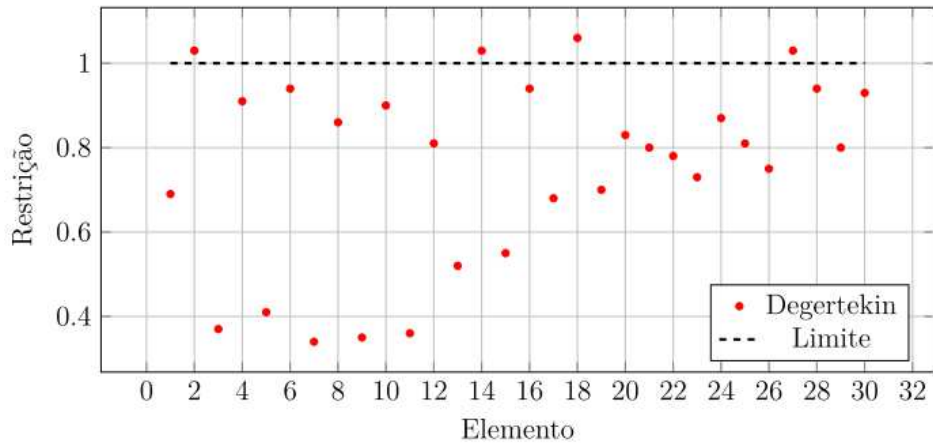
MELHOR SOLUÇÃO								
GERAÇÃO: 285		INDIVÍDUO: 204		APTIDÃO: 0.011847				
Elemento	Perfil	Decimal (cm <sup>2</sup> )	Área (cm <sup>2</sup> )	FSt	FSd	Peso	Massa (kg)	
1	93 W27x84	33.8867	160.0	1.3988	0.8522	1.4206	571.5	
2	27 W36x798	1585.2676	1516.1	0.0879	0.8504	0.8543	5429.5	
3	6 W40x503	926.0762	954.8	0.0668	0.5326	1.0894	6844.7	
4	93 W27x84	27.2440	160.0	1.3547	1.5079	2.8626	457.3	
5	27 W36x798	1437.3778	1516.1	0.0706	1.5034	2.3672	4344.1	
6	10 W40x362	688.2276	690.3	0.0695	0.7540	0.9262	4926.0	
7	84 W27x217	415.8069	412.9	0.0996	1.7453	2.5559	1181.0	
8	27 W36x798	1579.1083	1516.1	0.0585	1.7430	2.6295	4342.9	
9	16 W40x199	375.9131	377.4	0.1229	0.8725	0.7855	2707.9	
10	93 W27x84	78.1986	160.0	1.2645	1.8586	3.1231	457.3	
11	27 W36x798	1584.3596	1516.1	0.0531	1.8544	2.7509	4344.1	
12	15 W40x215	407.5845	409.0	0.1027	0.9294	0.8102	2925.7	
13	93 W27x84	3.2454	160.0	1.2149	1.8591	3.0740	457.1	
14	28 W36x650	1335.0351	1232.3	0.0568	1.8549	2.7445	3537.4	
15	74 W30x108	200.4124	204.5	0.2558	0.9240	0.5596	1469.6	
16	93 W27x84	121.5816	160.0	1.1619	1.8478	3.0097	457.3	
17	29 W36x527	1011.0462	1000.0	0.0620	1.8417	2.7215	2868.8	
18	93 W27x84	24.3058	160.0	0.3201	0.8253	0.4928	1143.0	
19	93 W27x84	109.5410	160.0	1.1060	1.8108	2.9168	457.3	
20	30 W36x439	890.5936	832.3	0.0633	1.6057	2.4832	2389.8	
21	93 W27x84	24.5451	160.0	0.3216	0.9055	0.4691	1143.0	
22	93 W27x84	87.8739	160.0	1.0797	1.9290	3.0087	457.1	
23	88 W27x146	276.6301	278.1	1.0514	0.9989	1.0514	794.6	
24	93 W27x84	65.1510	160.0	0.2527	0.9644	0.5598	1143.0	
25	58 W33x141	263.1755	268.4	1.0288	1.9715	3.0003	767.6	
26	100 W24x207	391.3356	391.6	0.1123	0.9986	0.7880	1126.8	
27	93 W27x84	46.8386	160.0	0.2522	0.9858	0.5594	1143.0	
28	60 W33x118	223.5488	223.9	1.0117	1.9894	3.0012	642.2	
29	93 W27x84	54.5283	160.0	1.0173	0.8473	1.0407	457.1	
30	93 W27x84	148.6396	160.0	0.1714	0.9946	0.6865	1143.0	
TOTAL						=	54.3428	60129.8

Fonte: Autor.

Carraro (2015) cita que com os perfis obtidos por Degertekin (2008) e Kaveh e Talatahari (2010), também ocorreram violações nas restrições de certos elementos. Ele ainda traz a dispersão das restrições dos elementos, obtidos pelos dois autores, apresentadas aqui nas Figura 39 e Figura 40.

