



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

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA A BUSCA DE
PERFIS ÓTIMOS NA OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PÓRTICOS
PLANOS NO SOFTWARE SAP2000

YAGO CONEGUNDES SOUSA

BARREIRAS-BA

2023

YAGO CONEGUNDES SOUSA

**APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA A BUSCA DE
PERFIS ÓTIMOS NA OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PÓRTICOS
PLANOS NO SOFTWARE SAP2000**

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

Orientador: Dr. Pedro Cláudio dos Santos Vieira

BARREIRAS-BA

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

S725 Sousa, Yago Conegundes.

Aplicação de Algoritmos Genéticos para busca de perfis ótimos na otimização estrutural de pórticos planos no software SAP2000. / Yago Conegundes Sousa – 2023.

94f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Cláudio dos Santos Vieira.

Monografia (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil.
Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. Barreiras, BA, 2023.

1. Algoritmo genético. 2. Otimização estrutural. I. Vieira, Pedro Cláudio dos Santos. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia - Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD 624.17713

YAGO CONEGUNDES SOUSA

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PÓRTICOS PLANOS:
COMPARATIVO ENTRE ALGORITMOS GENÉTICOS E
SOFTWARE SAP2000**

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.

Aprovada em 29 de Junho de 2023

Banca Examinadora

Orientador(a):

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

Me. Kuelson Randello Dantas Maciel
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Dr. Kleymilson do Nascimento Souza
Universidade Federal do Oeste da Bahia

*À minha família que tanto amo e
principalmente aos meus pais, Zesito e
Dinair, que sem o apoio deles seria
impossível.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por todas as bênçãos concedidas, discernimento e por ter me concedido saúde física e mental ao longo desse caminho e ter me dado uma família maravilhosa e ter colocado pessoas tão incríveis na minha vida.

Agradeço à minha família incrível, principalmente, aos meus pais que tanto amo, Zesito Fernandes Sousa e Dinair Conegundes Sousa, sem eles seria impossível, por todo o apoio nos momentos de adversidade, apoio emocional, financeiro, conselhos e por toda a paciência ao longo dessa longa jornada. Agradeço também minhas irmãs Ester Conegundes Sousa e Yane Conegundes Sousa que sempre me apoiaram e sempre estavam disponíveis para quando eu precisava.

Gostaria de agradecer a minha futura esposa, Amanda Trindade, a mulher que escolhi viver para o resto da minha vida, por estar sempre com um abraço reconfortante e um ombro amigo nos momentos difíceis e um sorriso lindo nos momentos de alegria.

Agradeço ao Professor Pedro Cláudio, por me orientar nessa jornada, sempre solícito, paciente, um profissional incrível que sempre admirei.

Aos professores Kuelson Randello e Kleymilson do Nascimento, pela disponibilidade para avaliar esse trabalho sempre com orientações pertinentes e importantes desde o projeto de trabalho de conclusão de curso.

Agradecer aos companheiros de jornada, alguns desde o período de Bacharelado Interdisciplinar em Ciências e Tecnologia, em especial aos amigos, Kayo, Pedro, Bruno, Diago, André, e que vou levar para o resto da vida.

Agradecer às empresas Metta Engenharia, Melo & Bastos e Andrea Rocha & Ronald Azevedo Arquitetura, pela oportunidade de estágio, em especial ao Engenheiro Maurício Rocha do Livramento responsável técnico pela Metta Engenharia, por tantos anos de ensinamento e paciência, um profissional que me espelho em ser algum dia, espero que essa parceria se torne duradoura na minha vida profissional, e a Engenheira Cláudia Galindo, e ao Professor Cláudio Alex, pela oportunidade no estágio obrigatório, e uma excelente profissional e um excelente professor, sempre disponíveis para quando precisei.

Também não poderia esquecer dos meus amigos de infância, principalmente Álvaro, Caique, Enzo, Henrique e Iure que sempre me apoiaram nessa decisão, e sempre trouxeram momentos de alegrias e diversão para minha vida.

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,

por não medirem esforços para proporcionar uma educação de qualidade aos alunos, em especial aos incríveis professores, Elier Pavón, Juarez Hoope, Luis Gustavo, Oizy Hernandez, Vinícius Kuhn, Weriskiney Almeida, Claudio Alex, Pedro Paulo e Dennis Coelho e Lauriclécio Lopes.

RESUMO

A otimização estrutural é um processo que visa atender às restrições de projeto de maneira eficiente, utilizando a menor quantidade de materiais com o máximo de segurança. O uso de computadores para a otimização estrutural tem sido uma realidade desde o século passado, com a capacidade de processamento aumentando cada vez mais, novos métodos de otimização vêm sendo estudados. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta em Python para otimizar um pórtico plano metálico usando AG. Para a análise estrutural, foi desenvolvido um código baseado no método da rigidez direta, enquanto o dimensionamento foi realizado de acordo com a norma NBR 8800:2008. A busca pela melhor solução requer a avaliação de várias configurações diferentes, e com base nos resultados obtidos, podemos buscar a solução mais adequada. Utilizamos o software SAP2000 para comparar a capacidade de demanda e buscar a melhor solução possível. No entanto, os resultados obtidos por meio dos AG foram inconsistentes, pois, ao aplicar os perfis obtidos no SAP2000, os valores dos fatores de carga não foram confiáveis. A principal razão para essa inconsistência reside na forma como cada método funciona. Os AG utilizam cargas nodais, o que resulta em valores imprecisos para o momento solicitante, ao contrário do SAP2000, que utiliza o método dos elementos finitos. Portanto, é necessário investigar e aprimorar a compatibilidade entre os resultados obtidos pelos AG e as exigências do SAP2000, a fim de obter resultados mais confiáveis e precisos na otimização estrutural.

Palavras-chave: Algoritmo Genético; SAP2000; Pórticos Planos; Método dos Elementos Finitos; Python, AISC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma de um AG genérico	21
Figura 2: Cruzamento de ponto único	24
Figura 3: Configuração deformada de um pórtico plano formada pela superposição de configurações deformadas elementares.	27
Figura 4: Consideração das restrições para o método simplificado	28
Figura 5: Consideração das restrições para o método computacional.....	28
Figura 6: Configuração da deformada de uma barra isolada no eixo local.	29
Figura 7: Deslocamentos de uma barra de pórtico plano em um eixo local isolando cada carregamento	29
Figura 8: Coeficiente de rigidez de barras submetidas à esforços axiais de barras sem articulação.....	29
Figura 9: Coeficiente de rigidez de carregamentos à flexão de barra isolada sem flexão...	30
Figura 10: Representação dos deslocamentos do sistema global no sistema local.	32
Figura 11: Parâmetros AL do perfil W	37
Figura 12: Parâmetros do perfil W do tipo AA	38
Figura 13: Exemplo de coordenada local de sistema frame paralelo ao eixo y.....	46
Figura 14: Exemplo de coordenada local de sistema frame paralelo ao eixo y.....	46
Figura 15: Força Axial P Positiva e Momento de Torção T Positivo no Elemento FRAME	47
Figura 16: Força Cortante V2 Positiva e Momento Fletor M3 Positivo no Elemento FRAME	47
Figura 17: Força Cortante V3 Positiva e Momento Fletor M2 Positivo no Elemento FRAME	47
Figura 18: Perfil transversal I	49
Figura 19: Pórtico Plano do Caso 01 - Degertekin (2007)	51
Figura 20: Pórtico Plano do Caso 02 - Degertekin (2007).	52
Figura 21: Fluxograma do Algoritmo Genético	53
Figura 22: Reações de engastamento perfeito de cargas distribuídas	55
Figura 23: Nomenclatura das barras e nós do Caso 01.....	60
Figura 24: Pórtico Plano com cargas na unidade do SI.	61
Figura 25: Pórtico Plano Dimensões nas Unidades do SI	61
Figura 26: Caso 01 - Degertekin (2007) – Lançado no AUTOCAD	62
Figura 27: Importação de arquivo .DXF para o SAP2000	62
Figura 28: Propriedades do Aço A572Gr50	63
Figura 29: Inserindo restrições no apoio	64
Figura 30: Padrão de Cargas.....	64
Figura 31: Inserindo Cargas Nodais	65
Figura 32: Inserindo Cargas Distribuídas	65
Figura 33: Dimensionamento Automático	66
Figura 34: Saída dos Dados	67
Figura 35: Saída dos Dados	68
Figura 36: Resultados detalhado da barra 12.....	69
Figura 37: Resultados detalhado da barra 12.....	69
Figura 38: Nomenclatura das barras e dos nós do Caso 02	71
Figura 39: Pórtico plano do Caso 02 com cargas em unidade do SI.	72
Figura 40: Cotas do caso 2.	73
Figura 41: Resultado da solução 2 do caso 1.....	76
Figura 42: Valores do melhor indivíduo da solução 2.....	77

Figura 43: Aptidão dos melhores indivíduos.....	77
Figura 44: Massa dos melhores indivíduos	78
Figura 45: Perfis da solução 2 do caso 1.	79
Figura 46: Resultados da flexo-compressão das barras para o Caso 01.....	79
Figura 47: Solução 3 do caso 2.....	81
Figura 48: Aptidão dos melhores indivíduos da solução 3 do caso 2.....	82
Figura 49: Massa dos melhores indivíduos da solução 3 do caso2	82
Figura 50: Resultados da solução 5 do caso 2.....	83
Figura 51: Perfis da solução 3 do caso 2 no SAP200.....	84
Figura 52: Capacidade de demanda dos perfis da solução 3 do caso 2.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de K_x e K_y	40
Tabela 2: Parâmetros dos estados limites de Perfis W.	42
Tabela 3: Dados de entrada para 5 soluções para o caso 1	70
Tabela 4: Dados de entrada para 5 soluções do caso 02	74
Tabela 5: Resultados das soluções do caso 1.	75
Tabela 6: Resultados das soluções do caso 2.	80

LISTA DE SÍMBOLOS

A_i	Área da seção;
L_i	Comprimento do i -ésimo elemento;
N_e	Número de barras;
ϕ	Coefficiente de penalidade;
ρ_i	Probabilidade de seleção;
L_f	Fator de normalização;
F_i	Aptidão do indivíduo;
np	Tamanho da população;
$s(x)$	Função de adequação;
$f(x)$	Função objetivo;
f_{\min}	Aptidão mínima;
f_{med}	Aptidão média;
f_{\max}	Aptidão máxima;
F	Força;
k	Constante elástica;
x	Deslocamento sofrido pelo corpo elástico;
E	Módulo de elasticidade;
l	Comprimento da barra;
f'	Vetor de forças generalizadas de uma barra do sistema local;
d'	Vetor de deslocamento de uma barra do sistema local;
k'	Matriz rigidez de uma barra no sistema local;
$H_{1,2}$	Resultante horizontal global;
$V_{1,2}$	Resultante vertical global;
$M_{1,2}$	Resultante de momento global;
$f'_{1,4}$	Esforço axial local;
$f'_{3,6}$	Esforço de momento local;
$f'_{2,5}$	Resultante do momento binário;
L	Comprimento da barra
β	O ângulo da barra com o eixo x do sistema global;
X_1	Coordenada X global do nó inicial da barra;

X_2	Coordenada X global do nó final da barra;
R_d	Esforço resistente de projeto;
S_d	Esforço solicitante de projeto;
$N_{c,sd}$	Força axial solicitante de cálculo de compressão;
$N_{c,rd}$	Força axial resistente de cálculo de compressão;
Q	Fator de redução total associado à flambagem local;
χ	Fator de redução associado à resistência à compressão;
f_y	Resistência ao escoamento do aço;
γ_{a1}	Coeficiente de ponderação das resistências para análise de escoamento, flambagem e instabilidade do aço estrutural;
A_g	Área bruta da seção transversal da barra;
Q_a	Fator de redução com relação à flambagem local da alma de seções I;
Q_s	Fator de redução com relação à flambagem local da mesa de seções I;
K	Coeficiente de flambagem;
I	Momento de inércia;
$N_{t,sd}$	Força axial solicitante de cálculo
$N_{t,rd}$	Força axial resistente de cálculo;
A_e	Área líquida efetiva da seção transversal da barra;
A_n	Área líquida da seção;
c_t	Coeficiente de redução da área líquida;
M_{sd}	Momento solicitante de cálculo;
M_{rd}	Momento resistente de cálculo;
V_{sd}	Força cortante solicitante de cálculo;
V_{rd}	Força cortante resistente de cálculo;
$d_{m\acute{a}x}$	Deslocamento máximo
t_f	Espessura da mesa;
b_f	Largura da mesa;
FS_t	Fator de segurança relacionado às tensões do membro;
FS_d	Fator de segurança em relação aos deslocamentos nadeis do membro;
γ_τ	Coeficiente de penalidade do FS_t ;
γ_d	Coeficiente de penalidade do FS_d ;
ω_i	Peso dos perfis por metro linear;

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Gerais	17
1.2.2	Específicos	17
2.	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	18
2.1.1	Algoritmos Genéticos.....	19
2.1.2	Esquema de um AG	20
2.1.3	Operadores Genéticos	23
2.2	ANÁLISE ESTRUTURAL	25
2.2.1	Deslocabilidades do Sistema	26
2.2.2	Rigidez Direta.....	27
2.3	DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS	35
2.3.1	Propriedades mecânicas	36
2.3.2	Peças comprimidas	36
2.3.3	Peças Tracionadas	40
2.3.4	Peças submetidas à flexão simples.....	41
2.3.5	Peças submetidas à flexão composta	43
2.3.6	Deslocamento Máximo	44
2.4	SOFTWARE SAP2000.....	45
2.4.1	Elemento Frame.....	45
2.4.2	Propriedades dos Materiais	48
2.4.3	Propriedades Geométricas	48
2.4.4	Seção Transversal	49
2.5	CUSTO.....	49
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1	CASOS	51
3.1.1	Caso 01.....	51
3.1.2	Caso 02.....	51
3.2	CÓDIGO EM ALGORITMO GENÉTICO	53
3.2.1	Rotina de Entrada.....	54
3.2.2	Análise Estrutural (PORTAN)	54

3.2.3	Rotina Dimensionar	55
3.2.4	Quantidades de bits	56
3.2.5	Mutação	56
3.2.6	Rotina de impressão dos resultados (SAIDA)	57
3.3	FUNÇÃO APTIDÃO	57
3.4	DIMENSIONAMENTO	60
3.4.1	Caso 01	60
3.4.1.1	Dimensionamento pelo SAP2000	61
3.4.1.2	Dimensionamento Pelo Algoritmo Genético	70
3.4.2	Caso 2	70
3.4.2.1	Dimensionamento SAP2000	73
3.4.2.2	Dimensionamento Algoritmos Genéticos	73
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.1	CASOS	75
4.1.1	Caso 01	75
4.1.1.1	Inserindo os perfis obtidos no AG no SAP2000 no caso 1	79
4.1.2	Caso 02	80
4.1.2.1	Inserindo os perfis do AG no SAP2000 para o caso 2	84
	CONCLUSÃO	86
	REFERÊNCIAS	87
	APÊNDICE A – DADOS DE ENTRADA	91
	APÊNDICE B - CÓDIGO	93

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Pfeil (2022), o ferro fundido foi o primeiro material siderúrgico utilizado na construção. Durante o período de 1780 a 1820, foram construídas pontes em arco ou treliça com elementos de ferro fundido que funcionavam em compressão. A primeira ponte a utilizar ferro fundido foi a ponte de Coalbrookdale, localizada sobre o rio Severn, na Inglaterra. Essa ponte foi construída em 1779 e consiste em um arco com um vão de 30 metros.

Ainda segundo Pfeil (2022), o aço já era conhecido desde a Antiguidade, mas não estava disponível a preços competitivos devido à falta de um processo industrial de fabricação eficiente. Em 1856, o inglês Henry Bessemer inventou um forno que permitiu a produção em larga escala do aço, a partir das décadas de 1860 e 1870. Em 1864, os irmãos Martin desenvolveram outro tipo de forno com maior capacidade. A partir desse momento, o aço rapidamente substituiu o ferro fundido e o ferro forjado na indústria da construção.

Durante meados do século XIX, houve uma diminuição no uso de ferro fundido em favor do ferro forjado, devido à sua maior segurança. As pontes ferroviárias em treliças de ferro forjado foram as estruturas mais importantes construídas entre 1850 e 1880. No entanto, o grande número de acidentes envolvendo essas estruturas tornou evidente a necessidade de estudos mais aprofundados e de materiais com características superiores (PFEIL, 2022).

No Brasil, a ponte sobre o rio Paraíba do Sul, localizada no estado do Rio de Janeiro, foi inaugurada em 1857. Os vãos de 30 metros foram superados por arcos atirantados, com os arcos compostos por peças de ferro fundido montadas por encaixe e os tirantes em ferro forjado (PFEIL, 2022).

Com o avanço da ciência das construções e da metalurgia, as estruturas metálicas alcançaram formas funcionais e ousadas, tornando-se verdadeiros marcos da tecnologia. No Brasil, um exemplo notável são os vãos metálicos da Ponte Rio-Niterói, com vãos laterais de 200 metros e um vão central de 300 metros, estabelecendo um recorde mundial em vigas retas (PFEIL, 2022).

Segundo Resende (2020), as maiores vantagens da estrutura de aço, são: alta resistência se comparado com outros materiais, homogeneidade do material, alto padrão de qualidade da produção, podem ser desmontados e reforçados quando necessário, reaproveitamento do material, menor consumo de água, menor geração de resíduos e menor prazo de execução.

Segundo Rao (1996), a otimização envolve obter o melhor resultado possível em determinadas circunstâncias. No contexto de projetos, construção e manutenção de sistemas de engenharia, os engenheiros são confrontados com diversas decisões tecnológicas e gerenciais em diferentes estágios. O objetivo principal dessas decisões é minimizar o esforço necessário ou maximizar os benefícios desejados. Uma vez que o esforço ou benefício em uma situação prática pode ser expresso em termos de variáveis específicas, a otimização pode ser definida como o processo de encontrar as condições que resultam no valor máximo ou mínimo de uma função.

Para Lopez e Miguel (2013), a otimização estrutural é um processo numérico/matemático/experimental, que visa satisfazer restrições sobre as variáveis de projeto e o comportamento da estrutura, buscando obter uma performance ótima se baseando em medidas como a massa mínima, máxima rigidez, máxima carga de flambagem etc.

Segundo Martha (2022), desde a década de 1960, em institutos de pesquisas e universidades, iniciou-se a análise estrutural feita com o auxílio de computadores, nos anos 70 (setenta) a utilização passou a ser comum e nos anos 80 (oitenta) e 90 (noventa), praticamente todos os escritórios de cálculos estruturais já utilizavam softwares.

Segundo Bandeira (2008), não é possível afirmar que o aço é "melhor" ou "pior" em relação a outros materiais, uma vez que essa avaliação depende das particularidades de cada caso específico. Mesmo quando consideramos apenas os aspectos econômicos, não podemos afirmar que o aço seja mais vantajoso em todas as situações, uma vez que cada material possui suas próprias características, vantagens e desvantagens distintas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Para o dimensionamento de uma estrutura, ainda é muito comum a utilização do método de tentativa e erro, pois, é necessário conhecer as propriedades intrínsecas de cada elemento, tornando o processo oneroso e ineficiente. O desenvolvimento de métodos de otimização estrutural busca agilizar esse processo e minimizar a quantidade de materiais utilizados nas estruturas.

Portanto, estudos que visam dimensionar estruturas de maneira mais eficiente são de extrema importância. Esses estudos têm como objetivo reduzir os custos associados aos materiais, mão de obra e equipamentos utilizados na construção das estruturas. Ao otimizar o dimensionamento, é possível encontrar soluções que atendam aos requisitos de segurança e desempenho, utilizando uma quantidade mínima de recursos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Gerais

Esse trabalho tem como objetivo geral, desenvolver uma rotina computacional para dimensionamento pórticos planos metálicos, utilizando o método de Algoritmo Genético, introduzir esses resultados no SAP200 para obter uma estrutura mais eficiente

1.2.2 Específicos

- ✓ Desenvolver um código computacional para análise estrutural de pórticos planos, obtendo seus esforços, com base no método dos deslocamentos;
- ✓ Desenvolver um código para dimensionamento de estruturas metálicas, com base em perfis W comerciais.
- ✓ Desenvolver uma rotina computacional para otimização estrutural com base nos Algoritmos Genéticos, utilizando Python.
- ✓ Utilizar os resultados obtidos para dimensionar uma estrutura no SAP2000

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

Segundo Miguel e Lopez (2013), a otimização estrutural é um processo numérico/matemático/experimental que busca encontrar uma configuração ótima da estrutura, levando em consideração medidas de desempenho pré-definidas, restrições de projeto e comportamento da estrutura. Seus principais objetivos são minimizar custos e eliminar a dependência da experiência do projetista. A otimização estrutural pode ser dividida em três tipos: dimensional, de forma e de topologia. A otimização dimensional visa encontrar as dimensões que minimizam o custo ou peso da estrutura. A otimização de forma busca otimizar a geometria da estrutura, enquanto a otimização de topologia modifica a conectividade ou disposição dos elementos para obter uma performance ideal.