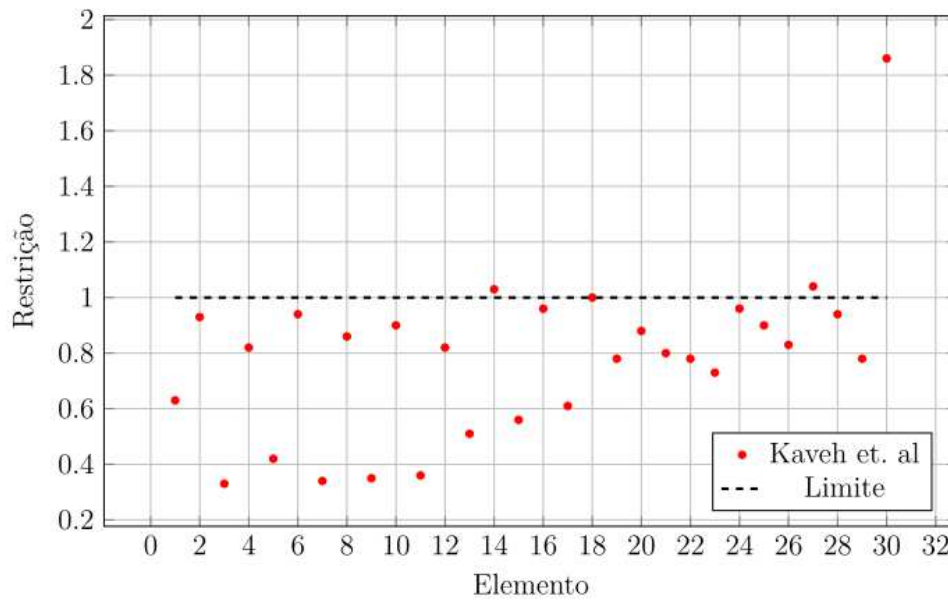
Já Yamamoto (2015), afirma que ao se realizar uma análise estrutural de segunda ordem, a solução encontrada no trabalho de Carraro (2015) acaba também por violar requisitos preestabelecidos. A dispersão desses requisitos encontra-se na Figura 41.

Figura 39 - Restrição por elemento do pórtico P02 - Degertekin (2008).



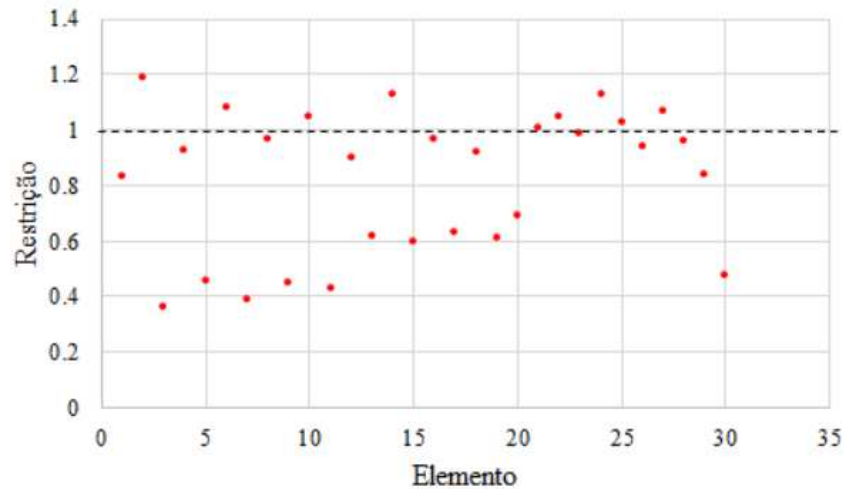
Fonte: (CARRARO, 2015).

Figura 40 - Restrição por elemento do pórtico P02 - Kaveh e Talatahari (2010).



Fonte: (CARRARO, 2015).

Figura 41 - Restrição por elemento do pórtico P02 - Carraro (2015).



Fonte: (YAMAMOTO, 2015)

Diante desses fatos, duas hipóteses são levantadas: não existe solução para o problema; quantidade insuficiente de geração e/ou de indivíduos por geração.

A primeira pode ocorrer quando, dentre os perfis catalogados, não existem seções que suportem de forma segura o carregamento submetido a estrutura, segundo a NBR 8800 de 2008. Apesar da pouca probabilidade, é uma possibilidade que não pode ser descartada. Nessas situações, as soluções seriam: alterar o material para outro tipo de aço com maior resistência e/ou realizar a busca em outro catálogo com perfis mais robustos.

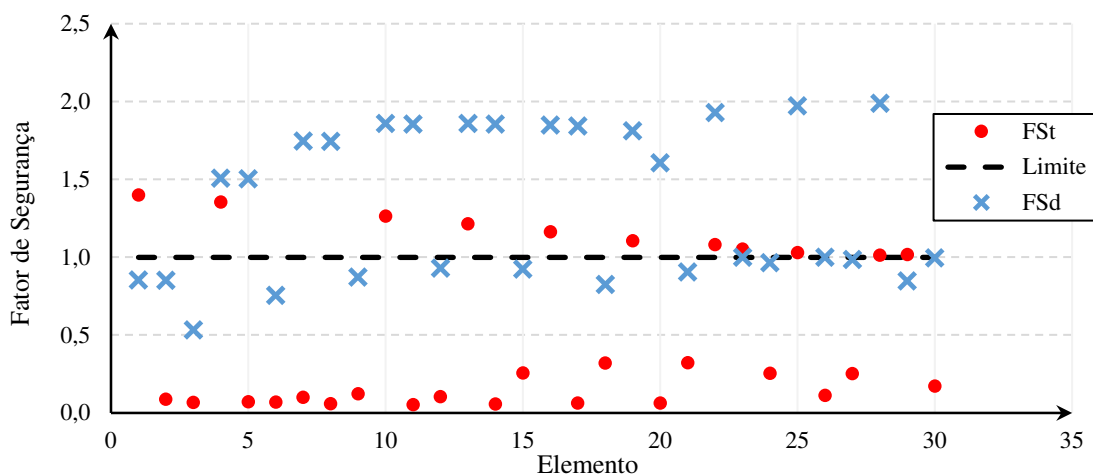
Já a segunda, e mais provável, ocorre quando o campo de busca é muito amplo exigindo uma quantidade de processamento muito superior ao necessitado em problemas comuns. Não se pode afirmar ao certo qual das hipóteses retrata o real motivo da não convergência para uma solução satisfatória. Porém, a complexidade do problema nos induz à segunda hipótese.