À medida que buscamos uma representação mais precisa da realidade, o problema de otimização estrutural se torna cada vez mais complexo, como destacado por Maia (2009). A otimização matemática desempenha um papel fundamental em projetos estruturais, pois o comportamento físico de uma estrutura pode ser descrito por meio de funções matemáticas.

Ainda segundo Maia (2009), o projeto estrutural, por sua vez, é uma atividade complexa que envolve a arquitetura, a concepção da estrutura, seu arranjo e dimensionamento dos elementos.

Segundo Pinheiro et. al. (2010), a concepção estrutural desempenha um papel fundamental no projeto estrutural, pois envolve a seleção de um sistema estrutural que seja capaz de resistir aos esforços impostos ao edifício. Nessa etapa, é necessário escolher os elementos adequados e definir suas posições de forma a criar um sistema estrutural eficiente, capaz de absorver e transmitir os esforços para a fundação.

Segundo a NBR 6118:2004, a solução estrutural adotada no projeto deve estar em conformidade com os requisitos de qualidade estabelecidos pelas normas técnicas. Isso inclui considerações relacionadas à capacidade resistente da estrutura, seu desempenho em serviço e sua durabilidade ao longo do tempo. Portanto, é fundamental garantir que a solução estrutural atenda a esses critérios estabelecidos para assegurar a qualidade e a robustez da construção.

Ainda segundo Pinheiro et. al. (2010), a escolha do sistema estrutural é influenciada por uma combinação de fatores técnicos e econômicos. Entre eles, é necessário considerar a capacidade do meio técnico para desenvolver o projeto e executar a obra, assim como a disponibilidade de materiais, mão-de-obra e equipamentos necessários para a execução. Esses aspectos desempenham um papel fundamental na viabilidade e no sucesso do projeto

estrutural. É essencial assegurar que todos os recursos necessários estejam disponíveis e sejam adequados para garantir a qualidade e a eficiência da construção.

Existem diversos métodos de otimização estrutural, como demonstrado por Coutinho (2006), que a partir dos anos 50 (cinquenta), com o surgimento dos computadores mais rápidos, houve um desenvolvimento de métodos como: Métodos como o Método dos Elementos Finitos (MEF), o Método das Diferenças Finitas, o Método dos Elementos de Contorno, o Método dos Volumes Finitos, e o Método dos Mínimos Quadrados. Dentre esses métodos, destaca-se os Algoritmos Evolucionários (AE), que, segundo Linden (2005) são modelos computacionais que utilizam processos naturais de evolução como ferramenta para solucionar problemas. No AE, uma população de indivíduos evolui aplicando operadores genéticos, como recombinação e mutação, de forma semelhante à evolução das espécies. Existe uma grande variedade de modelos computacionais, entre eles os Algoritmos Genéticos.

2.1.1 Algoritmos Genéticos

Segundo Linden (2005), os algoritmos evolucionários usam modelos computacionais baseado em processos naturais de evolução para resolver problemas. Existem vários modelos, que possui em comum o conceito de simulação da evolução das espécies através de seleção, mutação e reprodução. Os estudos com Algoritmos Genéticos (AG) foram iniciados em 1960 por John Holland em 1975, com o objetivo de estudar a seleção natural das espécies, e suas adaptações incorporando na computação.

O Algoritmo Genético (AG) é uma parte dos algoritmos evolucionários, que são algoritmos heurísticos, baseado na evolução natural, que por ser um método probabilístico, onde os indivíduos adaptados ao meio, tem uma probabilidade maior para transmitir seus genes e criar indivíduos ainda mais adaptados, nem sempre o AG encontrará a melhor solução possível, por isso, sempre será recomendado usar Algoritmos Genéticos em problemas que não existem soluções ou com soluções que necessitam de alta capacidade de processamento. (LINDEN, 2005).

Segundo Coley (1999), um AG típico possui as características de ter uma população inicial para a solução do problema, um método de calcular o quão bom é de cada elemento, um método para unir fragmentos das soluções para criar soluções, em média, melhores e por fim, mecanismo de modificar características dos indivíduos para não perder a diversidade.

Segundo Ribeiro (2008), os AG utilizam uma forma de representação codificada para identificar as variáveis e seus limites em um projeto, com o objetivo de resolver um

problema. Essa representação deve ser simples, mantendo as características do problema e impactando positivamente no desempenho da busca.

Segundo Bernadinho (2008), existem várias formas de representação das variáveis, como binária, real, permutação de símbolos e árvore, cada uma adequada para diferentes tipos de problemas. A representação binária é especialmente utilizada para codificar soluções de números inteiros e contínuos, essa abordagem permite a simplificação da representação do problema sem comprometer sua essência, além de ter um impacto significativo no desempenho da busca.

Terminologia dos Algoritmos Genéticos

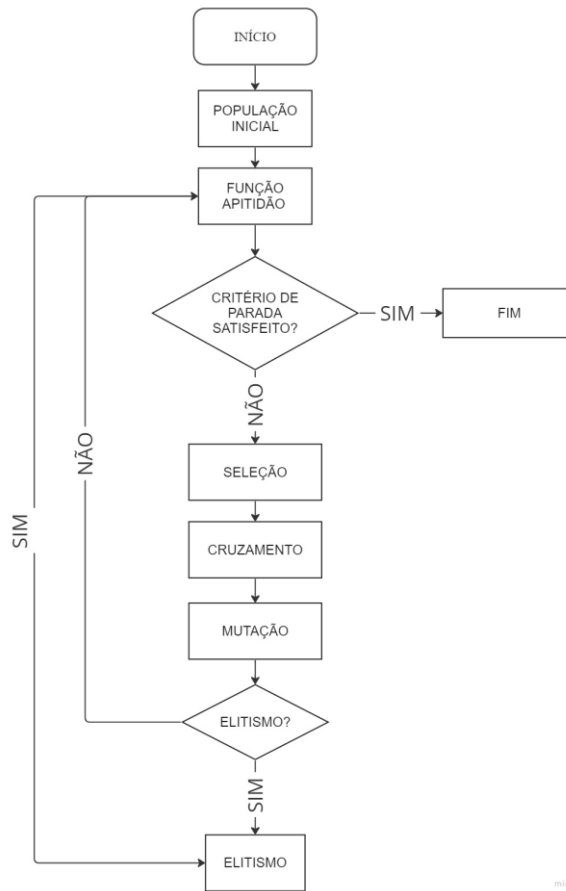
Como é um método baseado na seleção natural, os termos usados se assemelham bastante aos usados pela biologia, sendo os principais apresentados a seguir:

- ✓ Cromossomo: Cadeia de bits, que apresenta as características genéticas de cada indivíduo.
- ✓ Indivíduo: Uma possível solução do problema, contendo o cromossomo e as variáveis do problema.
- ✓ Genoma: Conjunto de variáveis que descreve cada indivíduo.
- ✓ População: Conjunto de vários indivíduos.
- ✓ Alelo: Valor que cada cromossomo assume.
- ✓ Função Aptidão: Função que mede a qualidade de cada cromossomo em solucionar o problema.
- ✓ Geração: Quantidade de iteração do código, cada iteração é uma nova geração.

2.1.2 Esquema de um AG

De maneira geral, a dinâmica do algoritmo genético é demonstrada no fluxograma demonstrado na Figura 1, que consiste em criar uma população inicial de forma aleatória, em seguida aplica a avaliação com a função aptidão em cada cromossomo, verificando o critério de parada, não satisfazendo o critério, selecionam os pais, em geral, mais aptos, aplica o cruzamento, a mutação e o elitismo, se for o caso, evitando perda de informação genética e diversidade, descarte os velhos membros da população, com os pais selecionados, gere uma nova população e refazendo todo o processo até atingir o critério de parada ou satisfazer os requisitos de performance. (LINDEN, 2005).

Figura 1: Fluxograma de um AG genérico



Fonte: Autor

Para os algoritmos genéticos, a população inicial, normalmente, é gerada de forma aleatória, mas segundo Coley (1999), existe métodos que visam chegar na solução satisfatória mais rapidamente, como por exemplo, aplicar uma série de inicializações para cada indivíduo e então escolher os valores de maior desempenho.

Para uma boa população inicial deve garantir uma maior variedade de indivíduos, para garantir uma possibilidade maior de obter uma solução satisfatória.

Segundo Fonseca (2007), a função aptidão recebe, como entrada as características do indivíduo e fornece, sua aptidão como resultado, que representa a adaptabilidade do indivíduo ao meio, indicando a qualidade deles.

A função aptidão é representada pela Equação (1).

$$F(\text{aptidão}) = F(\text{objetivo}) + F(\text{penalidade}) \quad (1)$$

Sendo:

$F(\text{aptidão})$ – Função aptidão

$F(\text{objetivo})$ – Função objetivo

$F(\text{penalidade})$ – Função penalidade

Normalmente a função objetivo está relacionada com a economia e a função penalidade está ligada com os critérios restritivos dos problemas, pois, segundo Fonseca (2007), os algoritmos genéticos não possuem a habilidade de solucionar problemas envolvendo restrições, portanto, uma alternativa é transformá-lo em um problema não restritivo e aplicando a função penalidade como as restrições do problema, penalizando o indivíduo quando a restrição for violada, sendo a função penalidade a maior dificuldade para se determinar, e não penalizar indivíduos promissores e beneficiar soluções decadentes.

Lemonge (2010), apresenta como função objetivo, a Equação (2), para encontrar o conjunto de área que minimize o volume da estrutura:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{Ne} A_i L_i \quad (2)$$

Onde:

Ne = Número de barras

A_i = Área da seção transversal do i -ésimo elemento;

L_i = Comprimento do i -ésimo elemento;

Segundo Adeli e Sarma (2006), a função quadrática pode ser utilizada como função penalidade para restringir problemas de otimização estrutural, utilizando os deslocamentos máximos dos nós e tensões máximas admissíveis, de acordo com a Equação (3):

$$pen(x) = \phi \left[\sum_{i=1}^{Ne} \left(\frac{|\sigma_i|}{|\sigma_i^a|} - 1 \right)^2 + \sum_{i=1}^{Ne} \left(\frac{|\delta_i|}{|\delta_i^a|} - 1 \right)^2 \right] \quad (3)$$

Nos dois principais termos da equação, quanto mais as frações $\frac{|\sigma_i|}{|\sigma_i^a|}$ e $\frac{|\delta_i|}{|\delta_i^a|}$ se aproximam do valor 1, menor será a penalidade e conseqüentemente, melhor será o aproveitamento do perfil.

Adeli e Sarma (2006) propuseram adicionar à função objetivo a massa específica do membro, em vez do volume, com o objetivo de minimizar a massa. Além disso, introduziram um fator de normalização L_f para garantir que a função objetivo e a função geral tenham uma escala numérica similar, evitando que uma equação domine a outra. Dessa forma, busca-se um equilíbrio adequado entre os critérios de otimização considerados, com essas considerações, a Equação (2), se transforma na Equação (4):

$$f(x) = \frac{1}{L_f} \cdot \sum_{i=1}^{Ne} \rho_i \cdot A_i \cdot L_i + \phi \left[\sum_{i=1}^{Ne} \left(\frac{|\sigma_i|}{|\sigma_i^a|} - 1 \right)^2 + \sum_{i=1}^{Ne} \left(\frac{|\delta_i|}{|\delta_i^a|} - 1 \right)^2 \right] \quad (4)$$

Após receber o seu valor da aptidão, os indivíduos passam por um processo para serem selecionados a possíveis genitores, cromossomos com grande aptidão recebem a maior probabilidade de serem selecionados. Segundo Coley (1999), o método mais comum é o da roleta, onde, a população formaria uma roleta, em que cada indivíduo tem suas chances proporcional a sua aptidão, assim, indivíduos mais aptos tem maiores probabilidades de serem escolhidos. O grande problema desse método é a possibilidade de indivíduos com alta aptidão ser escolhido várias vezes, diminuindo a diversidade da população posterior.

A probabilidade da seleção de um indivíduo é expressa pela Equação (5):

$$p_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^{np} F_j} \quad (5)$$

Sendo:

p_i – Probabilidade de seleção de um indivíduo;

F_i – Aptidão do indivíduo;

np – Tamanho da população.

Assim, calculamos a probabilidade acumulativa na Equação (6).

$$q_i = \sum_{p^i}^i p_i \quad (6)$$

Sendo:

p_i – Probabilidade de seleção de um indivíduo;

q_i – Probabilidade acumulada;

Após a definição da probabilidade é gerado um valor r entre 0 e 1 para definir qual o indivíduo será selecionado.

2.1.3 Operadores Genéticos

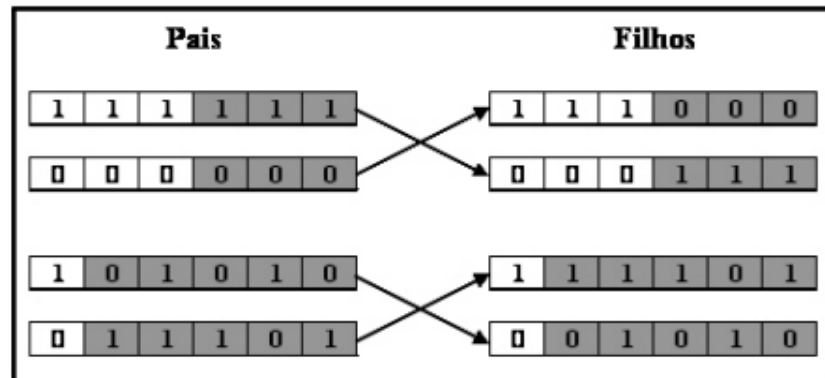
Segundo Linden (2005), os operadores genéticos consistem em aproximações computacionais de fenômenos vistos na natureza, para o AG, os operadores utilizados são: cruzamento, mutação, escalonamento e elitismo.

O cruzamento é o método utilizado para a geração de novos indivíduos, gerados a partir de combinações dos genitores, existem vários tipos de cruzamento, entre os mais utilizados estão: cruzamento com um ponto de corte, cruzamento com dois pontos de corte, cruzamento com n pontos de corte, cruzamento uniforme, cruzamento por variável, cruzamento entre vários indivíduos, entre outros.

Segundo Fonseca (2007), o cruzamento com um ponto de corte, consiste em selecionar um ponto da sequência dos cromossomos aleatoriamente trocando os materiais

genéticos entre os pais a partir desse ponto, gerando novos indivíduos, como esquematizado na Figura 1.

Figura 2: Cruzamento de ponto único



Fonte: Fonseca (2007)

Segundo Coley (1999), no mundo natural, a mutação pode ocorrer em vários processos, porém, o mais comum é o erro durante a replicação. Como os algoritmos genéticos possui uma abordagem binária, esse é um operador genético de fácil implementação, apenas selecionando um cromossomo aleatório e mudando seu valor de 0 para 1 ou vice-versa.

A probabilidade de mutação gira em torno de 0,001, ou 1 a cada mil, esse é um valor de referência, o ideal é cada problema buscar o seu próprio valor ideal (COLEY, 1999).

Segundo Tanomaru (1995), durante as primeiras gerações da execução de um Algoritmo Genético (AG), é recomendado que o processo de seleção não seja excessivamente rigoroso, permitindo que mesmo indivíduos de baixa qualidade tenham chances de evoluir. No entanto, nas últimas gerações, é benéfico aumentar a pressão seletiva, uma vez que os indivíduos tendem a ter valores de adequação muito próximos, dificultando a destacada dos melhores indivíduos na população.

Para abordar esse problema de pressão seletiva, surgiram variações do AG que utilizam métodos de escalonamento, como o escalonamento linear, graduação, corte pelo desvio padrão e o método "nicho" e compartilhamento (TANOMARU, 1995). Neste trabalho em particular, foi adotado o método de escalonamento linear, cuja fórmula é apresentada na Equação (7), conforme descrito por Goldberg (1989).

$$s(x) = \alpha \cdot f(x) + \beta \tag{7}$$

Os coeficientes α e β são determinados para cada geração específica, dependendo do resultado da desigualdade da Equação (8). Se a desigualdade for falsa, os coeficientes assumem os resultados da Equação (9). Por outro lado, se a desigualdade for verdadeira, eles

assumem os valores da Equação (10). É importante destacar que $s(x)$ e $f(x)$ representam as funções de adequação e objetivo, respectivamente.

$$f_{\min} \geq \frac{c \cdot f_{\text{med}} - f_{\text{máx}}}{c - 1} \quad (8)$$

Se a desigualdade da Equação (8) falsa:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{f_{\text{med}} \cdot (c - 1)}{f_{\text{máx}} - f_{\text{mín}}} \\ \beta = (1 - \alpha) \cdot f_{\text{med}} \end{cases} \quad (9)$$

Se a desigualdade da Equação (8), verdadeira:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{f_{\text{med}}}{f_{\text{máx}} - f_{\text{mín}}} \\ \beta = \frac{f_{\text{med}} \cdot f_{\text{mín}}}{f_{\text{med}} - f_{\text{mín}}} \end{cases} \quad (10)$$

Segundo Tonomaru (1995), uma alta pressão seletiva tem a tendência de reduzir rapidamente a diversidade, levando o problema a convergir em poucas gerações, mas correndo o risco de convergir para uma solução local. Por outro lado, uma baixa pressão seletiva pode tornar o processo de busca mais demorado e exigir maior capacidade de processamento. Portanto, a escolha adequada do fator de escala (c) é fundamental para equilibrar efetivamente a pressão seletiva durante a execução do algoritmo.

O método de seleção não garante a escolha do melhor indivíduo, ao menos que o mais apto seja muito superior aos demais, portanto, em alguns casos, é necessário selecionar o indivíduo mais bem avaliado e mandar para a próxima geração, impedindo a perda de informações importantes, principalmente em casos em que a convergência é demorada, porém, deve ser cauteloso com esse método, pois, o seu uso exagerado pode causar perda na diversidade e dificultar o encontro da solução global (Coley, 1999).

2.2 ANÁLISE ESTRUTURAL

Segundo Martha (2022), a análise estrutural é a etapa do projeto estrutural em que é feito o planejamento do comportamento da estrutura. Esse comportamento pode ser expresso por diversos parâmetros, tais como pelos campos de tensões, deformações e deslocamentos na estrutura, tendo como objetivo, a determinação dos esforços internos e externos, tensões, deslocamentos e deformações.

Segundo Edmundo et al. (2018), as estruturas mais comuns são vigas, colunas, treliças, pórticos, tirantes, placas, cascas e arcos. Pórticos são elementos rígidos, onde o ângulo formado pelas barras, vigas e pilares não mudam, para isso, as ligações entre barras devem ser rígidas o suficiente para impedir deformações nessas ligações. Em estruturas

metálicas, as ligações devem ser projetadas com o uso de soldas e parafusos que possam atender às condições de rigidez das ligações.

Segundo Martha (2022), para a solução de uma estrutura hiperestática, é necessário considerar três grupos de condições básicas da análise estrutural: condições de equilíbrio, condições de compatibilidade e condições impostas pelas leis constitutivas dos materiais da estrutura.

Existem dois principais métodos para a análise estrutural, o Método das Forças e o Método dos Deslocamentos, também conhecido como Método da Rigidez Direta (MRD). Ainda segundo Martha (2022), a solução pelo Método das Forças é feita pela superposição de soluções básicas isostáticas, para isso, cria-se uma estrutura isostática auxiliar, chamada de sistema principal (SP), que é obtida pela eliminação de nós externos da estrutura hiperestática original. Na prática, o método consiste em somar uma série de soluções básicas (isostáticas) que satisfazem as condições de equilíbrio, mas não satisfazem as condições de compatibilidade da estrutura original, para, na superposição, restabelecer as condições de compatibilidade. Para definir essas estruturas isostáticas existem vários caminhos, portanto, esse método se torna de difícil aplicação em métodos computacionais.

Por outro lado, para o Método dos Deslocamentos, segundo Süsserkind (1987) as incógnitas desse método serão os ângulos de rotação e os deslocamentos lineares sofridos pelos nós das barras do sistema, e serão desprezadas as deformações das barras devidas aos esforços normais e cortantes. Para Martha (2022) cada caso básico satisfaz isoladamente as condições de compatibilidade, porém, os casos básicos alteram os esforços internos modificando as condições de equilíbrio, portanto, são necessárias forças e momentos adicionais para manter o equilíbrio. As condições de equilíbrio da estrutura ficam restabelecidas quando se superpõem todas as soluções básicas. Como existe apenas um caminho possível para a solução, esse é um método ideal para análises computacionais, pois, não existe a necessidade da análise inicial para buscar a melhor forma de resolução.