Em seu trabalho, Yamamoto (2015) apresenta um arranjo de perfis que atendem aos critérios normativos utilizados por ele e pelos demais autores. No entanto, esse ato não comprova a existência de uma solução para a situação do pórtico P02 nesse trabalho. Carraro (2015) afirma que as diferenças normativas podem inviabilizar a solução de um problema, como por exemplo: o deslocamento máximo permitido pela NBR 8800 de 2008, dada na Equação (36), difere da norma de projeto de estruturas de aço americana (AISC, 2010). Nela a Equação (36) assume um valor na forma da Equação (75).

$$d_{máx} = \frac{H}{300} \quad (75)$$

O gráfico da Figura 42 abaixo, nos mostra que as maiores violações ocorreram justamente nos fatores de segurança relativo aos deslocamentos.

Figura 42 - Fatores de segurança das tenções e deslocamentos do caso 3.



Fonte: Autor.

Outro fato relevante é a não utilização de agrupamentos dos elementos, permitindo que todos eles podem ter seções transversais distintas. A restrição atribuída pelos outros autores, dos quais todos os membros dentro de um grupo terão o mesmo perfil, diminui significativamente a quantidade de arranjos possíveis para o problema. Com isso um indivíduo que ao invés de possuir 30 cromossomos, que é a quantidade de elementos da estrutura, tenha apenas 9 (número de agrupamentos). Assim, é possível reduzir o tamanho da população e aumentar a quantidade de interações, gerando indivíduos cada vez mais aptos.

O problema do pórtico P02 da forma como foi trabalhada por Yamamoto (2015), Carraro (2015), Degertekin (2008) e Kaveh e Talatahari (2010), com os 9 grupos de elementos, tem um espaço de busca na ordem de  $6,36 \times 10^{18}$ , ou seja,  $6,36 \times 10^{18}$  arranjos possíveis a serem analisados. Enquanto que nesse estudo, a quantidade de arranjos possíveis passou a ser  $1,45 \times 10^{72}$ .

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Podemos concluir que o objetivo de criar uma ferramenta computacional para dimensionamento de estruturas metálicas, capaz de otimizá-la, foi alcançado. Seu funcionamento foi validado tanto para realização da análise estrutural e do dimensionamento das peças, quanto para a otimização da massa total do sistema.

Comprovou-se que para pórticos de até 3 pavimentos, com 2 vãos, o algoritmo genético implementado tem o alcance de otimizá-lo sem a necessidade de agrupamentos, chegando a soluções mais leves que as encontradas por outros autores da literatura.

Contudo, para estruturas complexas, como a do pórtico 02, o programa resulta em buscas exaustivas que não são necessariamente capazes de encontrar uma solução como desejada. Esse fato ocorre devido ao número de arranjos possíveis quando se tem grande quantidade de elementos juntamente com grande quantidade de perfis, que acaba por exigir um nível de processamento que ultrapasse os limites de um computador comum. Com isso, é necessária a utilização de agrupamentos afim de diminuir o espaço de busca do problema.

### 5.2 RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados colhidos nesse trabalho, para direcionar os próximos estudos de otimização estrutural recomenda-se:

- criar uma sub-rotina para realizar o agrupamento dos membros do sistema, com o intuito de reduzir a quantidade de arranjos possíveis, diminuindo assim o processamento computacional necessário para a otimização;
- a partir da função aptidão proposta nesse estudo, desenvolver novas formulações para a mesma, com o propósito de aumentar a eficiência do algoritmo;

Além das recomendações acima, com o objetivo de melhorar a interação do usuário (ou pesquisador) e o programa, sugere-se:

- criar uma sub-rotina para conversão das unidades de medida, permitindo a inserção de dados em diferentes unidades;
- criar um banco de dados com as equações apresentadas na Figura 17, automatizando o processo de obtenção das cargas nodais combinadas;
- criação de interfase gráfica para melhorar inserção das informações da estrutura, em especial as coordenadas nodais e as ações solicitantes.

## REFERÊNCIAS

ADELI, H.; SARMA, K. C. **Cost Optimization of Structures: Fuzzy Logic, Genetic Algorithms, and Parallel Computing**. John Wiley & Sons, 2006.

ASANO, P. T. L. et al. Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos. *In*: LOPES, H. S.; TAKAHASHI, R. H. C. (org.). **Computação evolucionária em problemas de engenharia**. Curitiba: Ompipax, 2011. p. 19–54.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8681 - Ações e segurança nas estruturas: Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 8800 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

BARBOZA, A. O. **Simulação e técnicas da computação evolucionária aplicadas a problemas de programação linear inteira mista**. 2005. Tese (Doutorado), UTFP, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2005.

BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O. **Edifícios de múltiplos andares em aço**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2008.

BENTO, E. P.; KAGAN, N. Algoritmos genéticos e variantes na solução de problemas de configuração de redes de distribuição. **Controle & Automação**, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 302–315, 2008.

BERNARDINO, H. S. **Hibridização de Algoritmos Genéticos e Sistemas Imunológicos Artificiais para Problemas de Otimização com Restrições em Engenharia**. 2008. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2008.

BODENHOFER, U. **Genetic Algorithms: Theory and Applications. Fuzzy Logic Laboratory at the Linz-Hagenberg University**, Alemanha, 2004.

BREBBIA, C. A. **Computational Methods for the Solution of Engineering Problems**. 3. ed. Londres: Pentech Press Limited, 1986.

CAÇADOR, F. Edifícios de múltiplos andares em ritmo acelerado. São Paulo, 02 set. 2014. *In*: **Congresso Latino- Americano da Construção Metálica**. São Paulo, 2014.

CARRARO, F. **Otimização estrutural de pórticos planos utilizando o algoritmo SGA**. 2015. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) - Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2015.

COLEY, D. A. **An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers**. Singapore: World Scientific Publishing Company, 1999.

CONSTANTINO, A. A.; LANDA-SILVA, D.; ROMÃO, W. Algoritmo Evolutivo Híbrido para Escalonamento Integrado na Agroindústria. *In*: LOPES, H. S.; TAKAHASHI, R. H. C. (org.). **Computação evolucionária em problemas de engenharia**. Curitiba: Ompipax, 2011. p. 251–272.

- DEGERTEKIN, S. O. Optimum design of steel frames using harmony search algorithm. **Structural and multidisciplinary optimization**, v. 36, n. 4, p. 393-401, 2008.
- FALCONE, M. A. G. E. **Estudo comparativo entre algoritmos genéticos e evolução diferencial para otimização de um modelo de cadeia de suprimento simplificada**. 2004. Dissertação (Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2004.
- FONSECA, M. Da. **Otimização de estruturas treliçadas planas e espaciais sob carregandos estáticos e dinâmicos, usando algoritmos genéticos e redes neurais**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, 2007.
- GERVÁSIO, H. M. A sustentabilidade do aço e das estruturas metálicas. *In: Congresso Latino-Americano da Construção Metálica*. 2008.
- GOLDBERG, D. **Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning**, Addison-Wesley Publishing. Reading, MA, 1989.
- HEITKÖTTER, J. **Hitch-Hikers guide to evolutionary computation**. 1999. Disponível em: <<http://aiinfinance.com/gafaq.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2019.
- HIROSHI, R.; TAKAHASHI, C. **Computação evolucionária em problemas de engenharia**. Curitiba: Omnipax, 2011.
- KAVEH, A.; TALATAHARI, S. An improved ant colony optimization for the design of planar steel frames. **Engineering Structures**, v. 32, n. 3, p. 864-873, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.12.012>>.
- KOZA, J. R. et Al. **Genetic programming IV: Routine human-competitive machine intelligence**. New York: Springer Science & Business Media, 2006.
- LEMONGE, A. C. C. et al. A Genetic Algorithm for optimization of Geometrically nonlinear truss structures. *In: Simpósio De Mecânica Aplicada E Computacional*, p. 15, 2010.
- LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos: Teoria e Implantação**. 3ª ed. Editora Ciência Moderna, 2005.
- MARTHA, L. F. **Método da rigidez direta para modelos estruturais lineares e elásticos**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2018a.
- MARTHA, L. F. **Ftool: Two-Dimensional Frame Analysis Tool. Versão 4.00.04 Básico**. 2018b. Disponível em: <<https://www.ftool.com.br/Ftool/>>. Acesso em: 21 out. 2019.
- OLIVEIRA, B. de S. **Implementação e modelagem do método de rigidez direta em pórticos espaciais**. 2018. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2018. Disponível em: <<http://bdm.unb.br/handle/10483/21440>>
- OLIVIERI, B. P. **Otimização do Projeto de Pontes Protendidas Pré-Moldadas pelo Método dos Algoritmos Genéticos**. 2004. Tese (Mestre em Ciências em Engenharia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

- ORSE - Orçamento de Obras de Sergipe.** 2019. Disponível em: <<http://187.17.3.14/insumos.asp>>. Acesso em: 23 nov. 2019.
- PEZESHK, S.; CAMP, C. V. Design of Nonlinear Framed Structures Using Genetic Optimization. **Journal of Structural Engineering**, v. 126, n. 3, p. 382–388, 2000.
- PFEIL, W. **Estruturas de aço - Dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008.** 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- PINHO, A. F. De et al. Algoritmos Genéticos: Fundamentos e Aplicações. *In*: LOPES, H. S.; RODRIGUES, L. C. de A.; STEINER, M. T. A. **Meta-heurísticas em pesquisa operacional.** p. 21–32, 2013.
- PIZZIRANI, F. **Otimização Topológica de Estruturas Utilizando Algoritmos Genéticos.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/265124>>. Acesso em: 23 nov. 2019.
- RIBEIRO, L. M. P. **Otimização e Dimensionamento de Treliças Planas de Madeira Empregando o Método dos Algoritmos Genéticos.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- SALMON, C. G.; JOHNSON, J. E.; MALHAS, F. A. **Steel Structures. Design e Behavior.** 5ª ed. New Jersey: Pearson, 2008.
- SILVA, F. B. dos S. **Algoritmos Genéticos para Otimização de Estruturas Reticuladas Baseadas em Modelos Adaptativos e Lagrangeano Aumentado.** 2011. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.
- SIVANANDAM, S. N.; DEEPA, S. N. **Introduction to genetic algorithms.** Springer Berlin Heidelberg: New York, 2008.
- SOARES, M. M. **Análise do uso de Algoritmos Genéticos na Otimização do Planejamento Mestre da Produção.** 2006. Dissertação (Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2006.
- SOUZA, A. S. C. De. **Dimensionamento de Elementos Estruturais em Aço Segundo a NBR 8800:2008.** São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2009.
- SOUZA, N. A. De. **Otimização de Treliças Metálicas Planas Utilizando Algoritmos Genéticos.** 2016. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso), UFOB, Barreiras, 2016a.
- SOUZA, F. R. V. **Implementação Computacional do Método da Rigidez Direta para Análise de Sistemas Estruturais Planos.** 2016. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) - Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, 2016b.
- STEEL Construction Manual Shapes Database. 2017. Disponível em: <<http://www.aisc.org/content.aspx?id=2868>>. Acesso em: 22 nov. 2019.

SYSWERDA, G. Uniform crossover in genetic algorithms. *In: Proceedings Of The Third International Conference On Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann Publishers, 1989. p. 2-9.

TANOMARU, J. Motivação Fundamentos e Aplicações de Algoritmos Genéticos. *In: II Congresso Brasileiro De Redes Neurais*, Tokushima: Universidade de Tokushima, 1995.