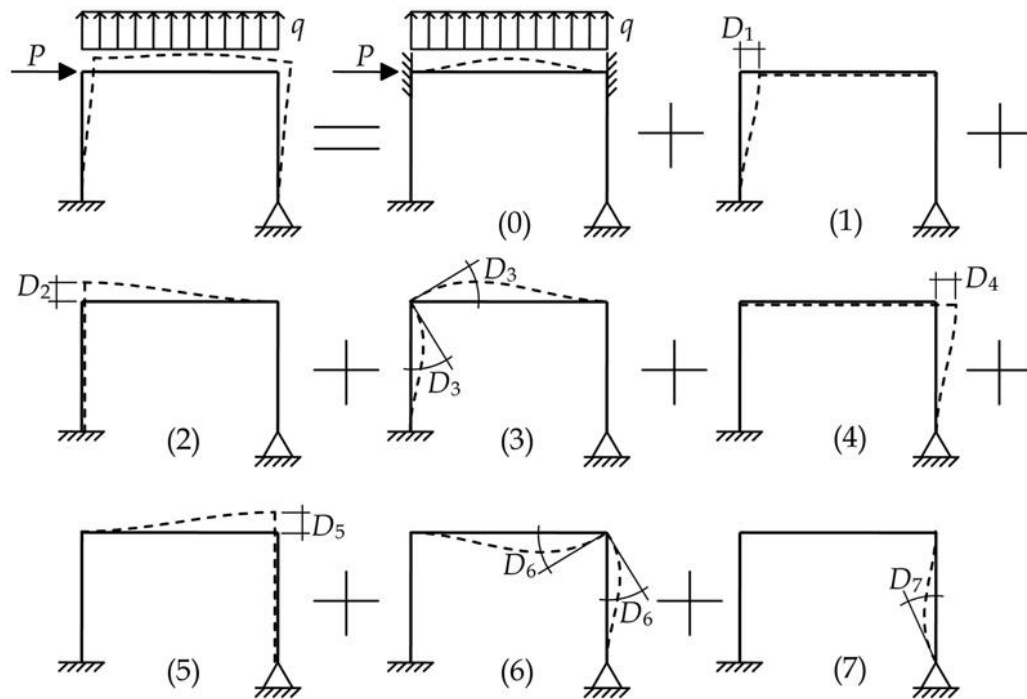
2.2.1 Deslocabilidades do Sistema

Para definir as deslocabilidades do sistema, precisamos considerar os nós da estrutura como sendo rígidos, ou seja, mesmo aplicando esforços externos e a estrutura deformando, o ângulo das extremidades das barras conectadas a um nó se mantém o mesmo. Martha (2022), define deslocabilidades como sendo as componentes de deslocamentos e rotações nodais que estão livres, isto é, que devem ser conhecidas para determinar a configuração

deformada de uma estrutura, as deslocabilidades são incógnitas do método dos deslocamentos.

A ilustração da Figura 3, mostra a configuração da deformada de um pórtico plano, formada pela superposição de deformações elementares, cada uma configuração associada a um efeito isolado.

Figura 3: Configuração deformada de um pórtico plano formada pela superposição de configurações deformadas elementares.



Fonte: Martha (2022)

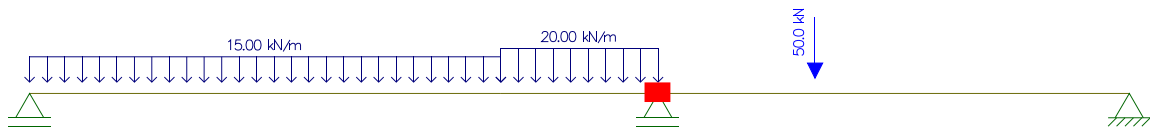
2.2.2 Rigidez Direta

O método dos deslocamentos, o método simplificado onde precisamos analisar cada barra do sistema, e definir qual o tipo de carregamento e qual o tipo de reação que essa barra está sujeita e utilizando uma tabela fornecida por Martha (2022) podemos resolver o problema, portanto, apesar de ser uma forma ideal para resolução de estruturas manualmente, essa é uma abordagem de difícil aplicação para métodos computacionais, para aplicar de forma correta é preciso considerar como nó apenas os pontos de apoio internos, variações da seção transversal, e mudança de direção. Porém, temos outra abordagem que é ideal para métodos computacionais, onde, além dos nós utilizados no método simplificado, devemos considerar como nó as extremidades, pontos de força concentrada, momento concentrado, e mudança no carregamento, para considerar todas as barras como sendo bi engastada e de carregamento e seção constante.

Para as duas abordagens, cada restrição aplicada adiciona uma linha e uma coluna na matriz rigidez local, portanto, o método simplificado vai produzir matrizes com dimensões menores se comparada com o método computacional, facilitando o cálculo manual (MARTHA, 2022).

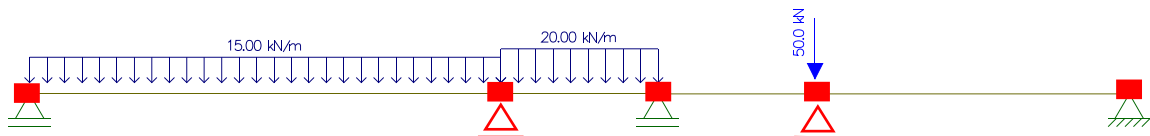
Podemos comparar as diferenças das abordagens com a Figura 3, onde, foi necessário apenas considerar uma chapa para limitar a rotação no nó interno. Já a Figura 4, onde, com a mesma barra, foi necessário inserir chapas e apoios em cinco nós para considerar a barra bi engastada e de seção e carregamento constante, resultando uma matriz 1x1 no primeiro método e uma matriz 7x7 para o segundo.

Figura 4: Consideração das restrições para o método simplificado



Fonte: Autor.

Figura 5: Consideração das restrições para o método computacional



Fonte: Autor.

Oliveira (2018), diz que o método dos deslocamentos funciona baseado na Lei de Hooke, definido pela Equação (11) que relaciona força, deslocamento, e rigidez de um corpo deformável submetido a uma ação.

$$F = k \cdot x \quad (11)$$

Onde:

F – Força aplicada;

k – Coeficiente elástica;

x – Deslocamento sofrido do corpo elástico;

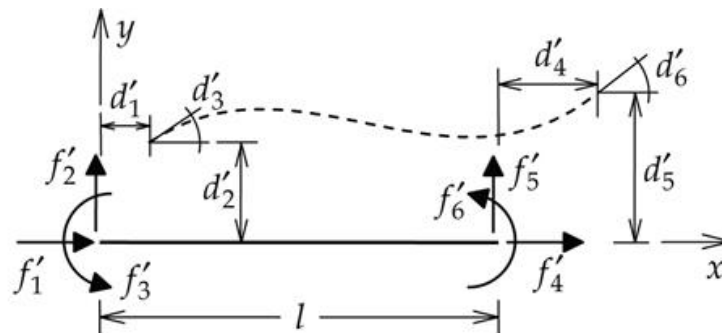
Sussekind (1987) define rigidez de uma barra em um nó, como sendo, o valor do momento que aplicado nesse nó provoca uma rotação unitária dele.

Segundo Martha (2022), para o processo de discretização do método dos deslocamentos, as configurações deformadas elementares de barras isoladas são as soluções fundamentais. Para essas, existem duas considerações, o coeficiente de rigidez local, que são

as forças e momentos que devem atuar nas extremidades de uma barra para equilibrá-la quando são impostos deslocamentos ou rotações unitárias nas extremidades. E por último, temos as reações de engastamento perfeito, que são reações de apoio para uma barra com as extremidades engastadas resultantes da aplicação de uma solicitação externa.

Para uma barra isolada de um pórtico plano, considerando uma força aplicada nas extremidades e nos eixos locais x e y e um momento no eixo local z , temos as os deslocamentos e as rotações, representados na Figura 5.

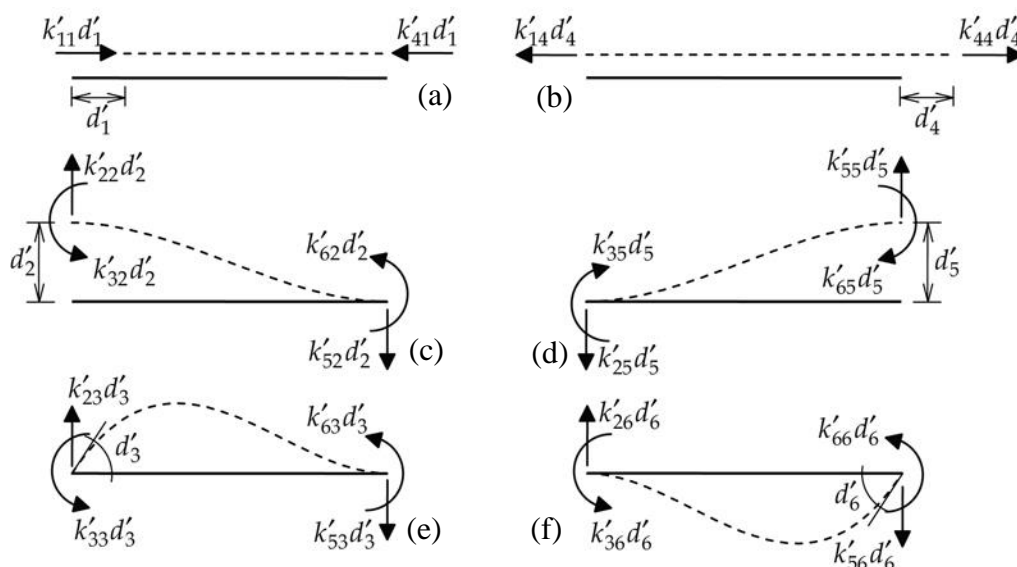
Figura 6: Configuração da deformada de uma barra isolada no eixo local.



Fonte: Martha (2022)

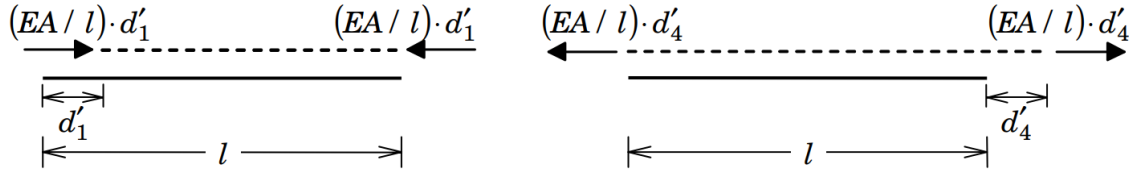
Utilizando o princípio da superposição, podemos considerar isoladamente cada carregamento para cada extremidade, assim, obtemos os deslocamentos e rotações de acordo com a Figura 6.

Figura 7: Deslocamentos de uma barra de pórtico plano em um eixo local isolando cada carregamento



Fonte: Martha (2022)

Figura 8: Coeficiente de rigidez de barras submetidas à esforços axiais de barras sem articulação.



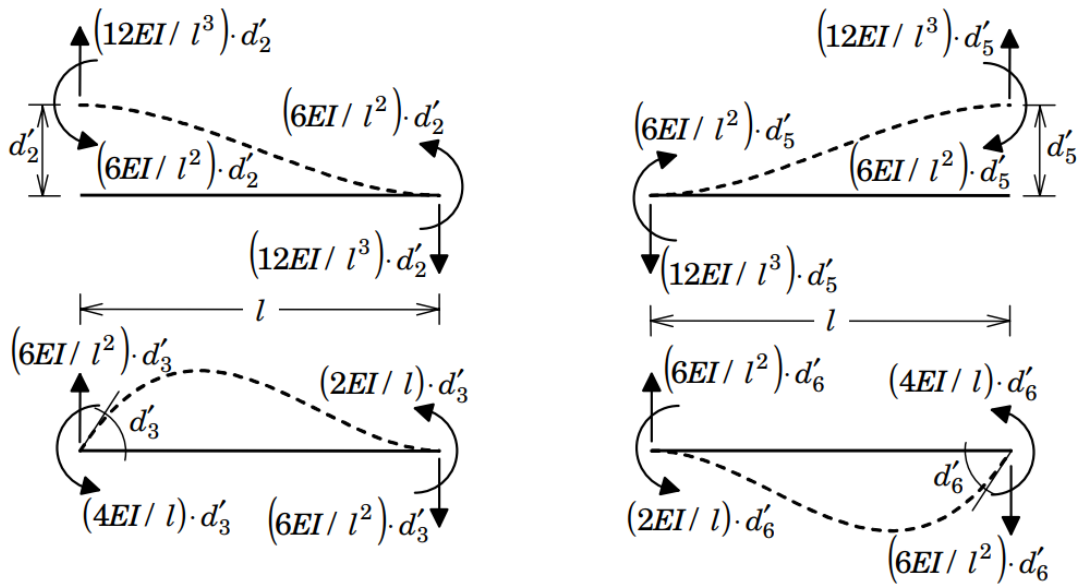
Fonte: Martha (2022)

Para o carregamento axial, utilizando o método matricial para relacionar força, rigidez e deslocamento de acordo com a Equação (11) e Figura 5 e 6 e utilizando os valores dos coeficientes de rigidez da Figura 7, temos a Equação (12).

$$\begin{Bmatrix} f'_1 \\ f'_4 \end{Bmatrix} = \frac{EA}{l} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d'_1 \\ d'_4 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

De forma análoga, para o carregamento à flexão, a Figura 8 relaciona os coeficientes de rigidez com a barra isolada.

Figura 9: Coeficiente de rigidez de carregamentos à flexão de barra isolada sem flexão



Fonte: Martha (2022)

Utilizando a Equação (11) com as configurações das superposições de cada coeficiente de rigidez de carregamentos à flexão da Figura 8, e utilizando a relação da Figura 6, temos a equação (13).

$$\begin{Bmatrix} f'_2 \\ f'_3 \\ f'_5 \\ f'_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 12EI/l^3 & 6EI/l^2 & -12EI/l^3 & 6EI/l^2 \\ 6EI/l^2 & 4EI/l^2 & -6EI/l^2 & 2EI/l \\ -12EI/l^3 & -6EI/l^2 & 12EI/l^3 & -6EI/l^2 \\ 6EI/l^2 & 2EI/l & -6EI/l^2 & 4EI/l^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d'_2 \\ d'_3 \\ d'_5 \\ d'_6 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

Combinando a Equação (12) com a Equação (13) para obter a matriz rigidez local para os todos os tipos de carregamento, ou seja, tanto axial quanto à flexão, obtemos a Equação (14).

$$\begin{Bmatrix} f'_1 \\ f'_2 \\ f'_3 \\ f'_4 \\ f'_5 \\ f'_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} EA/l & 0 & 0 & -EA/l & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/l^3 & 6EI/l^2 & 0 & -12EI/l^3 & 6EI/l^2 \\ 0 & 6EI/l^2 & 4EI/l^2 & 0 & -6EI/l^2 & 2EI/l \\ -EA/l & 0 & 0 & EA/l & 0 & 0 \\ 0 & -12EI/l^3 & -6EI/l^2 & 0 & 12EI/l^3 & -6EI/l^2 \\ 0 & 6EI/l^2 & 2EI/l & 0 & -6EI/l^2 & 4EI/l^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d'_1 \\ d'_2 \\ d'_3 \\ d'_4 \\ d'_5 \\ d'_6 \end{Bmatrix} \quad (14)$$

A Equação (15) é uma versão reduzida da Equação (14).

$$\{f'\} = [k'] \cdot \{d'\} \quad (15)$$

Sendo:

$\{f'\}$ – Vetor das forças generalizadas de uma barra no sistema local

$[k']$ – Matriz rigidez de uma barra no sistema local

$\{d'\}$ – Vetor de deslocamento de uma barra no sistema local

Segundo Weaver e Gere (1990), para os pórticos planos, onde, os apoios não permitem deslocamentos de translação, a matriz rigidez é reduzida na matriz da equação (16).

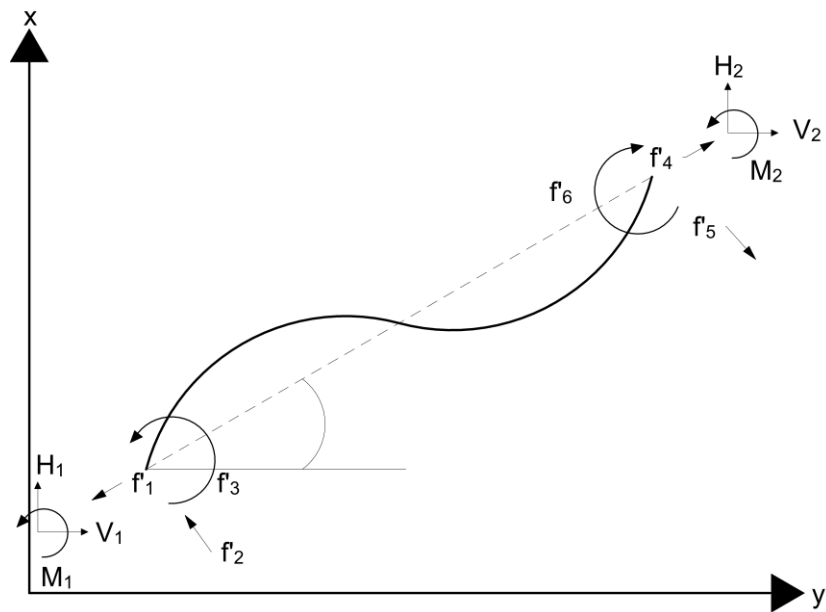
$$\{k'\} = \begin{bmatrix} EA/l & 0 & 0 \\ 0 & 4EI/l & 2EI/l \\ 0 & 2EI/l & 4EI/l \end{bmatrix} \quad (16)$$

Considerando $d'_1 = d'_4 = d'$, os apoios sem translação apresentados na Equação (16), a Equação (14) é apresentada na Equação (17).

$$\begin{Bmatrix} f'_1 \\ f'_3 \\ f'_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} EA/l & 0 & 0 \\ 0 & 4EI/l & 2EI/l \\ 0 & 2EI/l & 4EI/l \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d' \\ d'_3 \\ d'_6 \end{Bmatrix} \quad (17)$$

Segundo Martha (2022), considerando uma barra inclinada com um ângulo β em relação ao sistema global, é possível relacionar os deslocamentos e as forças locais de uma barra no sistema local, com as forças e deslocamentos do sistema global, como demonstra a Figura 9.

Figura 10: Representação dos deslocamentos do sistema global no sistema local.



Fonte: Autor

Com base na

Figura 10, no eixo local temos os esforços axiais, ou seja, ao longo da barra, portanto, $f_1 = f_4 = f'$, e temos os esforços de rotação, que resulta em um esforço de rotação no nó inicial (f_3) e final (f_6).

Sendo:

$H_{1,2}$ – Resultante horizontal global;

$V_{1,2}$ – Resultante vertical global;

$M_{1,2}$ – Resultante de momento global;

$f_{1,4}$ – Esforço axial local;

$f_{3,6}$ – Esforço de momento local;

$f_{2,5}$ – Resultante do momento binário;

Aplicando as equações de equilíbrio no nó 1, temos:

$$\sum F_x = H_1 + f'_{2x} - f'_x = 0 \Rightarrow H_1 = f'_x - f'_{2x} \quad (18)$$

$$\sum F_y = V_1 + f'_{2y} - f'_y = 0 \Rightarrow V_1 = f'_y - f'_{2y} \quad (19)$$

$$\sum M_1 = -M_1 + f'_3 = 0 \Rightarrow M_1 = f'_3 \quad (20)$$

Como, $f'_{1,2}$ faz parte de um binário, então temos a Equação (21):

$$f'_2 = f'_5 = \frac{f'_3 + f'_6}{1} \quad (21)$$

Substituindo a Equação (21) nas Equações (18) e (19), temos:

$$H_1 = f' \cdot \cos \beta - \left(\frac{f'_3 + f'_6}{l} \right) \cdot \sin \beta \quad (22)$$

$$V_1 = f' \cdot \sin \beta - \left(\frac{f'_3 + f'_6}{l} \right) \cdot \cos \beta \quad (23)$$

De forma análoga, para o nó 2, temos:

$$H_2 = -f' \cdot \cos \beta - \left(\frac{f'_3 + f'_6}{l} \right) \cdot \sin \beta \quad (24)$$

$$V_2 = -f' \cdot \sin \beta - \left(\frac{f'_3 + f'_6}{l} \right) \cdot \cos \beta \quad (25)$$

$$M_2 = f'_6 \quad (26)$$

Transformando para forma matricial, temos:

$$\begin{Bmatrix} H_1 \\ V_1 \\ M_1 \\ H_2 \\ V_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta / l & -\sin \beta / l \\ \sin \beta & \cos \beta / l & \cos \beta / l \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos \beta & \sin \beta / l & \sin \beta / l \\ -\sin \beta & -\cos \beta / l & -\cos \beta / l \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} f' \\ f'_3 \\ f'_6 \end{Bmatrix} \quad (27)$$

Resultando na Equação reduzida (28).

$$\{F\} = [L] \cdot \{f'\} \quad (28)$$

Sendo:

$\{F\}$ é o vetor das forças globais;

$[L]$ é a matriz de rotação;

$\{f'\}$ é o vetor de esforços locais;

Substituindo a Equação (17) na Equação (27), temos a equação:

$$\begin{Bmatrix} H_1 \\ V_1 \\ M_1 \\ H_2 \\ V_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta / l & -\sin \beta / l \\ \sin \beta & \cos \beta / l & \cos \beta / l \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos \beta & \sin \beta / l & \sin \beta / l \\ -\sin \beta & -\cos \beta / l & -\cos \beta / l \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} EA/l & 0 & 0 \\ 0 & 4EI/l & 2EI/l \\ 0 & 2EI/l & 4EI/l \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d'_1 \\ d'_3 \\ d'_6 \end{Bmatrix} \quad (29)$$

A equação (29) reduzida é apresentada como a Equação (30).

$$\{F\} = [L] \cdot [k'] \cdot \{d'\} \quad (30)$$

Para transformar o termo $\{d'\}$ que ainda está no eixo local, para o eixo global, podemos usar a Equação (31) que usa a matriz $[L]^T$ para esse procedimento, resultando na Equação (32).

$$\{d'\} = [L]^T \cdot \{d\} \quad (31)$$

$$\{F\} = [L] \cdot [k'] \cdot [L]^T \cdot \{d\} \quad (32)$$

Considerando a equação (32) como a matriz rigidez global, temos a Equação (33):

$$\{k\} = [L] \cdot [k'] \cdot [L]^T \quad (33)$$

$$\{F\} = [k] \cdot \{d\} \quad (34)$$

Como o método da rigidez direta será utilizada para um modelo computacional, os valores de cosseno e do seno devem estar em função das coordenadas globais, como demonstrado nas Equações (35) e (36).

$$\cos \beta = \frac{X_1 - X_2}{l} \quad (35)$$

Sendo:

β – O ângulo da barra com o eixo x do sistema global;

X_1 – Coordenada X global do nó inicial da barra;

X_2 – Coordenada X global do nó final da barra;

l – O comprimento da barra;

$$\sin \beta = \frac{Y_1 - Y_2}{l} \quad (36)$$

Sendo:

β – O ângulo da barra com o eixo x do sistema global;

Y_1 – Coordenada Y global do nó inicial da barra;

Y_2 – Coordenada Y global do nó final da barra;

l – O comprimento da barra;

2.3 DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS

De acordo com Guanabara (2010), o processo de dimensionamento de perfis metálicos é baseado na premissa de que os esforços resistentes devem ser sempre superiores aos esforços solicitantes, a fim de garantir a estabilidade da estrutura. No dimensionamento, as demandas de carga são conhecidas, enquanto a capacidade de resistência dos perfis metálicos precisa ser determinada, variando de acordo com o tipo de solicitação e seção considerada.

Neste contexto, para o dimensionamento das peças metálicas é realizado para cada tipo de esforço analisado, como tração, compressão, flexão, cortante e flexo-compressão. Os critérios e procedimentos adotados seguem as diretrizes estabelecidas na norma NBR 8800:2008.

Na NBR 8800:2008, dois conceitos fundamentais são considerados: o estado limite último (ELU) e o estado limite de serviço (ELS). O estado limite último refere-se à condição em que a estrutura atinge o limite máximo de resistência, ou seja, é o ponto em que ocorre o colapso ou a falha estrutural. Nesse estágio, as cargas aplicadas na estrutura resultam em esforços e deformações que excedem sua capacidade de resistência. Por outro lado, o estado limite de serviço diz respeito às condições em que a estrutura deve permanecer funcional e atender aos requisitos de desempenho durante sua vida útil. Nesse caso, são considerados fatores como a durabilidade, a rigidez, o conforto e a estabilidade da estrutura sob as cargas de serviço, levando em conta a ocorrência de deformações e deslocamentos dentro de limites aceitáveis. Ambos os estados limites são fundamentais para garantir a segurança e o adequado funcionamento das estruturas ao longo do tempo.

Para o dimensionamento de cada seção de acordo com a NBR 8800:2008, temos a Equação (37):

$$R_d \geq S_d \quad (37)$$

Onde:

R_d – Esforço resistente de projeto;

S_d – Esforço solicitante de projeto;

2.3.1 Propriedades mecânicas

De acordo com Pfeil (2021), as propriedades do aço são influenciadas pela composição da liga metálica utilizada. Por exemplo, aços com alto teor de carbono apresentam maior fragilidade e resistência, enquanto a resistência à tração diminui.

Propriedades geométricas dos perfis metálicos

Com relação às propriedades geométricas, como para os perfis metálicos as dimensões são padronizadas e tem a seção conhecida, determinar os valores as propriedades de cada perfil como o momento de inércia, raio de giração, momento de inércia à torção, se torna um processo bastante simples, tornando mais ágil.

2.3.2 Peças comprimidas

Segundo Pfeil (2021), peças comprimidas são encontradas em diferentes componentes estruturais, como treliças, sistemas de travejamento e pilares de edifícios com ligações rotuladas, onde estão sujeitas a forças de compressão axial.

Para o dimensionamento dessas peças, a NBR 8800:2008 determina que a Equação (38), deve ser satisfeita:

$$N_{c,sd} \leq N_{c,rd} \quad (38)$$

Onde o componente $N_{c,rd}$, pode ser determinado pela Equação (39), onde já considera a possibilidade de escoamento da seção, flambagem local e flambagem global.

$$N_{c,rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (39)$$

Onde o fator χ recebe um dos valores das Equações (40) e (41):

Para: $\lambda_0 \leq 1,5$:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (40)$$

Para: $\lambda_0 > 1,5$:

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (41)$$

Onde:

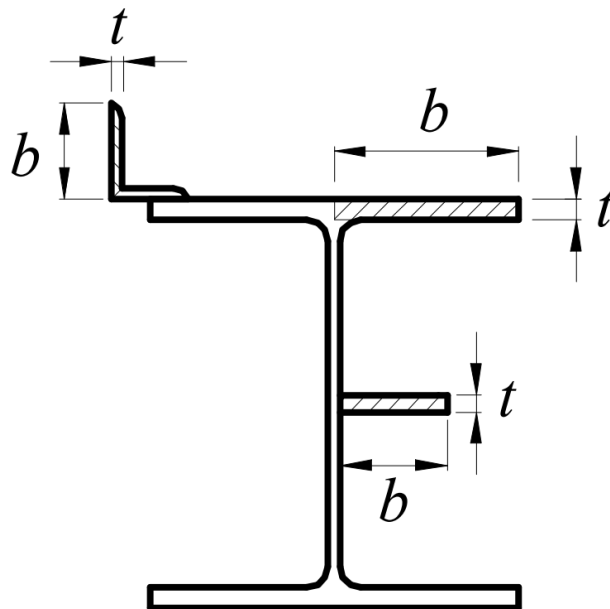
$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} \quad (42)$$

O fator Q é calculado conforme descrito no Anexo F da NBR 8800, que dependerá do valor de b/t , que é apresentado no catálogo do perfil respectivo, onde a contribuição de cada um deles será conforme a Equação (43):

$$Q = Q_a \cdot Q_s \quad (43)$$

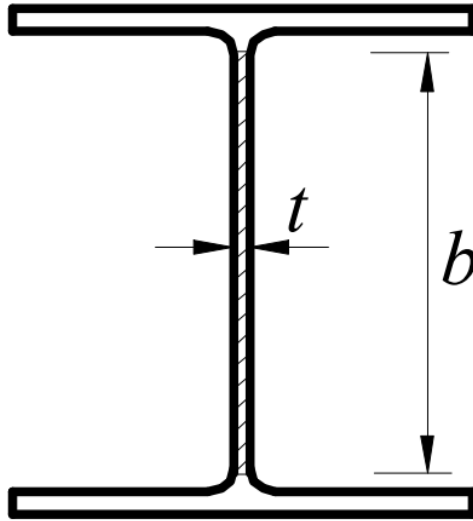
Esses valores variam de acordo com cada tipo de elemento, especificamente para os perfis W, as Figuras 10 e 11 apresentam os parâmetros dos perfis W laminado e as equações apresenta os como calcular os valores para cada tipo de elemento:

Figura 11: Parâmetros AL do perfil W



Fonte: NBR 8800:2008

Figura 12: Parâmetros do perfil W do tipo AA



Fonte: NBR 8800:2008

Para a Figura 10, temos um elemento tipo Apoiado-Livre (AL):

$$(b/t)_{lim} = 0,56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (44)$$

Para a Figura 11, temos um elemento Apoiado-Apoiado (AA):

$$(b/t)_{lim} = 1,49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (45)$$

Ainda de acordo com a NBR 8800:2008, para perfis W laminados, temos que o fator Q_a é calculado conforme as Equações (46) e (47):

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

$$Q_a = 1 \quad (46)$$

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

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} \quad (47)$$

Onde:

A_g = área bruta da seção;

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

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

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

Já para os perfis W, o fator Q_s é calculado a partir das Equações (48) e (49):

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

$$Q_s = 1 \quad (48)$$

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

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (49)$$

A Equação (49) é utilizada quando: $0,56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

$$Q_s = \frac{0,69 \cdot E}{f_y \cdot \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (50)$$

E a Equação (50) é utilizada quando: $\frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Por fim, A força axial de flambagem elástica Ne , em casos de flambagem por flexão em seções com dupla simetria, pode ser calculada utilizando a Equação (51), que envolve o coeficiente de flambagem K . Os valores desse coeficiente podem ser encontrados através da Tabela 1:

$$Ne = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2} \quad (51)$$

Onde:

K = Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados;

L = Comprimento do Elemento;

Tabela 1: Valores de K_x e K_y

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio	Rotação e translação impedidas Rotação livre, translação impedida Rotação impedida, translação livre Rotação e translação livres					

Fonte: NBR 8808:2008

2.3.3 Peças Tractionadas

Segundo Pfeil (2021), as peças tracionadas são peças submetidas à tração axial ou tração simples, empregadas em diversas estruturas, como: tirantes, contraventamentos, barras tracionadas de treliça.

Para seu dimensionamento a NBR 8800:2008, determina que a Equação (52) deve ser atendida:

$$N_{t,sd} \leq N_{t,rd} \quad (52)$$

Onde:

$N_{t,sd}$ – Força axial solicitante de cálculo;

$N_{t,rd}$ – Força axial resistente de cálculo;

A NBR 8800 determina que o valor do $N_{t,rd}$ é o menor dos valores obtidos nas Equações (53) e (54).

Escoamento da seção bruta:

$$N_{t,rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (53)$$

Escoamento da seção líquida:

$$N_{t,rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad (54)$$

Onde:

A_e – Área líquida efetiva: $A_e = c_t \cdot A_n$

A_n – Área líquida da seção;

A_g – Área bruta da seção;

c_t – Coeficiente de redução da área líquida;

γ_{a1} – 1,10 em combinações normais;

γ_{a2} – 1,35 em combinações normais;

Para peças onde as ligações não utilizam parafusos, como as consideradas nesse trabalho, a área líquida é igual a área bruta.

2.3.4 Peças submetidas à flexão simples

Segundo Pfeil (2021), no projeto estrutural das vigas, no estado limite último de flexão simples, realiza-se o cálculo do momento fletor e do esforço cortante resistentes de projeto para as seções críticas, como mostra as Equações (55) e (56). Esses valores são então comparados com os esforços solicitantes de projeto correspondentes. Além disso, é necessário verificar a segurança da estrutura em relação a cargas concentradas e analisar os deslocamentos no estado limite de utilização.

A resistência das vigas à flexão pode ser afetada pela ocorrência de dois fenômenos: a flambagem lateral com torção e a flambagem local. Ambos devem ser considerados no projeto, levando-se em conta as medidas de prevenção adequadas para garantir a estabilidade e a integridade da estrutura.

$$M_{sd} \leq M_{rd} \quad (55)$$

$$V_{sd} \leq V_{rd} \quad (56)$$

Segundo 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), sendo o momento fletor resistente da seção, o menor entre eles.

O cálculo do momento resistente devido ao FLT, é dado pela menor situação das Equações (57), (58) e (59):

$$M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (57)$$

$$M_{rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (58)$$

$$M_{rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r \quad (59)$$

Para a FLM e a FLA, o momento resistente de cálculo será o menor das três Equações (60), (61) e (62).

$$M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (60)$$

$$M_{rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right], \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (61)$$

$$M_{rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r \quad (\text{n\~{a}o aplic\~{a}vel \`{a} FLA) \quad (62)$$

As equações para determinação dos parâmetros estão apresentadas de forma esquematizada na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros dos estados limites de Perfis W.

Estados-limites aplicáveis	Mr	Mcr	λ	λ_p	λ_r
FLT	$(f_y - \sigma_r) \cdot W$	Nota 1	$\frac{L_b}{r_y}$	$1,76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Nota 1
FLM	$(f_y - \sigma_r) \cdot W$	$\frac{0,69 \cdot E}{\lambda^2} \cdot W$	b/t	$0,38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$0,83 \cdot \sqrt{\frac{E}{\left(\frac{0,7 \cdot f_y}{k_c}\right)}}$
FLA	$f_y \cdot W$	Viga de alma esbelta (não estudada nesse trabalho)	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Fonte: Adaptada da NBR 8800:2008

Nota 1:

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot \sqrt{I_y \cdot J}}{r_y \cdot J \cdot \beta_1} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot C_w \cdot \beta_1^2}{I_y}}} \quad (63)$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_b^2} \cdot \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \cdot \left(1 + 0,039 \cdot \frac{J \cdot L_b^2}{C_w}\right)} \quad (64)$$

Onde:

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) \cdot W}{E \cdot J}$$

$$C_w = \frac{I_y \cdot (d - t_f)^2}{4}, \text{ para perfis I}$$

2.3.5 Peças submetidas à flexão composta

A capacidade de demanda se refere à capacidade de cada barra em suportar os esforços solicitantes axial e flexão, combinados. No dimensionamento adequado da estrutura, procura-se utilizar perfis com capacidade de demanda abaixo de 1. Nesse contexto, quanto mais próximo de 1 for o valor dessa capacidade, maior será a eficiência da barra em termos de aproveitamento. No entanto, caso a capacidade de demanda seja superior a 1, a barra não atende aos requisitos estabelecidos pela norma NBR 8800:2008.

Para a verificação da capacidade de demanda nas barras, também chamada de flexo-compressão ou flexo-tração, o SAP2000 utiliza a norma AISC 360/16 para o dimensionamento de aço, similar à norma NBR 8800:2008. Para essa verificação temos as Equações (65) e (66):

$$\text{Para } \frac{N_{sd}}{N_{rd}} < 0,2$$

$$\frac{N_{sd}}{N_{rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,sd}}{M_{x,rd}} + \frac{M_{y,sd}}{M_{y,rd}} \right) \leq 1 \quad (65)$$

$$\text{Para } \frac{N_{sd}}{N_{rd}} < 0,2$$

$$\frac{N_{sd}}{2 \cdot N_{rd}} + \left(\frac{M_{x,sd}}{M_{x,rd}} + \frac{M_{y,sd}}{M_{y,rd}} \right) \leq 1 \quad (66)$$

Em que:

N_{sd} – É a força axial solicitante de cálculo de tração ou de compressão, a que for aplicável;

N_{rd} – É a força axial resistente de cálculo de tração ou de compressão, a que for aplicável;

$M_{x,sd}$ – Momentos fletores solicitantes de cálculo, no eixo x;

$M_{x,rd}$ – Momentos fletores resistentes de cálculo, no eixo x;

$M_{y,sd}$ – Momentos fletores solicitantes de cálculo, no eixo y;

$M_{y,rd}$ – Momentos fletores resistentes de cálculo, no eixo y;

Segundo Pfiel (2021), em situações envolvendo vigas-colunas com extremidades indeslocáveis, como aquelas com momentos extremos diferentes ou submetidas a cargas transversais, é possível chegar à determinação do momento máximo utilizando a mesma forma da Equação (67).

$$M_{sd_{m\acute{a}x}} = B1 \cdot M1 \quad (67)$$

Onde B1 é de acordo com a Equação (68):

$$B1 = \frac{C_m}{1 - \frac{N_{sd}}{N_{rd}}} \quad (68)$$

Onde:

C_m = Fator que depende da configuração do diagrama do momento fletor de 1ª ordem e da relação $\frac{N_{sd}}{N_{rd}}$.

$M1$ = Valor máximo do momento fletor de 1ª ordem.

Em caso de hastes com extremidades indeslocáveis sujeitas a cargas transversais, C_m pode ser tomado conservadamente igual a 1,0.

2.3.6 Deslocamento Máximo

Segundo a NBR 8800 de 2008, apresenta alguns deslocamentos máximos admitidos em algumas situações, entre elas, existe as vigas que suportam pilares e pilares de edifícios de dois ou mais pavimentos, portanto, as Equações (69) e (70) apresenta as limitações dos deslocamentos para o primeiro e para o segundo caso, respectivamente.

Para vigas:

$$d_{m\acute{a}x} = \frac{L}{500} \quad (69)$$

Para pilares:

$$d_{m\acute{a}x} = \frac{H}{400} \quad (70)$$

2.4 SOFTWARE SAP2000

Outra importante ferramenta de análise estrutural é o Método dos Elementos Finitos (MEF), que surgiu na metade do XX, quando surgiram os primeiros computadores, os fundamentos já eram conhecidos, mas as ferramentas de cálculos impossibilitavam a sua utilização antes da criação dos computadores.

O SAP2000 é um software de análise estrutural baseado em Método dos Elementos Finitos. O presente trabalho utilizou a versão 22.0.0. O software é muito utilizado pois possui um processador de cálculo bastante eficiente e possui uma flexibilidade interessante, pois, é possível modelar desde vigas simples, pórticos em três dimensões, lajes, cascas e treliças espaciais e permite considerar diversos carregamentos, como, esforços dinâmicos, efeitos de gradiente, temperatura, pressão, deslocamentos como recalque, e simulações com concreto protendido.

Existem vários tipos de elementos possíveis de serem utilizados no SAP2000, dentre todas as opções como: Elemento Frame, Shell, Cable, entre outros. Utilizaremos o Elemento Frame, pois, atente ao estudo realizado.

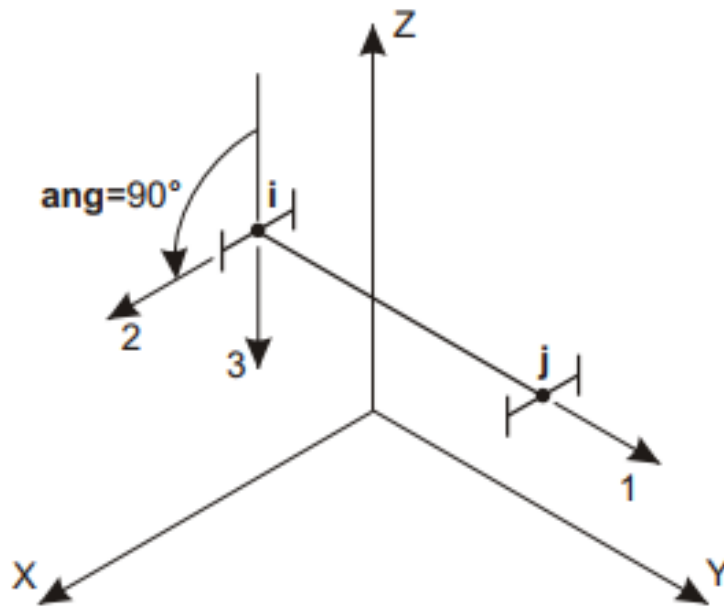
2.4.1 Elemento Frame

Apesar de ser um elemento unidimensional é um elemento bastante eficiente, ele permite ser usado em modelos de vigas, colunas, treliças planas e tridimensionais. Matematicamente no elemento frame está incluído o efeito biaxial de flexão, torção, deformação axial e deformação biaxial de cisalhamento.

Na interface gráfica do usuário, o elemento frame é modelado como uma linha reta conectada a dois nós que são chamados de nós I e J, não podendo ocupar o mesmo lugar no espaço. Essa linha coincide com o eixo longitudinal do elemento, passando pelo centroide das seções transversais, podendo dividir os elementos curvos em vários elementos retos.