TORABI, S. A.; GHOMI, S. M. T. F.; KARIMI, B. A hybrid genetic algorithm for the finite horizon economic lot and delivery scheduling in supply chains. **European Journal of Operational Research**, v. 173, p. 173–189, 2006.

VIEIRA, P. C. dos S. **Matriz de Rigidez - Método dos Deslocamentos - Pórticos Planos**, Universidade Federal do Oeste da Bahia, 25 mar. 2019, 23 jul. 2019. 12 p. Notas de Aula.

VIEIRA, P. C. dos S.; SILVA, G. N. Algoritmos genéticos para otimização de custos de redes de distribuição de águas com critérios de projeto e o método de newton para as equações de fluxo. **Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)**, v. 26, n. 1, p. 69–79, 2017.

WEAVER, W.; GERE, J. M. **Matrix Analysis of Framed Structures**. 3. ed. New York: Springer, 1990.

YAMAMOTO, K. A. R. **Otimização estrutural de pórticos planos com o uso do algoritmo SGA e análise não-linear**. 2015. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

## ANEXO A

Tabela A. 1 - Custos unitários de perfis de aço laminado de setembro de 2019.

<b>Código</b>	<b>Descrição do Insumo</b>	<b>Unidade</b>	<b>Custo Unit.</b>
13073	Perfil Aço Laminado, H - W150 x 22,5 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	6,08
13074	Perfil Aço Laminado, H - W150 x 29,8 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	6,08
13075	Perfil Aço Laminado, H - W200 x 22,5 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	6,08
13079	Perfil Aço Laminado, H - W200 x 53 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,70
13080	Perfil Aço Laminado, H - W250 x 62 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,70
13081	Perfil Aço Laminado, H - W250 x 80 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,72
13083	Perfil Aço Laminado, H - W310 x 107 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,72
13082	Perfil Aço Laminado, H - W310 x 93 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,72
13084	Perfil Aço Laminado, H - W360 x 110 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,72
13085	Perfil Aço Laminado, I - W150 x 13 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,72
13086	Perfil Aço Laminado, I - W150 x 18 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,72
13087	Perfil Aço Laminado, I - W200 x 26 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	6,08
13088	Perfil Aço Laminado, I - W200 x 31,3 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	6,08
13090	Perfil Aço Laminado, I - W250 x 28,4 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,70
13273	Perfil Aço Laminado, I - W250 x 32,7 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,70
13091	Perfil Aço Laminado, I - W250 x 38,5 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,70
13092	Perfil Aço Laminado, I - W310 x 21,0 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	6,08
13093	Perfil Aço Laminado, I - W310 x 28,3 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,70
13094	Perfil Aço Laminado, I - W310 x 38,7 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,70
12875	Perfil Aço Laminado, I - W310 x 44,5 kgf/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,70
13043	Perfil Aço Laminado, I - W310 x 44,5 kgf/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,70
13046	Perfil Aço Laminado, I - W310 x 52kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,70
13095	Perfil Aço Laminado, I - W360 x 39,0 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,70
13096	Perfil Aço Laminado, I - W360 x 51,0 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,70
13097	Perfil Aço Laminado, I - W360 x 64,0 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,72
13047	Perfil Aço Laminado, I - W410 x 67,0 kg/m ASTM A 572 Grau 50	kg	5,72

Fonte: ORSE. Disponível em: <http://187.17.3.14/insumos.asp>. Acesso em: 23 nov 2019.

## APÊNDICE A - Arquivos em formato “.txt”

Figura A.1 - Arquivo ".txt" de entrada para o pórtico P00, caso 1.

Dados para o Algoritmo Genético										
PSIZE	NUNKNO	SUBLEN	MAXG	Pc	C	ELT	LF	E	FY	FU
50	2	12	100	0.7	2	0	50.	20000.	34.5	45.
Pórtico P00 - Pórtico com dois elementos										
Nn	Ne	NGL	Nne	Ncn	Ncc					
3	2	3	2	5	6					
NÓ	X	Y								
1	0	0								
2	0	300								
3	500	300								
ELEM	NÓ i	NÓ j	IRZ							
1	1	2	11							
2	2	3	11							
CARGA	NÓ	DIR.	VALOR							
1	2	1	2							
2	2	2	-50							
3	2	3	-4000.							
4	3	2	-50							
5	3	3	4000.							
COND.	NÓ	DIR.	VALOR							
1	1	1	0.0							
2	1	2	0.0							
3	1	3	0.0							
4	3	1	0.0							
5	3	2	0.0							
6	3	3	0.0							
NUM.	TIPO	ORT								
1	PILAR	2								
2	VIGA	1								

Fonte: Autor.

Figura A.2 - Exemplo genérico de arquivo ".txt" de saída com resultados da otimização.

MELHOR SOLUÇÃO							
GERAÇÃO:		INDIVÍDUO:		APTIDÃO:			
Elemento	Perfil	Decimal (cm <sup>2</sup> )	Área (cm <sup>2</sup> )	FSt	FSD	Peso	Massa (kg)
					TOTAL	=	
DESLOCAMENTOS NODAIS FINAIS							
NÓ	UX (cm)		UY (cm)		RZ (rad)		
REAÇÕES NODAIS							
NÓ	PX (kN)		PY (kN)		MZ (kN.cm)		
FORÇAS INTERNAS							
BARRA	NÓ	PX (kN)		PY (kN)		MZ (kN.cm)	

Fonte: Autor.

Figura A.3 - Exemplo genérico de arquivo ".txt" de saída com resumo de um problema.

```

UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA -- UFOB
CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS -- CCET
ENGENHARIA CIVIL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)
ORIENTADO: Áleson Miranda Barreto
ORIENTADOR: Prof. Dr. Pedro Cláudio dos Santos Vieira

```

---

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PÓRTICO PLANO METÁLICO VIA ALGORITMOS GENÉTICOS

---

PROPRIEDADES DO SISTEMA

---

NÚMERO DE NÓS =  
NÚMERO DE ELEMENTOS =  
GRAUS DE LIBERDADE POR NÓ =  
SEMI\_LARGURA DE BANDA =  
NÚMERO DE NÓ POR ELEMENTO =  
NÚMERO DE CARGAS NODAIS =  
NÚMERO DE CONDIÇÕES DE CONTORNO =

---

PROPRIEDADES MECÂNICAS E GEOMÉTRICAS

---

COORDENADAS NODAIS

NÓ	X (cm)	Y (cm)
----	--------	--------

---

CONNECTIVIDADE DOS ELEMENTOS

ELEM	NO I	NO F	IRZ
------	------	------	-----

---

CARGAS NODAIS

CARGA	NÓ	DIR.	VALOR
-------	----	------	-------

---

CONDIÇÕES DE CONTORNO NODAIS

COND.	NÓ	DIR.	VALOR
-------	----	------	-------

---

PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS

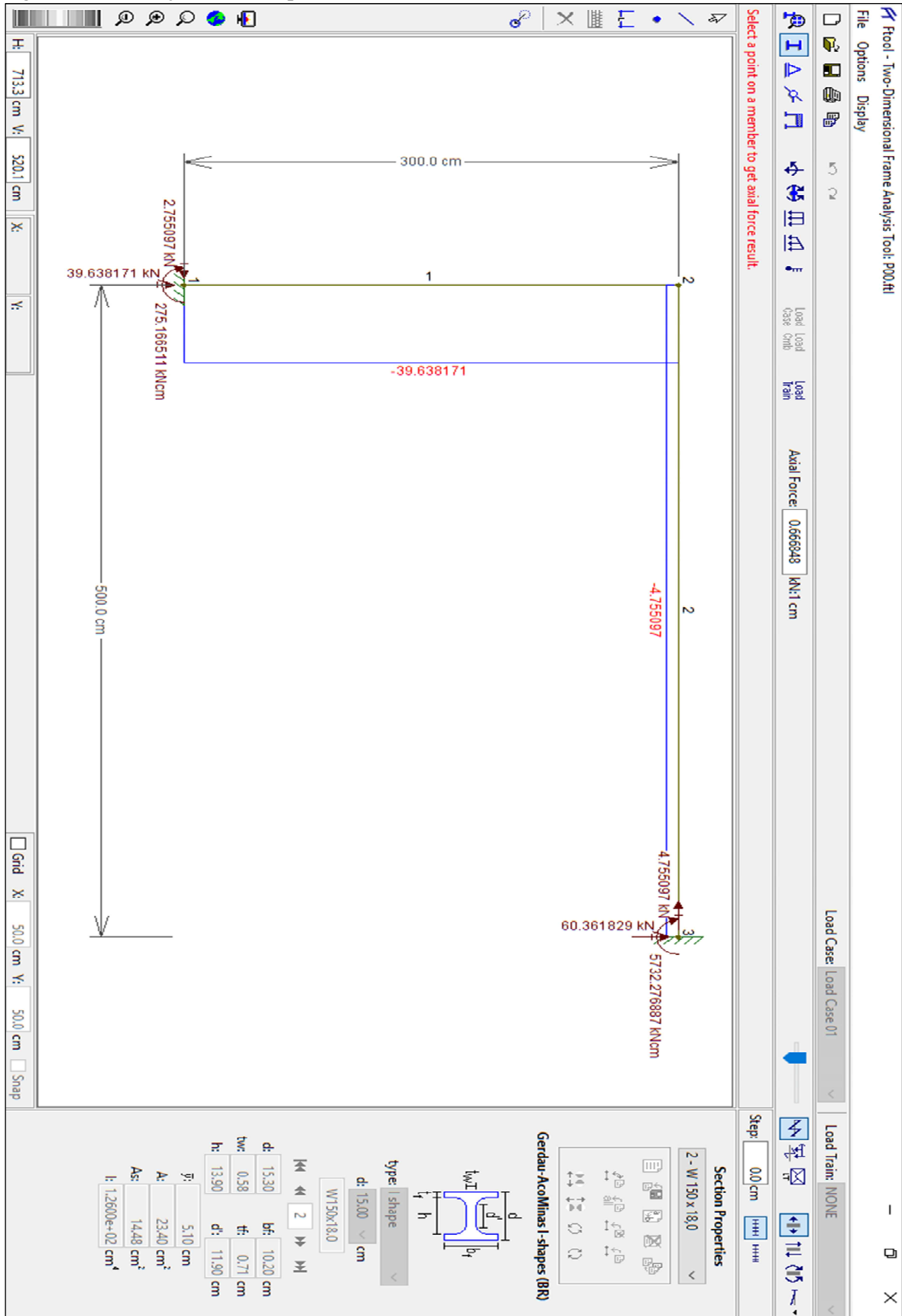
NUM.	TIPO
------	------

---

Fonte: Autor.