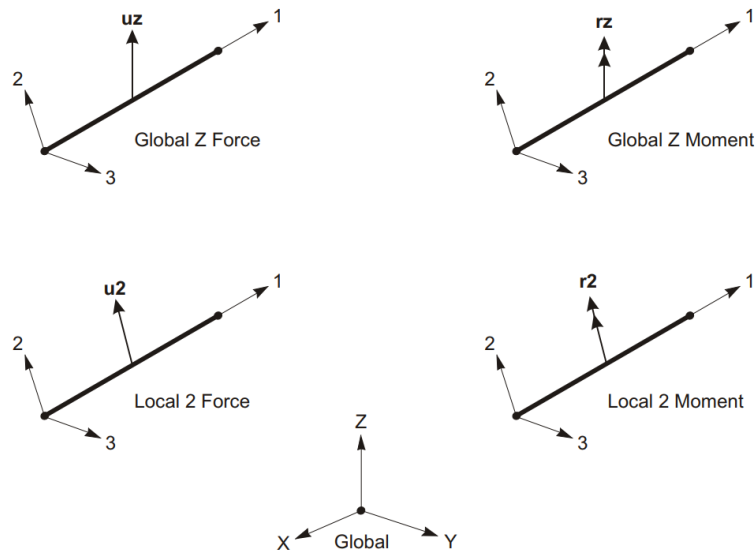
Cada nó possui seu próprio sistema de coordenadas local, possuindo seis graus de liberdade em ambas as extremidades conectadas. Os eixos do sistema local são denominados 1, 2 e 3, sendo o eixo 1 positivo no sentido do nó I para o nó J, longitudinal ao elemento, os outros eixos situam-se perpendicular ao eixo do elemento, tendo suas direções e sentidos definidos pelo usuário. Os quais são denominados U1, U2, U3, R1, R2 e R3 no sistema de coordenadas local dos nós, sendo U translações e R rotações, o sistema de coordenadas locais é utilizado para definir as propriedades da seção. Já o sistema de coordenadas global, temos X, Y e Z como denominações para os eixos globais, sendo UX, UY e UZ translações globais e RX, RY e RZ para rotações globais, como demonstrado na Figura 12 e Figura 13.

Figura 13: Exemplo de coordenada local de sistema frame paralelo ao eixo y.



Fonte: Manual SAP2000

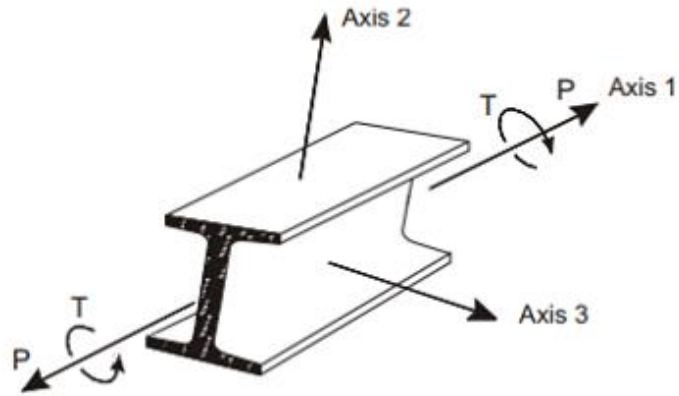
Figura 14: Exemplo de coordenada local de sistema frame paralelo ao eixo y.



Fonte: Manual SAP2000

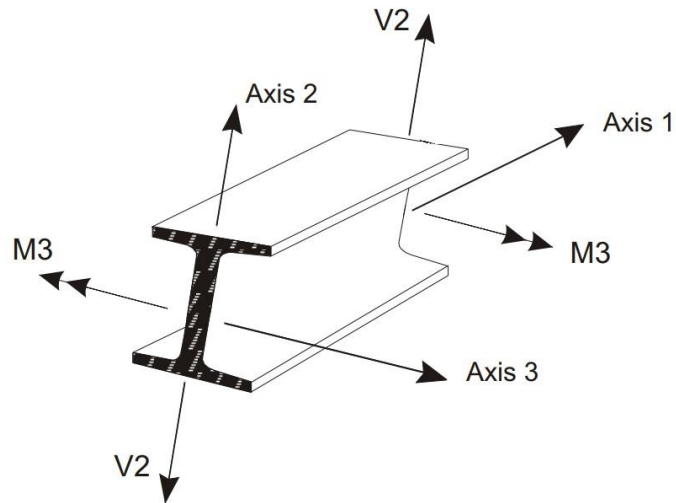
Temos que, os eixos 2 e 3 do elemento são paralelos aos eixos de simetria, com o eixo 2 na direção da maior dimensão da seção, e o eixo 3 na direção da menor dimensão, ou seja, menor inércia, conforme a Figura 15, Figura 16 e Figura 17:

Figura 15: Força Axial P Positiva e Momento de Torção T Positivo no Elemento FRAME



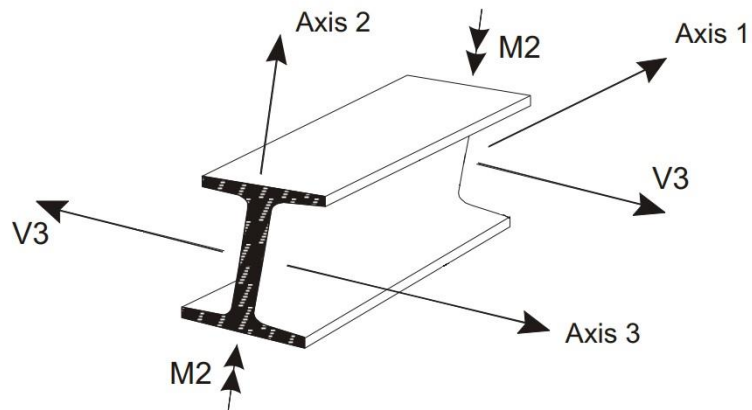
Fonte: Manual SAP2000

Figura 16: Força Cortante V2 Positiva e Momento Fletor M3 Positivo no Elemento FRAME



Fonte: Manual SAP2000

Figura 17: Força Cortante V3 Positiva e Momento Fletor M2 Positivo no Elemento FRAME



Fonte: Manual SAP2000

2.4.2 Propriedades dos Materiais

Para o elemento Frame, temos que todas as propriedades são utilizadas considerando o material como isotrópico, ou seja, todas as suas propriedades mecânicas são iguais independente da sua direção. Temos as seguintes propriedades usadas na secção:

- Módulo de elasticidade, E , para rigidez axial e rigidez à flexão.
- Módulo de cisalhamento, G , para rigidez de torção e rigidez de cisalhamento transversal.
- Coeficiente de expansão térmica, α , para expansão axial e tensão de flexão térmica.
- Densidade de massa, m , para calcular cargas de peso próprio e gravidade.
- Torção J .

2.4.3 Propriedades Geométricas

Seis propriedades geométricas são consideradas junto com as propriedades do material no cálculo das rigidezes das secções.

- A área da secção transversal, a . Sendo a rigidez da secção axial dada por:

$$a \cdot e1 \quad (71)$$

- O momento de inércia, $i33$, em relação ao eixo 3 para flexão do plano 1-2. Sendo a rigidez da secção igual a:

$$i33 \cdot e1 \quad (72)$$

- Momento de inércia, $i22$, em relação ao eixo 2 para flexão no plano 1-3. Sendo a rigidez da secção dada por:

$$i22 \cdot e1 \quad (73)$$

- Constante de torção j , tendo a rigidez de torção da secção é dada por:

$$j \cdot g1 \quad (74)$$

- Áreas de cisalhamento, $as2$, para cisalhamento transversal no plano 1-2. Sendo a rigidez de cisalhamento dada por:

$$as2 \cdot g12 \quad (75)$$

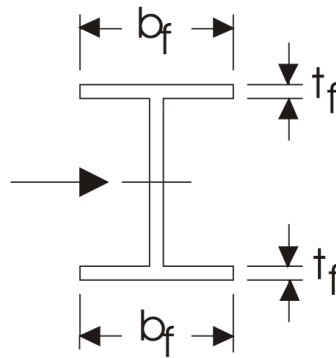
- Áreas de cisalhamento, as_3 , para cisalhamento transversal no plano 1-3. Sendo a rigidez de cisalhamento dada por:

$$as_3 \cdot g_{12} \quad (76)$$

2.4.4 Seção Transversal

Existem vários tipos de seções transversais perfis de aço, foi utilizado o perfil I, apresentado na Figura 37.

Figura 18: Perfil transversal I



Fonte: Manual SAP2000

$$A_f = \frac{5}{3} \cdot t_f \cdot b_f \quad (77)$$

Onde:

A_f – Área efetiva;

t_f – Espessura da mesa;

b_f – Largura da mesa;

2.5 CUSTO

Segundo Taves (2014), na atual conjuntura econômica brasileira, a análise de custos desempenha um papel crucial para a viabilidade de empreendimentos pelas construtoras. Um orçamento mal elaborado pode fornecer informações incompletas sobre as diversas fases da obra, impossibilitando o estabelecimento de metas orçamentárias e a quantificação de serviços e materiais. Isso pode resultar em prejuízos tanto para a construtora quanto para a incorporadora. Um orçamento preciso oferece várias vantagens, como antecipar os custos

necessários para a construção, auxiliar na tomada de decisões com base no orçamento, dimensionar corretamente as equipes de trabalho, controlar o consumo de materiais e garantir que o cronograma físico-financeiro da obra esteja seguindo o ritmo desejado.

Além disso, a correta análise da engenharia de custos permite otimizar o processo de estimativa de custos, reduzindo os riscos de gastos não previstos inicialmente no orçamento. Em suma, a avaliação de custos desempenha um papel fundamental na tomada de decisão das empresas em relação à realização de empreendimentos, sendo determinante para o sucesso futuro e exigindo a aplicação consciente dos princípios dessa disciplina (TAVES, 2014).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

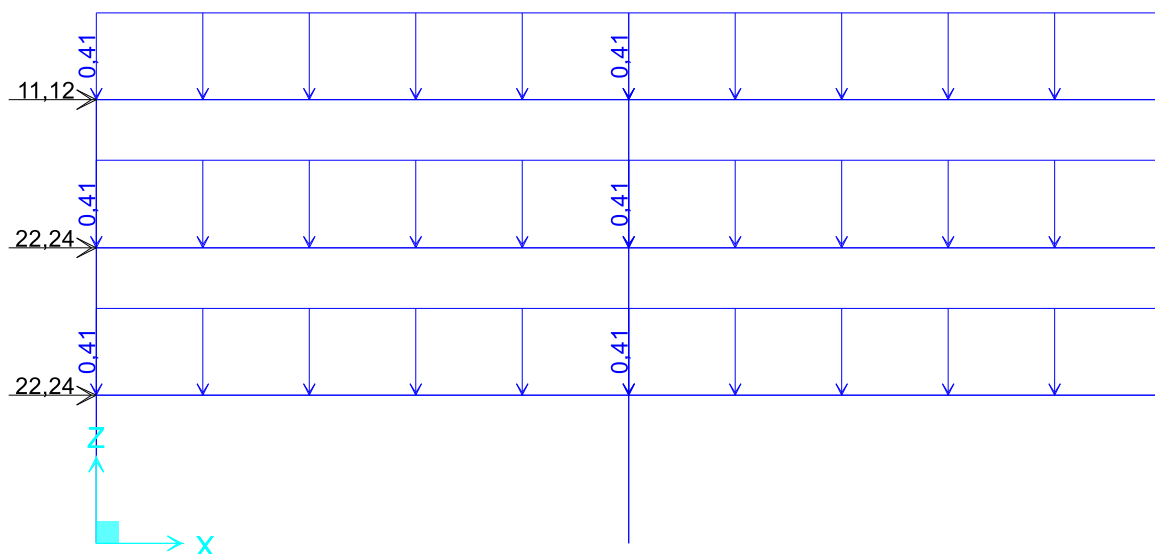
3.1 CASOS

Para análise, foram escolhidos dois problemas estudados por Degertekin (2007), este trabalho comparou seus resultados com outros dois métodos, Pezeshk et al. (2000), Camp et al. (2005). Com isso, utilizaremos os dois primeiros casos para comparar os valores obtidos no SAP2000 com os resultados do lançamento da estrutura no programa de Algoritmos Genéticos.

3.1.1 Caso 01

O primeiro caso trata-se de um pórtico plano de quatro níveis verticais e com três horizontais, com 15 barras, sendo, 9 verticais de 3,048 metros cada, e 6 barras horizontais de 10,9728 metros cada, com três apoios de 2º gênero na base. Como mostrado na Figura 19, nas unidades *kip* (k), *foot* (ft).

Figura 19: Pórtico Plano do Caso 01 - Degertekin (2007)

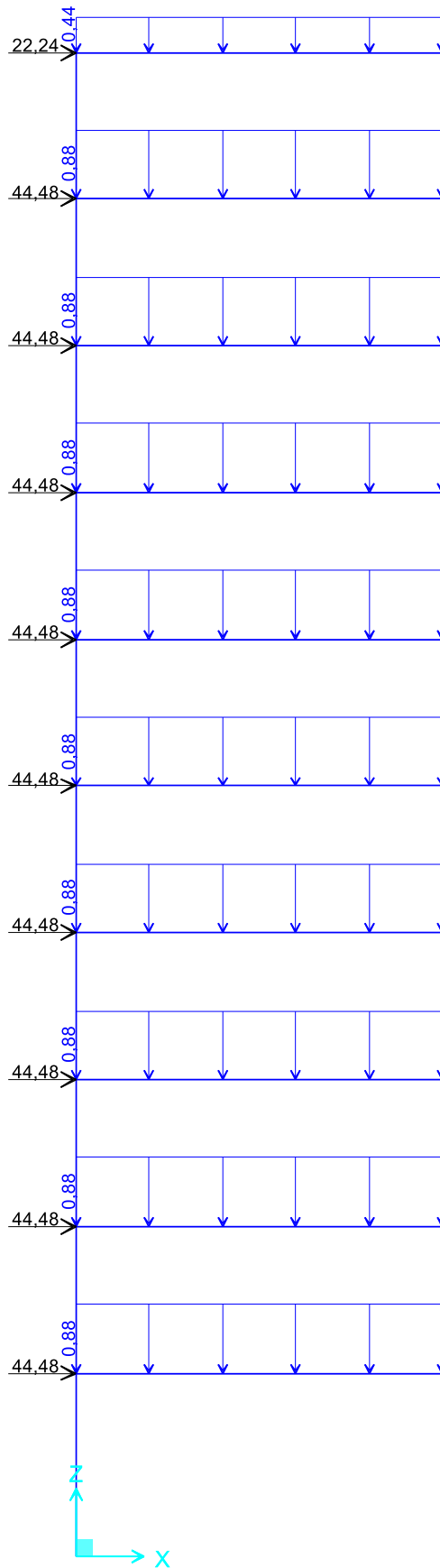


Fonte: Degertekin (2007), adaptado.

3.1.2 Caso 02

O segundo caso, trata-se de um pórtico de dez níveis verticais e um horizontal, com 30 barras, sendo, 20 verticais, as duas inferiores de 4,572 metros e as outras de 3,6576 metros cada, e 10 barras horizontais de 9,144 metros cada, com três apoios engastados na base, como demonstrado na Figura 20.

Figura 20: Pórtico Plano do Caso 02 - Degertekin (2007).



Fonte: Degertekin (2007), adaptado.

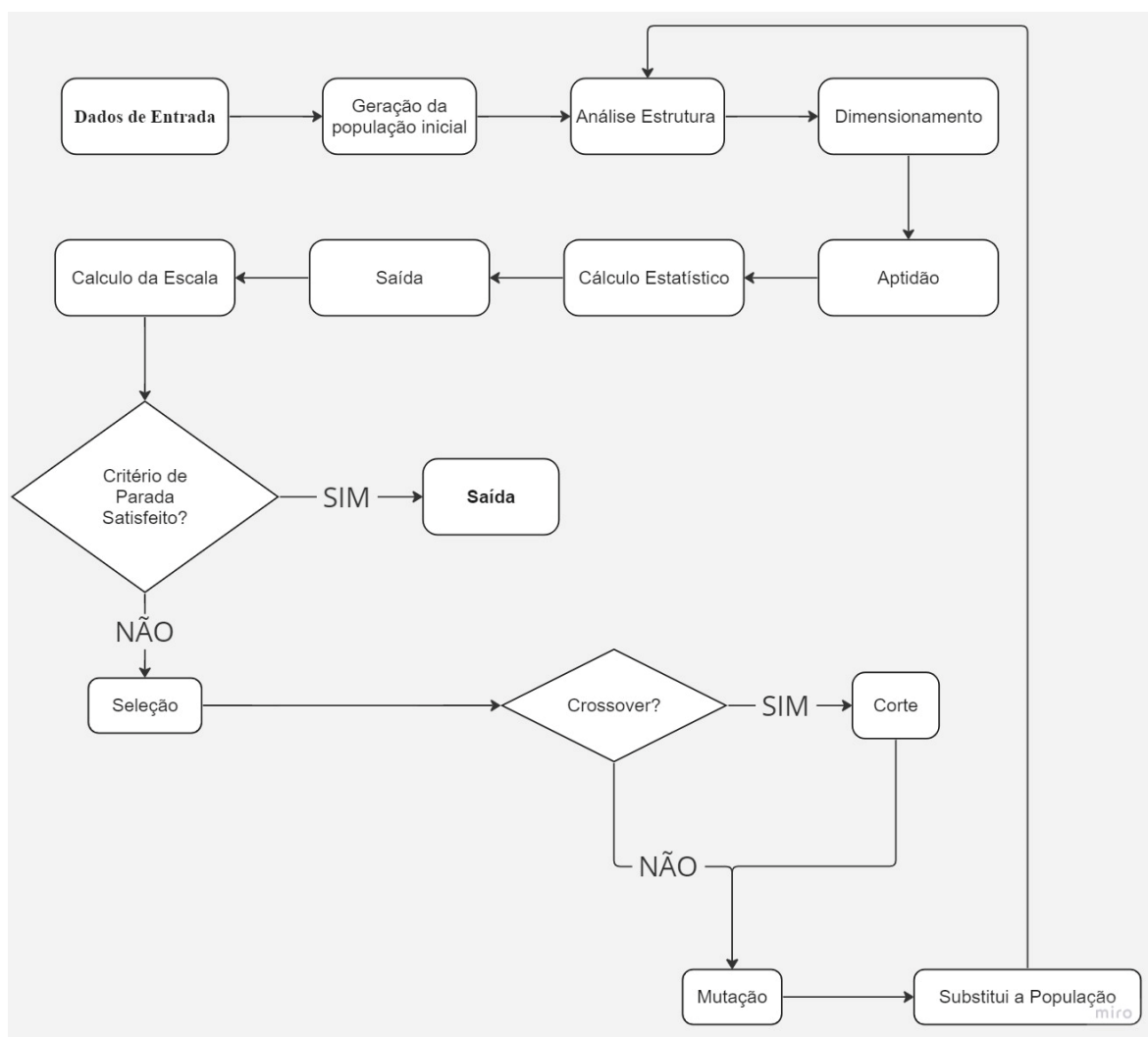
3.2 CÓDIGO EM ALGORITMO GENÉTICO

Para a elaboração deste trabalho, utilizou-se como ponto de partida o código computacional desenvolvido em linguagem Python por Barreto (2019). Onde ele desenvolveu um código que utiliza algoritmo genético, todo o código foi revisado e feito melhorias para seu melhor desempenho.

O algoritmo de otimização foi desenvolvido em Python 3.7, utilizando apenas a biblioteca padrão da linguagem, sem a necessidade de módulos externos. Segundo Barreto (2019), o código consiste em cinco principais rotinas: entrada de dados (INPUT), análise estrutural (PORTAN), dimensionamento (DIMENSIONAR), otimização usando Algoritmos Genéticos e por fim, a saída de dados (SAIDA).

A Figura 21 abaixo ilustra o fluxograma completo do algoritmo, onde a rotina de otimização via Algoritmos Genéticos (AG) abrange todas as rotinas utilizadas:

Figura 21: Fluxograma do Algoritmo Genético



Fonte: Autor

3.2.1 Rotina de Entrada

A rotina de entrada, consiste em fornecer ao código todas as informações necessárias para seu funcionamento. Em um arquivo “.dat”, primeiramente, o usuário fornece todas as propriedades do algoritmo genético, como: tamanho da população inicial (PSIZE), número de barras (NUNKNO), número de bits para cada binário (SUBLEN), número máximo de gerações (MAXG), probabilidade de crossover (CP), fator de escala (SCALE), elite (ELITE), fator de normalização (LF), módulo de elasticidade (E), tensão de escoamento (f_y) e de ruptura do aço (f_u).

Após a leitura das propriedades do algoritmo genético, o arquivo de entrada informa as propriedades do pórtico, que são: número de nós (NN), número de elementos (NE), número de graus de liberdade por nó (NDF), semi-largura de banda (MS), número de nós por elemento (NNE), número de cargas nodais (NL), número de condições de contorno (NC), e o catálogo selecionado (CAT).