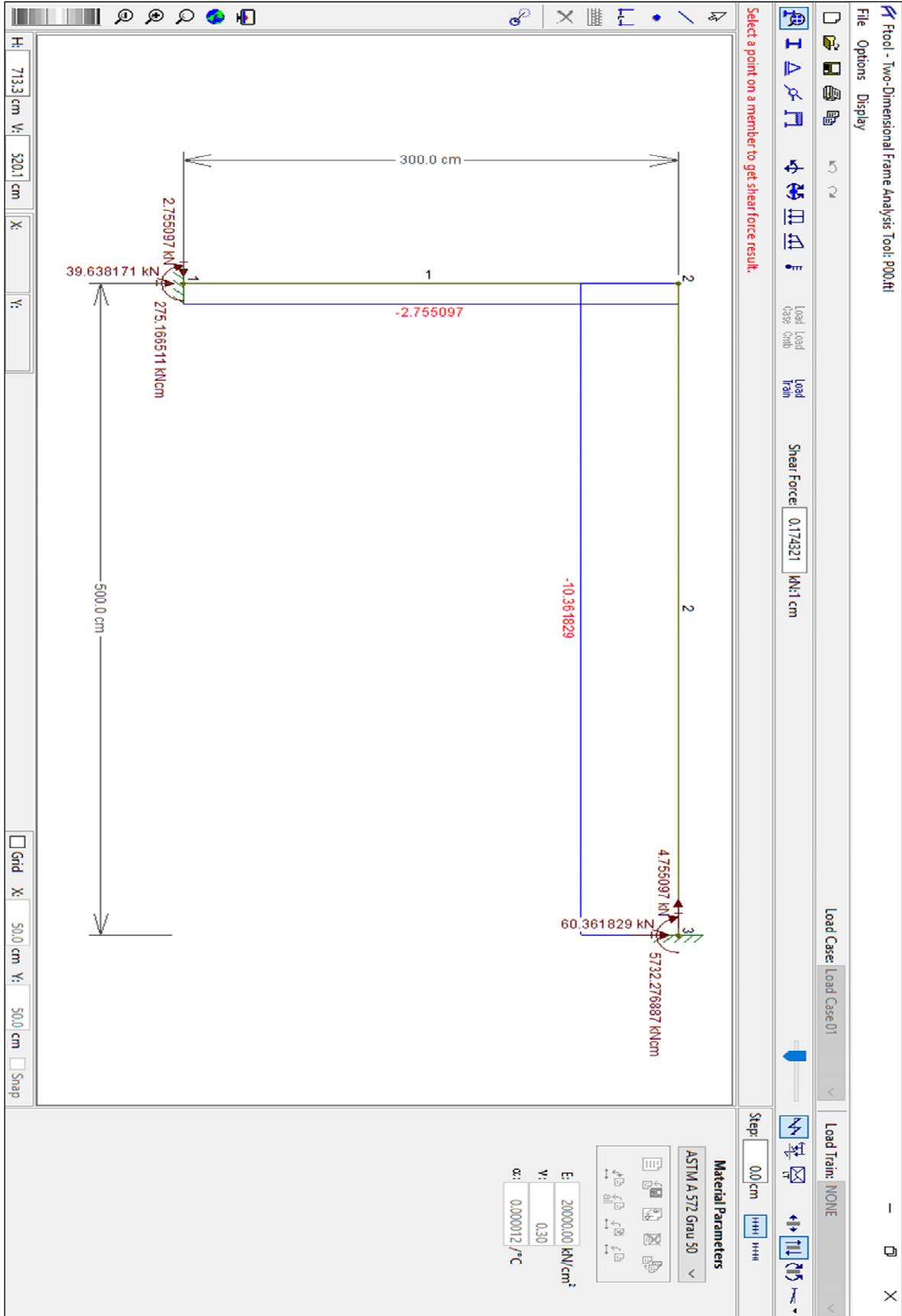
## APÊNDICE B - Resultados do software *Ftool*

Figura B.1 - Esforços axiais do pórtico P00 calculados no *Ftool*.



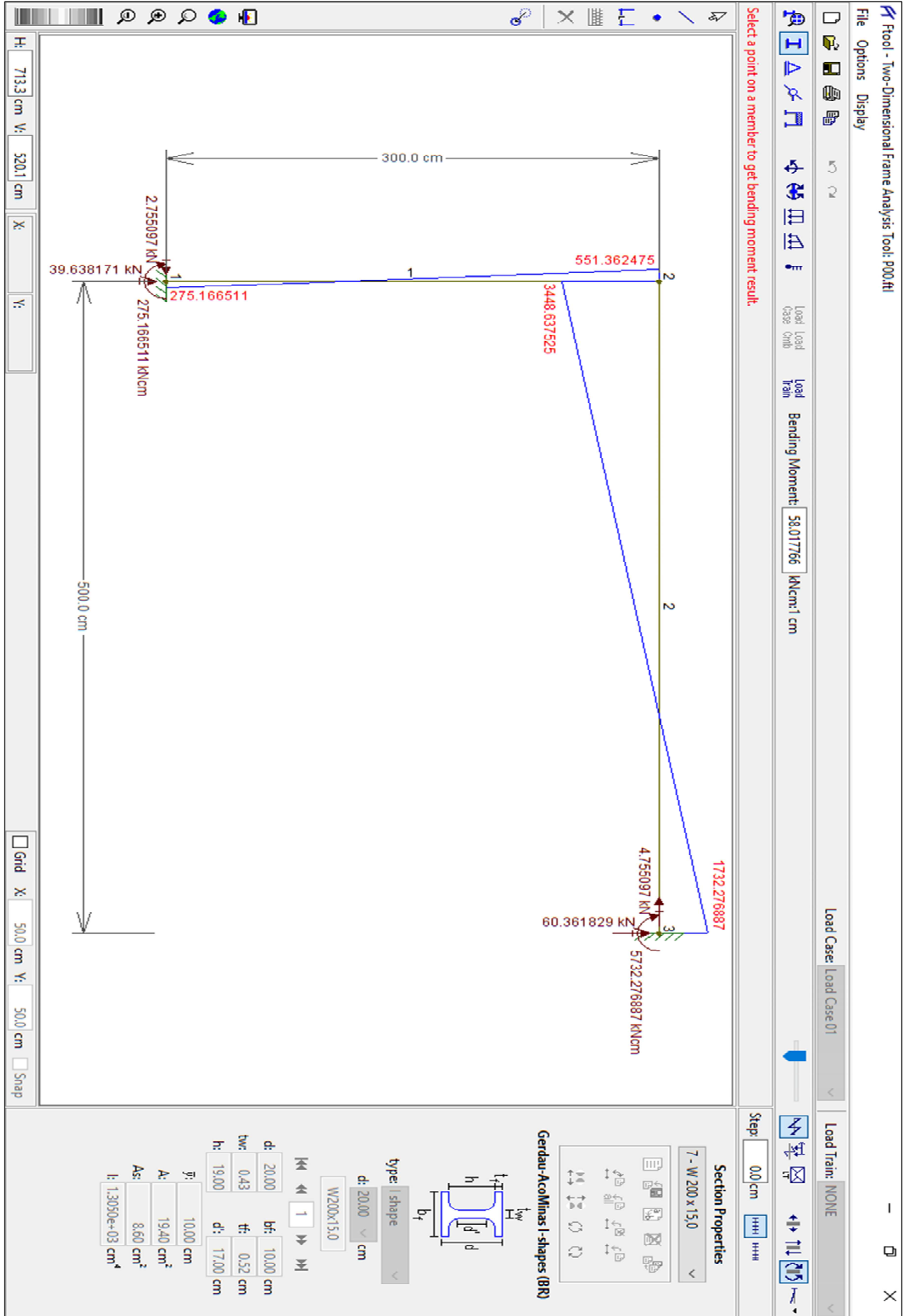
Fonte: Autor.

Figura B.2 - Esforços cisalhantes do pórtico P00 calculados no *Ftool*.



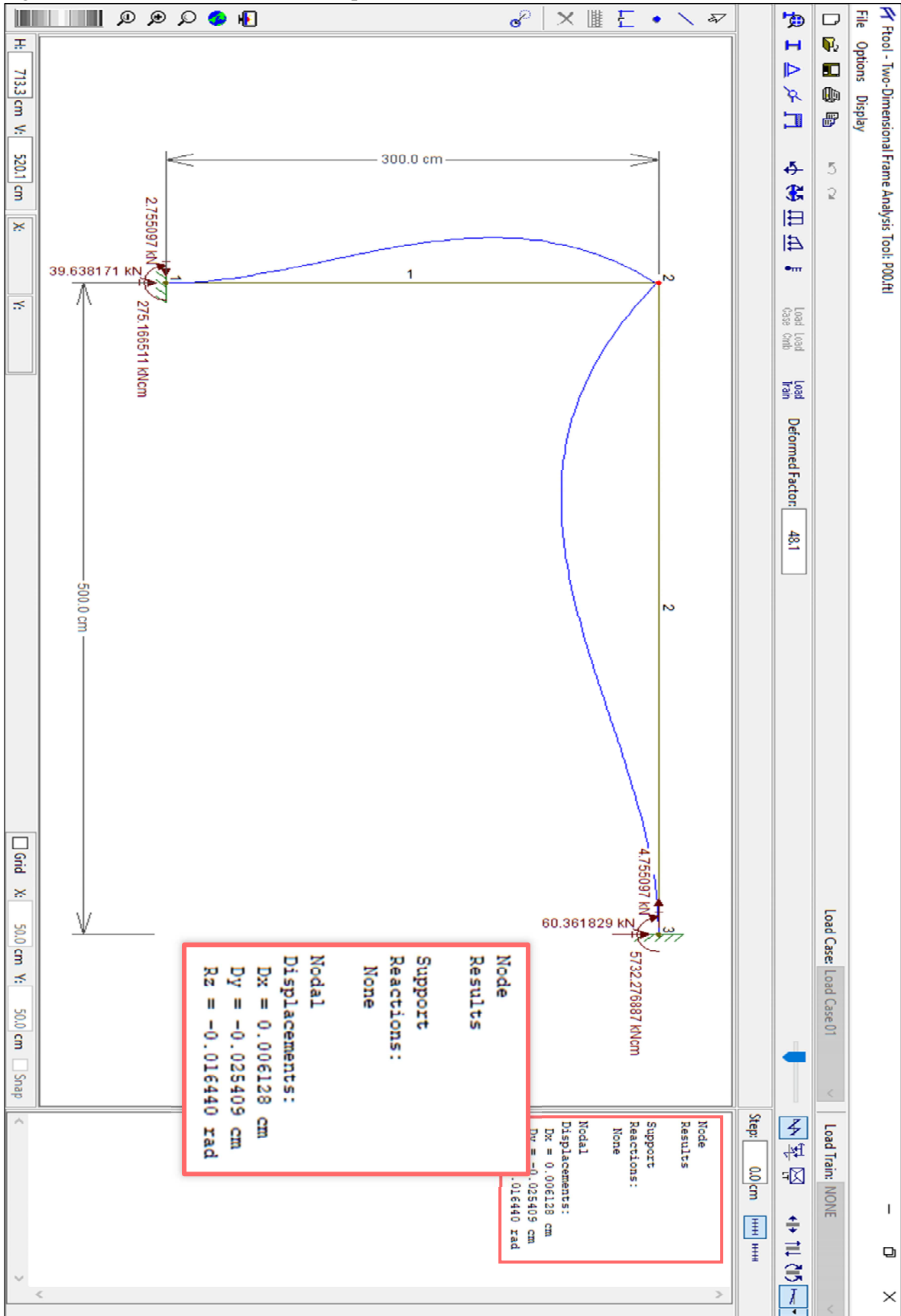
Fonte: Autor.

Figura B.3 - Esforços de flexão do pórtico P00 calculados no *Ftool*.



Fonte: Autor.

Figura B.4 - Deslocamentos nodais do pórtico P00 calculados no *Ftool*.



Fonte: Autor.