Em seguida, são apresentadas as informações referentes às posições dos nós no plano cartesiano, expressas em centímetros. Abaixo dessas informações, o usuário fornece os nós inicial (I) e final de cada elemento (F), juntamente com sua conectividade (IRZ). Em seguida, o usuário informa a posição (NÓ), direção (DIR.) e magnitude (VALOR) de cada carga nodal. Logo após, são definidas as condições de contorno, informando a posição (NÓ), direção (DIR) e valor (VALOR). Por fim, o usuário especifica o tipo de cada elemento estrutural (TIPO), identificando se é uma coluna (pilar) ou uma viga, e qual sua orientação no eixo (ORIENTAÇÃO) que o código usa para identificar qual a equação utilizar, além de indicar sua orientação.

Outra informação importante são as características de cada perfil comercial, as quais são fornecidas em um arquivo separado no formato ".txt". Para este trabalho, foi utilizado o catálogo da AISC e o arquivo com nome de “Perfis_Estruturais_AISC.txt”, que são uma gama de perfis, encontrado na norma americana AISC. Esses catálogos contém todas as informações necessárias para alimentar a rotina DIMENSIONAR. As áreas desses perfis de 16,3 cm² até 1750,0 cm² para os perfis da AISC.

No apêndice A traz um exemplo de um arquivo de entrada de dados do caso 01.

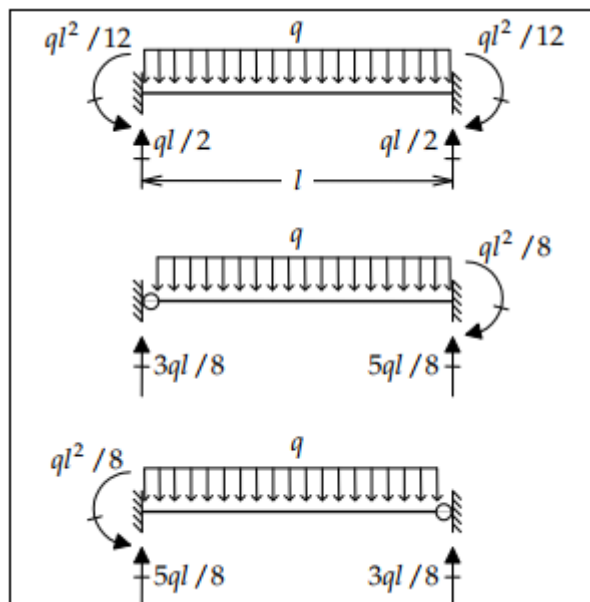
3.2.2 Análise Estrutural (PORTAN)

A rotina PORTAN se baseia no código fornecido por Brebbia (1986), onde essa rotina desempenha a função de calcular os esforços do sistema utilizando o Método da Rigidez Direta. Por meio desse método matricial, a análise estrutural é realizada de forma

abrangente, resultando nos deslocamentos nodais e nos esforços atuantes nos membros da estrutura.

Para utilizar o código corretamente, é essencial fornecer as cargas nodais em cada elemento. As cargas nodais referem-se às forças e momentos que agem diretamente nos nós da estrutura. Quando existe cargas distribuídas nos elementos, é necessário calcular as cargas nodais equivalentes, que são cargas resultantes das reações de apoio provenientes do engastamento perfeito nos elementos de cada barra. Essas cargas são calculadas com base nas reações de apoio ilustradas na Figura 22: Reações de engastamento perfeito de cargas distribuídas Figura 22. É importante ter atenção ao fornecer as cargas nodais e seguir corretamente a convenção correta de sinal para obter resultados corretos.

Figura 22: Reações de engastamento perfeito de cargas distribuídas



Fonte: Martha(2022)

O programa não calcula essas forças nodais equivalentes, terá que ser feito separado e fornecer junto com as cargas nodais no arquivo de entrada.

3.2.3 Rotina Dimensionar

Essa rotina utiliza os esforços internos de cada barra obtidos através da função PORTAN, com base na norma NBR 8800:2008, calcula os esforços resistentes de cada elemento, determinado os fatores de segurança relacionados às tensões e os deslocamentos. Esses cálculos são cruciais para garantir a estabilidade da estrutura. Os resultados desses cálculos são posteriormente utilizados na função penalidade para calcular a aptidão de cada indivíduo.

Só é possível utilizar o código DIMENSIONAR com perfis laminados W, foi utilizado um catálogo comercial, mas existe a possibilidade de adicionar outros perfis se assim for necessário, fornecendo todas as informações necessárias. O aço utilizado neste trabalho é o A572 Grau 50, mas o usuário tem a flexibilidade de alterá-lo a qualquer momento. Para isso, basta inserir o módulo de elasticidade (E), a tensão de escoamento (Fy) e a tensão de ruptura (Fu) correspondentes ao novo tipo de aço.

3.2.4 Quantidades de bits

Segundo Linden (2012), para a escolha da quantidade de bits com uma precisão determinada, é necessário utilizar a equação de conversão de binário para real, apresentada na Equação (78).

$$\text{real} = \text{inf}_i + \frac{\text{sup}_i - \text{inf}_i}{2^k - 1} \cdot r_i \quad (78)$$

Nesta fórmula, r_i representa o número inteiro correspondente ao cromossomo binário. Para os perfis da AISC, o intervalo considerado é de [16,3;1750], assim, $\text{sup}_i - \text{inf}_i = 1750 - 16,3 = 1733,7$ e nosso objetivo é obter uma diferença de 0,1 entre dois valores consecutivos. Portanto, podemos expressar da seguinte maneira:

$$\text{inf}_i + \frac{\text{sup}_i - \text{inf}_i}{2^k - 1} \cdot (r_i + 1) - \text{inf}_i + \frac{\text{sup}_i - \text{inf}_i}{2^k - 1} \cdot r_i = 0,1 \quad (79)$$

Logo, para o caso dos perfis da AISC, temos:

$$\frac{\text{sup}_i - \text{inf}_i}{2^k - 1} = 0,1 \rightarrow k = 14,08 \quad (80)$$

Portanto, de acordo com a Equação (80), são necessários 15 bits para uma precisão de no mínimo 0,1.

3.2.5 Mutação

Para o presente trabalho, a probabilidade de mutação é apresentada na Equação (81).

$$F'(x) = \frac{1}{Tsleng} = \frac{1}{nunkno \cdot sublen} \quad (81)$$

Onde $Tseng$ é um parâmetro cálculo pelo produto dos valores da quantidade de elementos (nunkno) pelo tamanho dos cromossomos (sublen).

Para o caso 1, onde o número de barras(nunkno) é 15 e o número de bits (sublen) é 15, estão a probabilidade de mutação é de 0,44%. Já para o caso 2, onde o número de barras é de 30 e o número de bits é de 15, a probabilidade de mutação é de 0,2%.

3.2.6 Rotina de impressão dos resultados (SAIDA)

A cada nova geração, o algoritmo registra os resultados obtidos em um arquivo externo com a extensão ".out", cujo nome é definido no início do programa. Esse processo ocorre da seguinte forma: primeiramente, o código imprime as propriedades dos elementos. Em seguida, são impressos a identificação de cada elemento (Elemento) o nome dos perfis de cada barra obtidos em cada indivíduo (Perfil), juntamente com a sua área decimal (Decimal) e a área do perfil (Área), fatores de segurança relacionados às tensões (FSt) e os deslocamentos (FSd), a função peso de cada elemento (Penalidade), a massa de cada barra (Massa) e por fim, a massa total (TOTAL) e a aptidão de cada indivíduo (APTIDÃO). É importante ressaltar que a função peso mencionada não está relacionada ao peso físico da estrutura, que é calculado considerando a gravidade. Em vez disso, refere-se à função penalidade utilizada no contexto do algoritmo genético.

Em cada indivíduo, juntamente com as informações mencionadas anteriormente, o programa também imprime os valores dos deslocamentos nodais (UX, UY e RX), reações nodais (PX, PY e MZ) e as forças internas de cada barra (PX, PY e MZ).

Após cada geração, o programa imprime todas essas informações do melhor indivíduo da geração. No final da última geração, o programa imprime novamente as informações do melhor indivíduo, levando em consideração todas as gerações.

3.3 FUNÇÃO APTIDÃO

Segundo Barreto (2019), a função aptidão apresentada na Equação (4) do item 2.1.5, precisa de alterações para melhores resultados, as frações da função penalidade, foram denominadas de fatores de segurança, onde o FSt está relacionado com as tensões da barra e o FSd está relacionado com os deslocamentos nodais do elemento.

Para atender aos critérios da NBR 8800:2008, o fator de segurança das tensões de cada membro, estará relacionado com os esforços que cada membro está submetido, podendo receber os valores apresentados nas Equações (82), (83), (84), (85) ou (86).

Para elementos submetidos à tração:

$$FS_t = \frac{N_{t,sd}}{N_{t,rd}} \quad (82)$$

Para elementos submetidos à compressão:

$$FS_t = \frac{N_{c,sd}}{N_{c,rd}} \quad (83)$$

Para elementos submetidos à flexão simples:

$$FS_t = \frac{M_{sd}}{M_{rd}} \quad (84)$$

Para elementos submetidos à flexo-compressão:

Se $\frac{N_{sd}}{N_{rd}} \geq 0,2$:

$$FS_t = \frac{N_{sd}}{N_{rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{sd}}{M_{rd}} \right) \quad (85)$$

Se $\frac{N_{sd}}{N_{rd}} < 0,2$:

$$FS_t = \frac{N_{sd}}{2 \cdot N_{rd}} + \frac{M_{sd}}{M_{rd}} \quad (86)$$

Na equação (85) e (86), quando o valor de Sd é significativamente maior em relação a Rd, o FSt se aproximará de zero, indicando um elemento menos eficiente. Por outro lado, à medida que o valor de Sd se aproxima de Rd, o valor de FSt estará mais próximo de 1, indicando um elemento mais bem aproveitado, essa eficiência está diretamente relacionada ao melhor custo.

De forma análoga, o quanto mais próximo do deslocamento máximo estiver o elemento, mais eficiente ele será, o deslocamento máximo é calculado a partir das Equações (69) e (70).

Com essas considerações a função penalidade se apresenta de acordo com a Equação (87).

$$pen(x) = \left[\sum_{i=1}^{Ne} (FS_t - 1)^2 + \sum_{i=1}^{Ne} (FS_d - 1)^2 \right] \quad (87)$$

A função penalidade da forma que se apresenta na Equação (87) não é eficiente quando os valores dos fatores de segurança são pouco maiores que 1, pois, mesmo com o perfil não atendendo à NBR 8800 ele terá uma penalidade baixa, a solução proposta por Barreto (2019), é que quando ocorrer esse caso, o valor da penalidade se torne o valor do fator de segurança.

Para aprimorar os resultados, foi identificada a necessidade de introduzir um coeficiente que aumente a penalização quando os fatores de segurança excedem 1. Esse coeficiente tem como objetivo reforçar a importância da conformidade com os limites de segurança e garantir uma abordagem mais rigorosa na análise.

Ao incluir o coeficiente de penalidade nas equações, é possível ajustar o grau de penalização para os casos em que os fatores de segurança ultrapassam o valor desejado. A seguir, apresentamos as Equações (88), (89) e (90).

Quando $FS_t > 1$:

$$pen(x) = \varphi \cdot FS_t \quad (88)$$

Quando $FS_d > 1$:

$$pen(x) = \varphi \cdot FS_d \quad (89)$$

Quando $FS_t > 1$ e $FS_d > 1$:

$$pen(x) = \varphi \cdot (FS_t + FS_d) \quad (90)$$

Onde:

φ = Coeficiente de ajuste da penalidade,

Com essas adequações, sempre que um dos valores de FS for maior que 1, o valor da penalidade utilizará as Equações (88), (89) e (90) e sempre será maior que 1, tornando a penalidade maior do que os casos em que os dois fatores de segurança são menores que 1, que utilizarão a Equação (87).

Outra modificação na função penalidade foi proposto na Equação (86), da forma apresentada na Equação (87).

$$pen(x) = \gamma_t \cdot FS_t + \gamma_d \cdot FS_d \quad (91)$$

Onde:

γ_t = Coeficiente de penalidade do FS_t

γ_d = Coeficiente de penalidade do FS_d

Esses coeficientes são necessários para quando não é possível encontrar uma solução que satisfaça as Equações (81) e (82). Nesse caso, busca-se aumentar a penalidade de forma geral para encontrar uma solução que esteja em conformidade com a norma NBR 8800:2008.

Outra adequação necessária, é a utilização do valor já fornecido pelos catálogos utilizados nesse trabalho, que utilizam a massa em $\omega(kg/m)$, portanto a função objetivo passa a ser como apresentado na Equação (92).

$$f(x) = \frac{1}{L_f} \sum_{i=1}^{Ne} \omega_i L_i \quad (92)$$

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

$$F(x) = \frac{1}{L_f} \sum_{i=1}^{Ne} \omega_i L_i + pen(x) \quad (93)$$

Por fim, como o objetivo é minimizar o valor encontrado pela função, $F(x)$ passa a ser:

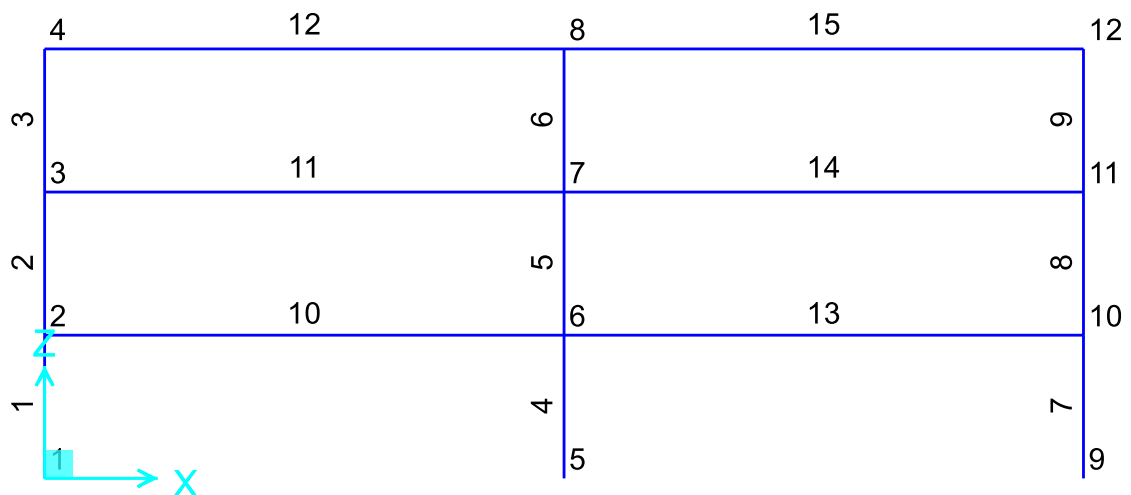
$$F'(x) = \frac{1}{\frac{1}{L_f} \sum_{i=1}^{Ne} \omega_i L_i + pen(x)} \quad (94)$$

3.4 DIMENSIONAMENTO

3.4.1 Caso 01

Para uma melhor organização dos dados, é interessante nomear os nós e as barras de cada pórtico, para o caso 01, nomeamos os nós e barras de acordo com a Figura 23, essa configuração é utilizada tanto no Algoritmo Genético tanto no SAP2000.

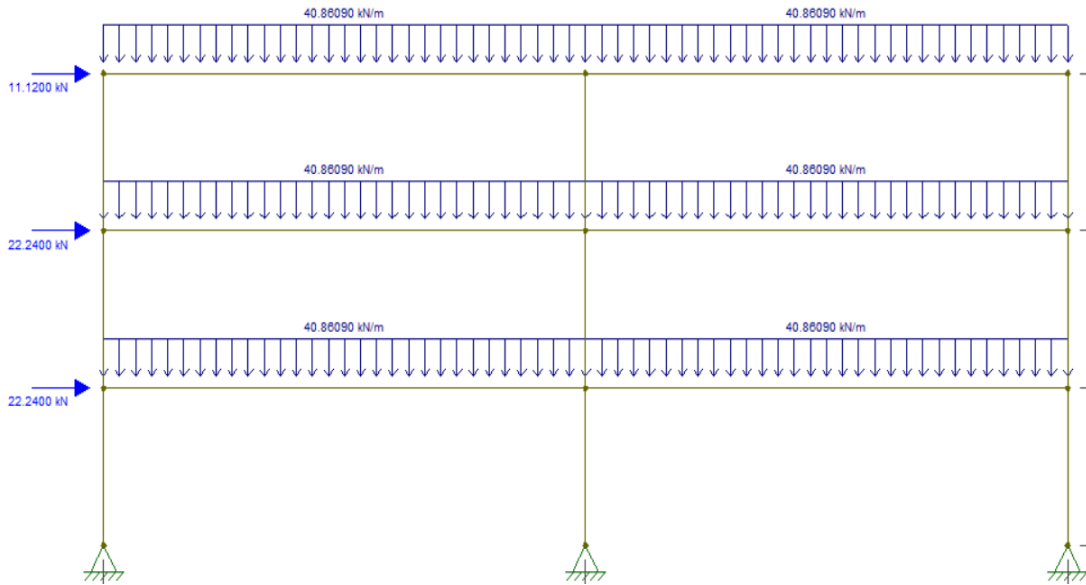
Figura 23: Nomenclatura das barras e nós do Caso 01



Fonte: Autor

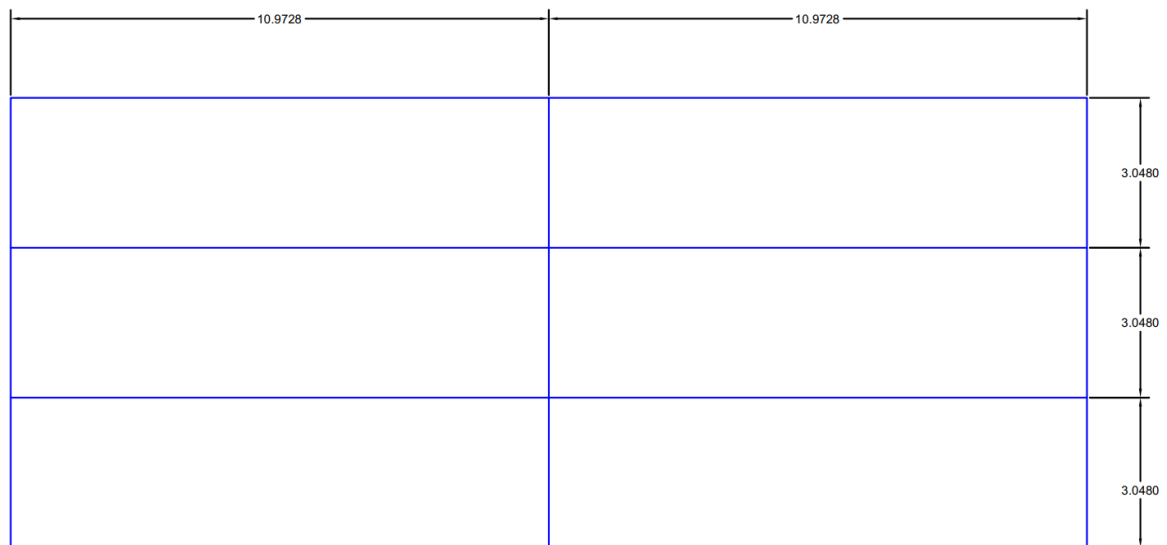
Para utilizarmos na aplicação, precisamos converter as unidades para o Sistema Internacional (SI), assim, temos que, $1k = 1kip = 4,448 \text{ KN}$ e $1 \text{ ft} = 30,48 \text{ cm}$, como demonstrado na Figura 24.

Figura 24: Pórtico Plano com cargas na unidade do SI.



Fonte: Autor.

Figura 25: Pórtico Plano Dimensões nas Unidades do SI



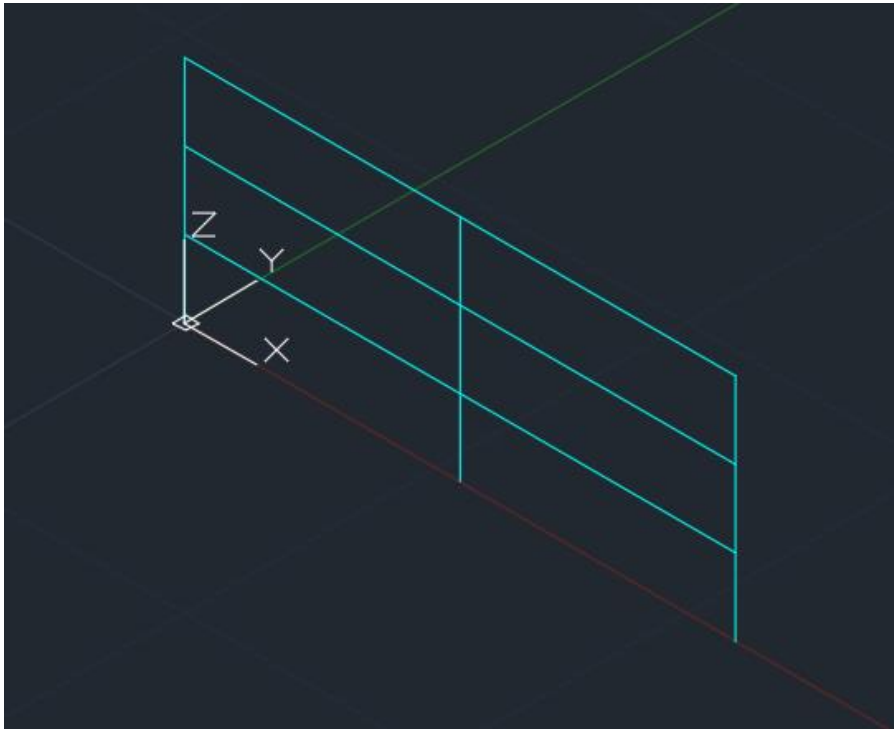
Fonte: Autor

Para demonstrar o método de dimensionamento da estrutura, foi utilizado o Caso 01 do trabalho realizado por Degertekin (2007), que é representado na Figura 24.

3.4.1.1 Dimensionamento pelo SAP2000

Para o dimensionamento no SAP2000, inicialmente foi lançado as barras no programa AutoCAD, para facilitar o lançamento da estrutura no programa, utilizando a ferramenta em 3D, utilizou o eixo X-Z para compatibilizar com o sistema de coordenadas do SAP2000, como mostra a Figura 26:

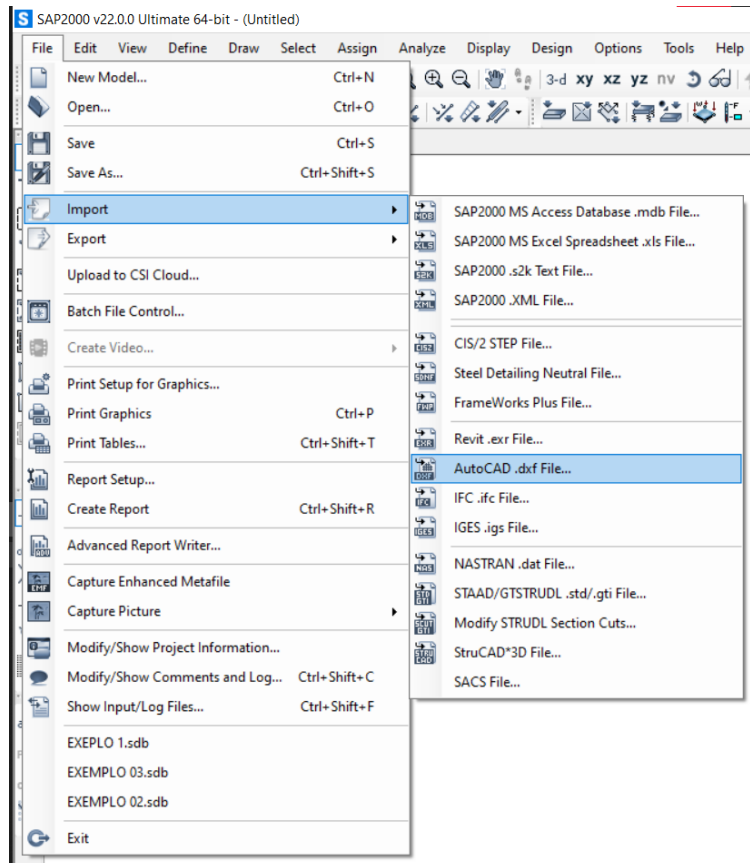
Figura 26: Caso 01 - Degertekin (2007) – Lançado no AUTOCAD



Fonte: Autor.

Com o arquivo pronto e em formato .DXF, importou a estrutura para o SAP2000 com o comando **File/Import/AutoCAD .dxf file ...**, como demonstrado na Figura 27.

Figura 27: Importação de arquivo .DXF para o SAP2000



Fonte: Autor

Após o lançamento da estrutura, é necessário definir o material a ser utilizado, no comando **Define/Materials**, o material escolhido é o aço A572Gr50, que já vem configurado pelo programa, tem o Módulo de Elasticidade definido por 199,9 GPa, com todas as propriedades demonstrado na Figura 28:

Figura 28: Propriedades do Aço A572Gr50

The image shows a software dialog box titled "Material Property Data" for the material A572Gr50. The dialog is organized into several sections:

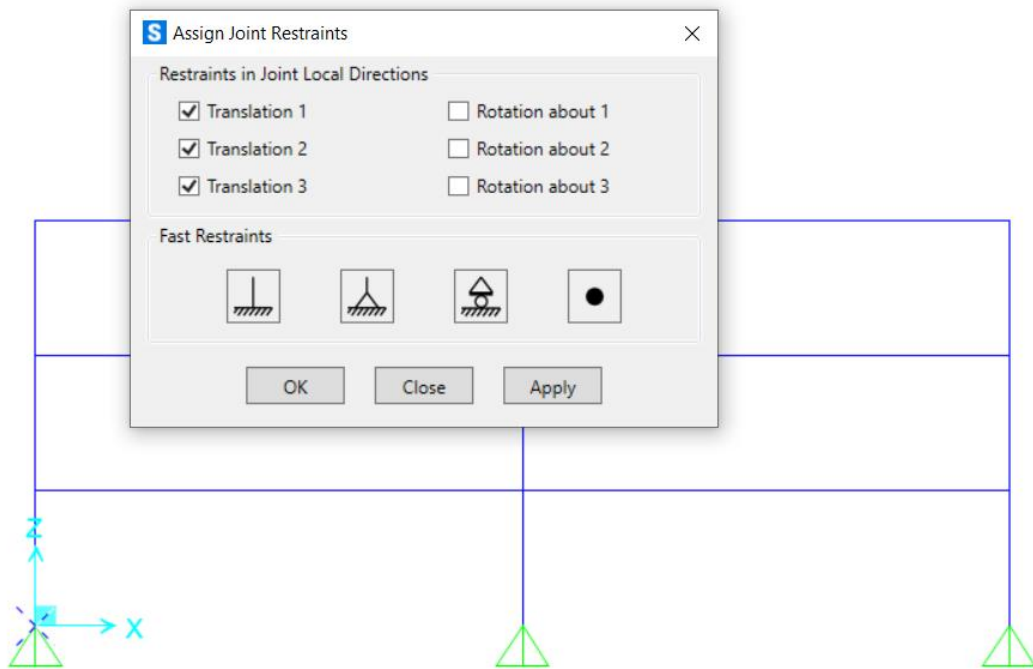
- General Data:** Material Name and Display Color (A572Gr50), Material Type (Steel), Material Grade (Grade 50), and Material Notes (Modify/Show Notes...).
- Weight and Mass:** Weight per Unit Volume (76,9729) and Mass per Unit Volume (7,849).
- Units:** A dropdown menu set to "KN, m, C".
- Isotropic Property Data:** Modulus Of Elasticity, E (1,999E+08); Poisson, U (0,3); Coefficient Of Thermal Expansion, A (1,170E-05); Shear Modulus, G (76903069,).
- Other Properties For Steel Materials:** Minimum Yield Stress, Fy (344737,9); Minimum Tensile Stress, Fu (448159,3); Expected Yield Stress, Fye (379211,7); Expected Tensile Stress, Fue (492975,2).

At the bottom, there is a checkbox for "Switch To Advanced Property Display" (unchecked) and "OK" and "Cancel" buttons.

Fonte: Autor.

Após a definição do material utilizado, definimos os tipos de apoios da estrutura no comando **Assing Joint Restrainsts**, de acordo com o caso atual, definimos os apoios como de segundo gênero restringindo a movimentação nas três direções e permitindo a rotação como mostrado na Figura 29.

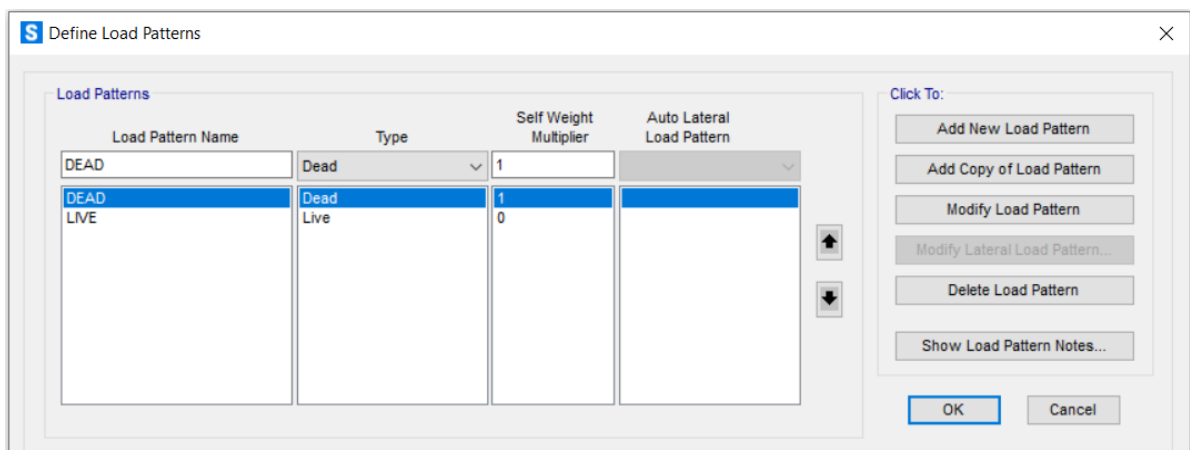
Figura 29: Inserindo restrições no apoio



Fonte: Autor.

Em seguida, foi definido os tipos de forças, no comando *Define/Load Patterns*, foi considerado um padrão de cargas para ser utilizado na estrutura, consideramos dois tipos de força, a principal é a carga “LIVE” que são as cargas variáveis presentes na estrutura e temos as cargas “DEAD” que são as cargas permanentes, como demonstrado na Figura 30.

Figura 30: Padrão de Cargas



Fonte: Autor.

Após definir o padrão de carga, foram inseridas as forças nodais e as cargas distribuídas, no menu **Assing Joint Forces** e **Assing Frame Distributed Loads**, respectivamente. Como mostrado na Figura 31 e Figura 32.

Figura 31: Inserindo Cargas Nodais

S Assign Joint Forces [Close]

General

Load Pattern: LIVE

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: 11,12 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: 0 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: 0 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Fonte: Autor.

Figura 32: Inserindo Cargas Distribuídas

S Assign Frame Distributed Loads [Close]

General

Load Pattern: LIVE

Coordinate System: GLOBAL

Load Direction: Gravity

Load Type: Force

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Uniform Load: 40,861 kN/m

Trapezoidal Loads

	1.	2.	3.	4.
Relative Distance	0	0,25	0,75	1
Loads	0	0	0	0 kN/m

Relative Distance from End-I Absolute Distance from End-I

Reset Form to Default Values

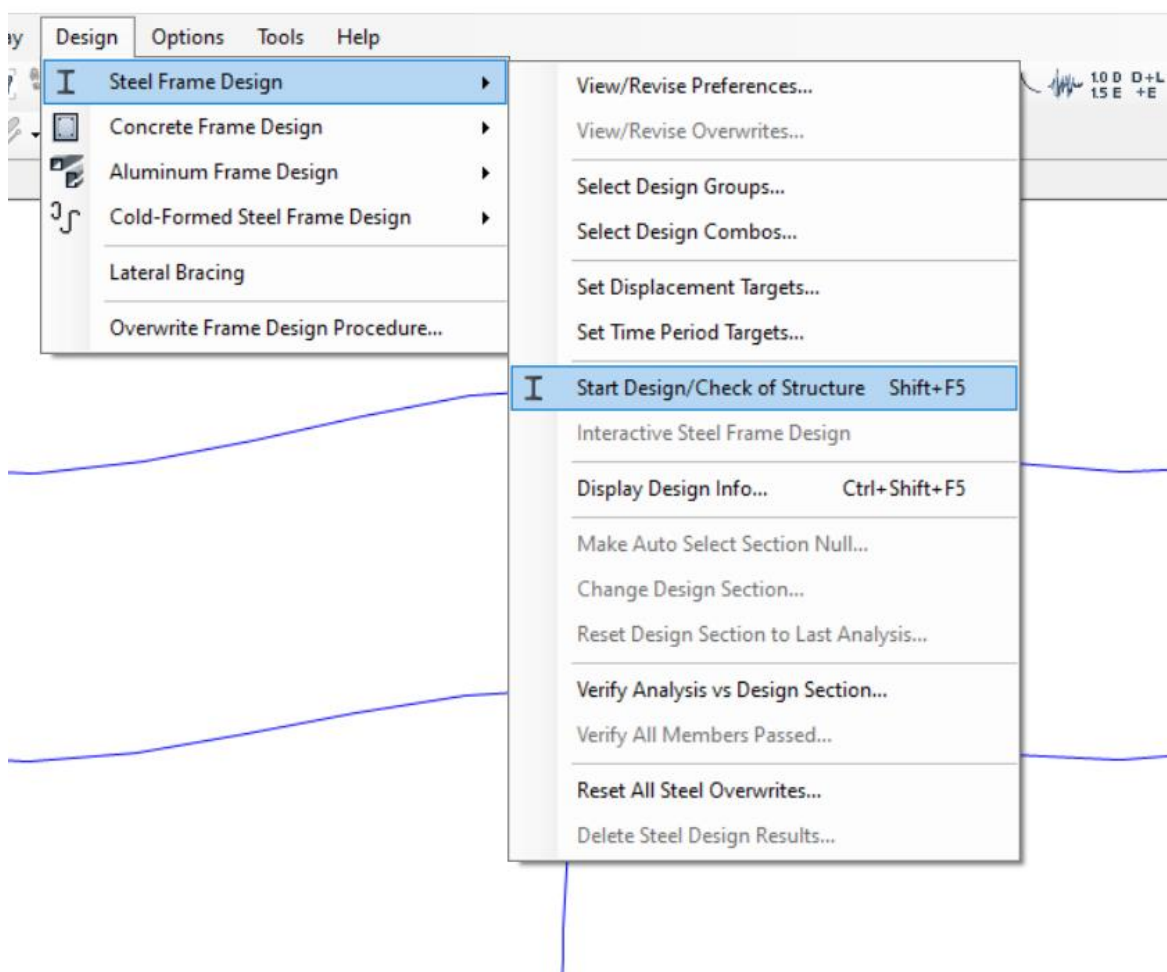
OK Close Apply

Fonte: Autor.

Após o processo de definição das cargas, foram definidos os perfis que o SAP2000 irá utilizar para dimensionar a estrutura, assim, utilizou os perfis da solução encontrada no AG, foi selecionado todos os Perfis W da ASTM, e assim, selecionou cada barra e empregou seu respectivo perfil no comando *Assign Frame Sections*,

Após o processo anterior, no comando *Run/Analysis* executamos a análise estrutural, par o SAP2000 calcular o perfil possível para cada barra, utiliza o comando *Design / Steel Frame Design / Start Design/Check of Structure*, como demonstrado na Figura 33.

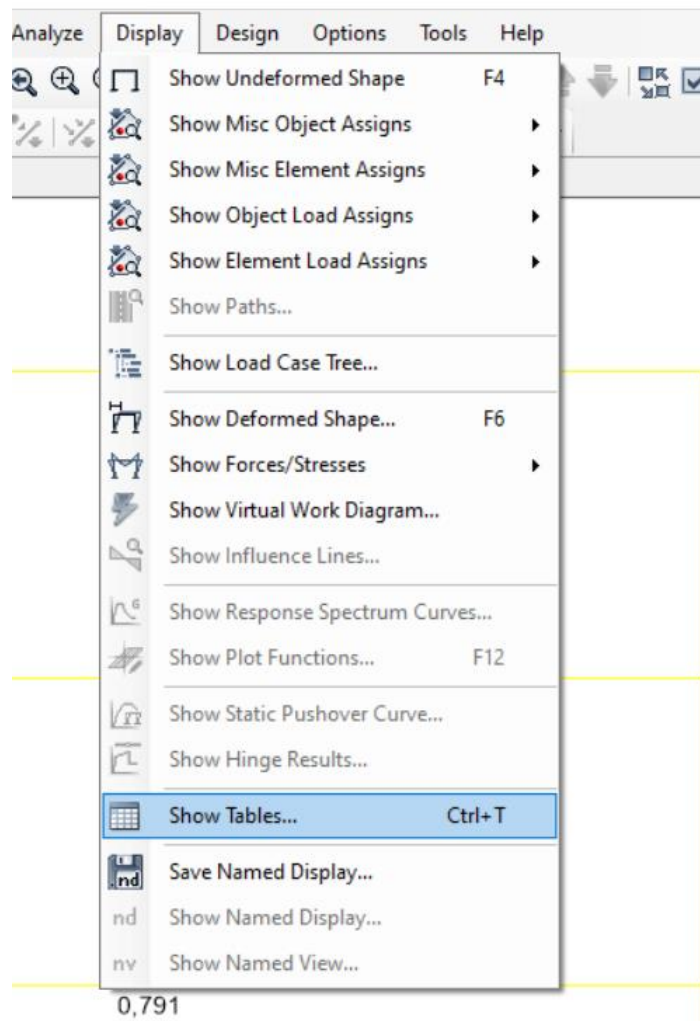
Figura 33: Dimensionamento Automático



Fonte: Autor.

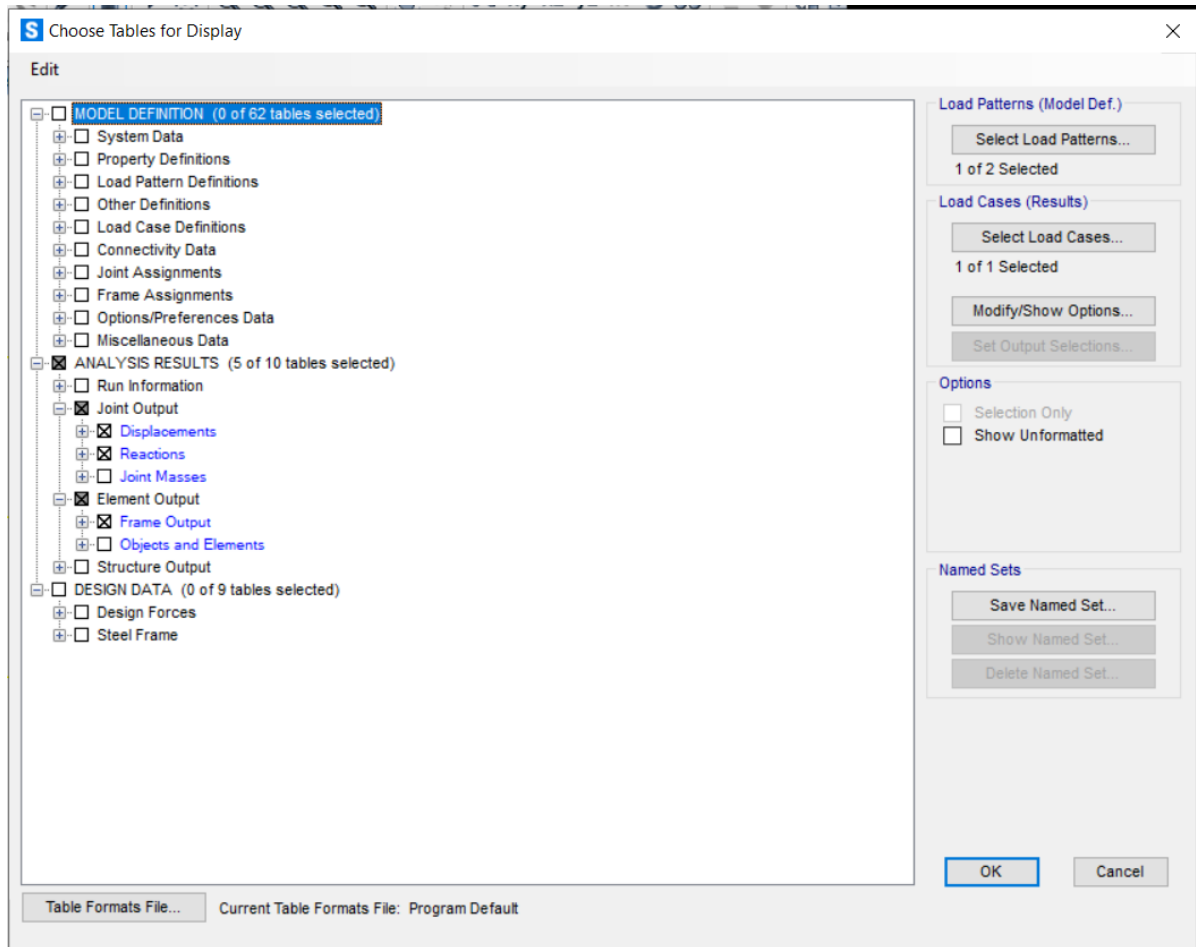
Para a visualização de todos os resultados, utiliza o comando *Display / Show Tables* como demonstrado na Figura 34, na aba que foi aberta, pode escolher quais resultados pretende visualizar, para o presente trabalho, foi escolhido, dentro da aba *ANALYSIS RESULTS*, escolhendo na aba dos nós, *Displacements* (Deslocamentos) e *Reactions* (Reações), na aba dos Elementos, foi escolhido *Frame Output* (Saída Frames), como demonstrado na Figura 34.

Figura 34: Saída dos Dados



Fonte: Autor

Figura 35: Saída dos Dados



Fonte: Autor

Assim, obtendo a tabela com todos os resultados solicitados. Para visualizar os resultados detalhado de cada barra, basta clicar com o botão direito do mouse na barra que se deseja visualizar os resultados e em seguida clicando no comando *Details*, como demonstra a Figura 36 e Figura 37.

Figura 36: Resultados detalhado da barra 12.

S Steel Stress Check Information (AISC 360-16)

Frame ID: 12 Analysis Section: W460X74
 Design Code: AISC 360-16 Design Section: W610X174

COMBO ID	STATION LOC	---MOMENT INTERACTION CHECK---	MAJ-SHR	MIN-SHR
ID	LOC	RATIO = AXL + B-MAJ + B-MIN	RATIO	RATIO
DSTL2	2,49	0,579 (C) = 0,26 + 0,319 + 0,	0,098	0,
DSTL2	2,99	0,667 (C) = 0,26 + 0,407 + 0,	0,08	0,
DSTL2	3,49	0,746 (C) = 0,26 + 0,487 + 0,	0,061	0,
DSTL2	3,99	0,813 (C) = 0,26 + 0,554 + 0,	0,043	0,
DSTL2	4,49	0,864 (C) = 0,26 + 0,604 + 0,	0,025	0,
DSTL2	4,99	0,889 (C) = 0,092 + 0,797 + 0,	0,007	0,
DSTL2	5,49	0,896 (C) = 0,092 + 0,804 + 0,	0,012	0,

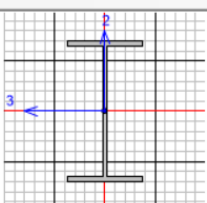
Buttons: Overwrites, Details, Tabular Data, Strength, Deflection, OK, Cancel, Table Format File

Fonte: Autor

Figura 37: Resultados detalhado da barra 12.

Steel Stress Check Data AISC 360-16

File



Units: N, m, C

AISC 360-16 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
 Units : N, m, C

Frame : 12 X Mid: 5,486 Combo: DSTL2 Design Type: Beam
 Length: 10,973 Y Mid: 0, Shape: W610X174 Frame Type: SMF
 Loc : 5,486 Z Mid: 9,144 Class: Slender Princpl Rot: 0, degrees

Provision: LRFD Analysis: Direct Analysis
 D/C Limit=0,95 2nd Order: General 2nd Order Reduction: Tau-b Fixed
 AlphaPr/Py=0,039 AlphaPr/Pe=0,146 Tau_b=1, EA factor=0,8 EI factor=0,8

PhiB=0,9 PhiC=0,9 PhiTY=0,9 PhiTF=0,75
 PhiS=0,9 PhiS-RI=1, PhiST=0,9

A=0,022 I33=0,001 r33=0,257 S33=0,005 Av3=0,012
 J=2,800E-06 I22=1,240E-04 r22=0,075 S22=7,631E-04 Av2=0,009
 E=1,999E+11 Fy=344737894, Ry=1,1 z33=0,005 Cw=1,099E-05
 RLLF=1, Fu=448159263, z22=0,001

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo DSTL2)

Location	Pu	Mu33	Mu22	Vu2	Vu3	Tu
5,486	-296128,227	737998,889	0,	20613,274	0,	0,

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1-lb)
 D/C Ratio: 0,896 = 0,092 + 0,804 + 0,
 = (1/2) (Pr/Pc) + (Mr33/Mc33) + (Mr22/Mc22)

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1-lb)

Factor	L	K1	K2	B1	B2	Cm
Major Bending	1,	1,	1,	1,	1,	1,
Minor Bending	1,	1,	1,	1,	1,	1,

L1tb K1tb Cb
 LTB 1, 1, 1.138

Fonte: Autor.

Na Figura 36, está representado a capacidade de demanda de cada barra, onde o RATIO é o valor final para cada barra, já na Figura 37, apresenta todas as informações da barra selecionada, como o identificador (Frame), o comprimento (Length), o perfil (Shape), capacidade de demanda (D/C Ratio) entre outras informações.

3.4.1.2 Dimensionamento Pelo Algoritmo Genético

Os dados de entrada para buscar a melhor solução para o Algoritmo Genético, foi apresentado na Tabela 3:

Tabela 3: Dados de entrada para 5 soluções para o caso 1

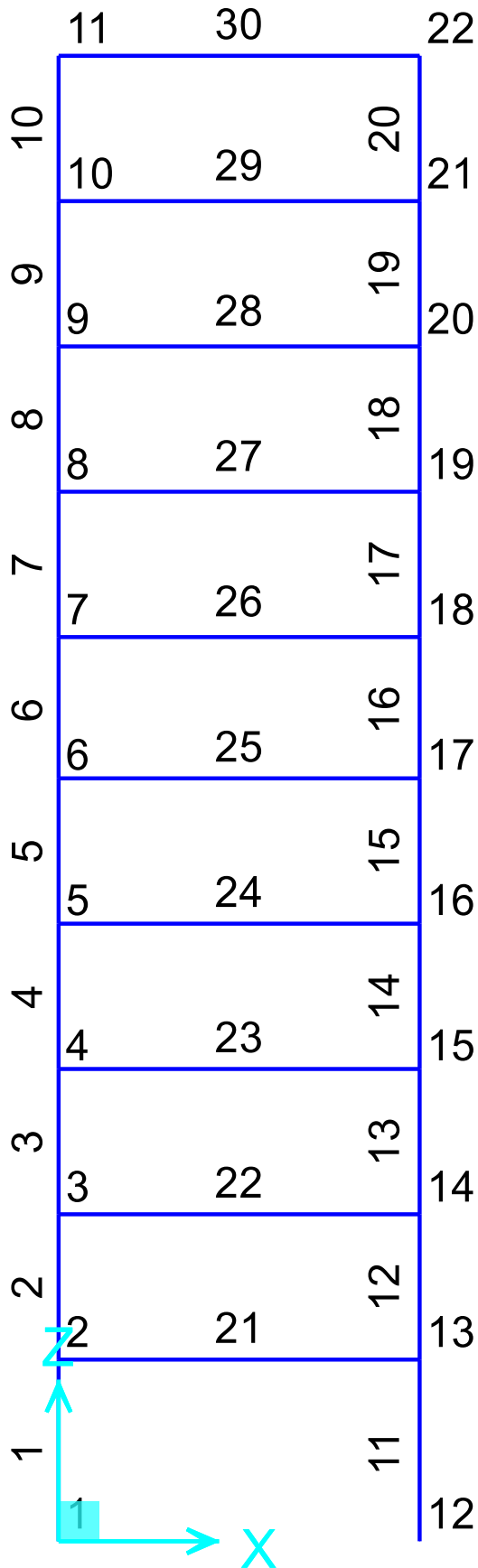
SOL.	Nº DE INDIV	Nº DE GERAÇÕES	ELITE	CP	LF	Y1	Y2	ESCALA
1	200	300	0	0.8	2000	1	1	2
2	300	300	1	0.8	2000	1	1	10
3	300	400	1	0.8	2000	1	1	2
4	300	400	0	0.8	2000	1	1	10
5	300	600	0	0.8	2000	1	1	10

Fonte: Autor

3.4.2 Caso 2

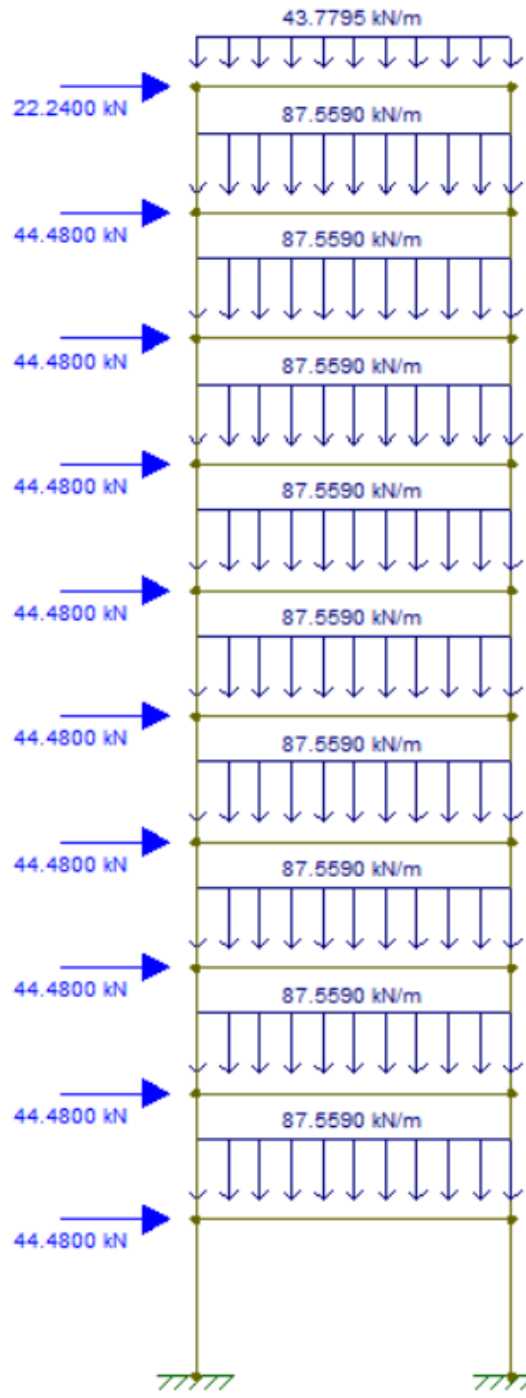
Para o caso 02, temos a Figura 38 informando nomenclatura de cada nó e barra utilizado tanto no SAP200 quanto no AG. O catálogo utilizado foi o da norma americana AISC, que oferece perfis robustos capaz de suprir as demandas requeridas.

Figura 38: Nomenclatura das barras e dos nós do Caso 02



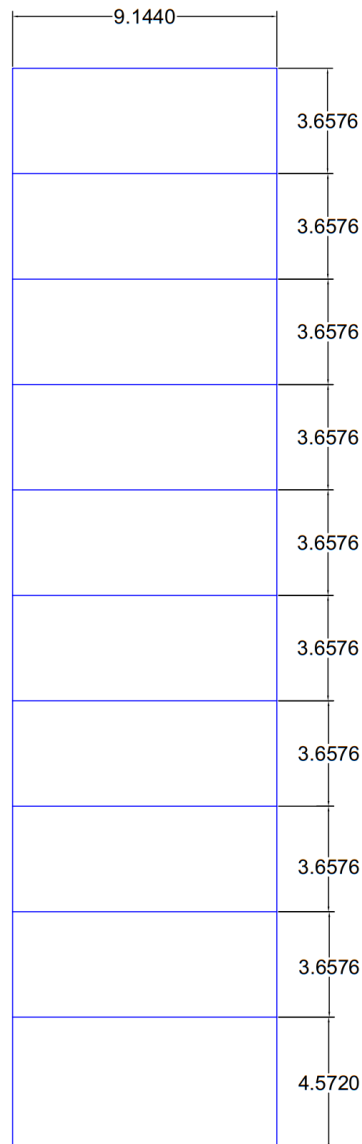
Para o Caso 2, a Figura 39 ilustra as forças convertidas para a unidade do SI, a fim de inseri-las no SAP2000 e no Algoritmo Genético.

Figura 39: Pórtico plano do Caso 02 com cargas em unidade do SI.



Fonte: Autor

Figura 40: Cotas do caso 2.



Fonte: Autor

3.4.2.1 Dimensionamento SAP2000

O dimensionamento utilizando o SAP2000 no caso 02 ocorreu de forma semelhante ao caso 01, aplicando suas propriedades específicas e o catálogo da AISC.

3.4.2.2 Dimensionamento Algoritmos Genéticos

Para o Caso 02, as soluções obtidas pelo Algoritmo Genético foram apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Dados de entrada para 5 soluções do caso 02

SOL.	Nº DE INDIV	Nº DE GERAÇÕES	ELITE	CP	LF	Y1	Y2	ESCALA
1	200	300	0	0.7	2000	200	100	2
2	200	300	1	0.7	2000	200	100	2
3	300	600	0	0.7	2000	200	100	2
4	300	600	1	0.7	2000	200	100	2
5	200	300	0	0.7	2000	1	1	2

Fonte: Autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CASOS

O objetivo principal deste trabalho buscar uma solução ótima através do Algoritmo Genético, com essa solução, dimensionar a estrutura no SAP200, para a busca desta solução ótima é necessário considerar várias soluções com parâmetros diferente, essas soluções estão apresentadas nas Tabelas 5 e 6.

4.1.1 Caso 01

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos para as soluções do caso 2.

Tabela 5: Resultados das soluções do caso 1.

SOL.	MELHOR SOLUÇÃO			γ1	γ2
	GERAÇÃO	INDIVÍDUO	MASSA		
1	296	98	14899,5	1	1
2	292	62	13618,3	1	1
3	400	105	11948,5	1	1
4	340	171	16989,5	1	1
5	397	84	16063,1	1	1

Fonte: Autor

Como base nos valores obtidos na Tabela 5 e na análise dos resultados dos arquivos de saída, percebemos a solução 3 obteve o menor valor de massa, mas o fator de segurança da barra 2 não está de acordo com o exigido na NBR 8800:2008 como demonstrado na Figura 41.

Figura 41: Resultado da solução 2 do caso 1

```
#####
MELHOR SOLUÇÃO
#####
GERAÇÃO: 251 | INDIVÍDUO: 249 | APTIDÃO: 0.071399
=====
```

Elemento	Perfil	Decimal(cm²)	Área(cm²)	FSt	FSd	Penalidade	Massa(kg)
1	131 W530X182	233.0465	232.0	0.8223	0.9973	0.0316	554.7
2	42 W410X53.0	69.0616	68.4	1.4544	0.9973	1.4544	161.5
3	141 W310X202	261.4805	257.0	0.7760	0.8740	0.0660	615.7
4	105 W530X138	176.3904	176.0	0.7749	0.9786	0.0511	420.6
5	95 W360X122	155.8989	155.0	0.3064	0.9786	0.4816	371.9
6	26 W150X37.1	47.4052	47.4	0.8180	0.7355	0.1031	113.1
7	246 W690X500	642.9824	640.0	0.2931	0.9014	0.5095	1524.0
8	79 W310X97.0	121.3228	123.0	0.5394	0.9937	0.2121	295.7
9	229 W1000X438	556.1980	556.0	0.7367	0.9937	0.0694	1335.0
10	139 W360X196	250.0963	250.0	0.2978	0.3463	0.9205	2150.7
11	121 W360X162	205.9893	206.0	0.1426	0.1466	1.4633	1777.6
12	79 W310X97.0	121.9582	123.0	0.5615	0.3035	0.6774	1064.4
13	32 W310X44.5	56.7772	56.7	0.8428	0.3398	0.4606	488.3
14	5 W150X18.0	23.2601	22.9	0.2919	0.3450	0.9304	197.5
15	65 W250X80.0	102.4198	102.0	0.7853	0.2554	0.6005	877.8
TOTAL =						8.0315	11948.5

```
-----
```

Fonte: Autor

Portanto, a solução 2 se torna a melhor solução, observamos também que a partir dela, mesmo aumentando a quantidade de indivíduos iniciais, o valor da massa não diminui. É importante salientar, que com exceção da solução 2, todas as outras tiveram valores de FSt e FSd menores que 1, portanto, está de acordo com o exigido pela NBR 8800:2008 e não há a necessidade de alterar os coeficientes para aumentar a penalidade dos elementos.

A Figura 42 exibe os valores do melhor indivíduo da solução 2, apresentando todos os valores de FSt, FSd, penalidade total, geração, indivíduo, identificação do elemento, o perfil obtido, valor da área, aptidão, massa individual e total. Isso indica que essa é uma configuração viável para o pórtico plano em questão, pois os fatores de segurança estão abaixo de 1.

Figura 42: Valores do melhor indivíduo da solução 2.

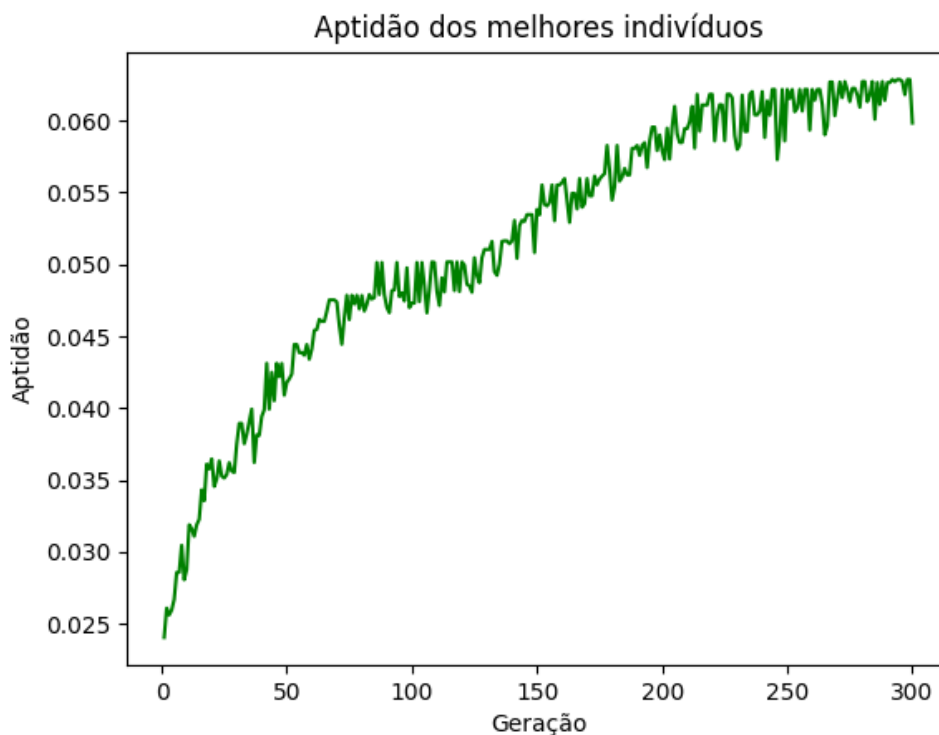
```
#####
                        M E L H O R   S O L U Ç Ã O
#####
                GERAÇÃO: 292      |      INDIVÍDUO: 62      |      APTIDÃO: 0.062863
=====
```

Elemento	Perfil	Decimal(cm ²)	Área(cm ²)	FSt	FSd	Penalidade	Massa(kg)	
1	100 W310X129	166.2241	165.0	0.2371	0.7953	0.6239	393.2	
2	135 W460X193	247.6606	247.0	0.5412	0.7953	0.2524	588.3	
3	141 W310X202	255.1794	257.0	0.7693	0.9726	0.0540	615.7	
4	130 W360X179	228.1222	228.0	0.3976	0.8058	0.4006	545.6	
5	70 W410X85.0	108.5620	108.0	0.5014	0.8058	0.2863	259.1	
6	25 W200X35.9	45.7108	45.7	0.7495	0.8600	0.0823	109.4	
7	109 W460X144	184.5447	184.0	0.6901	0.9611	0.0976	438.9	
8	157 W610X241	310.8824	308.0	0.7052	0.9799	0.0873	734.6	
9	266 W920X725	934.5230	923.0	0.1965	0.9799	0.6460	2209.8	
10	225 W360X421	538.4069	537.0	0.1306	0.2798	1.2745	4619.5	
11	25 W200X35.9	44.3870	45.7	0.0571	0.2598	1.4371	393.9	
12	87 W310X107	136.7312	136.0	0.4638	0.3377	0.7262	1174.1	
13	30 W360X39.0	51.1116	49.6	0.0888	0.3337	1.2742	427.9	
14	3 W200X15.0	18.6535	19.1	0.0559	0.3402	1.3266	164.6	
15	72 W200X86.0	111.1035	110.0	0.8064	0.2986	0.5294	943.7	
TOTAL						=	9.0984	13618.3

Fonte: Autor

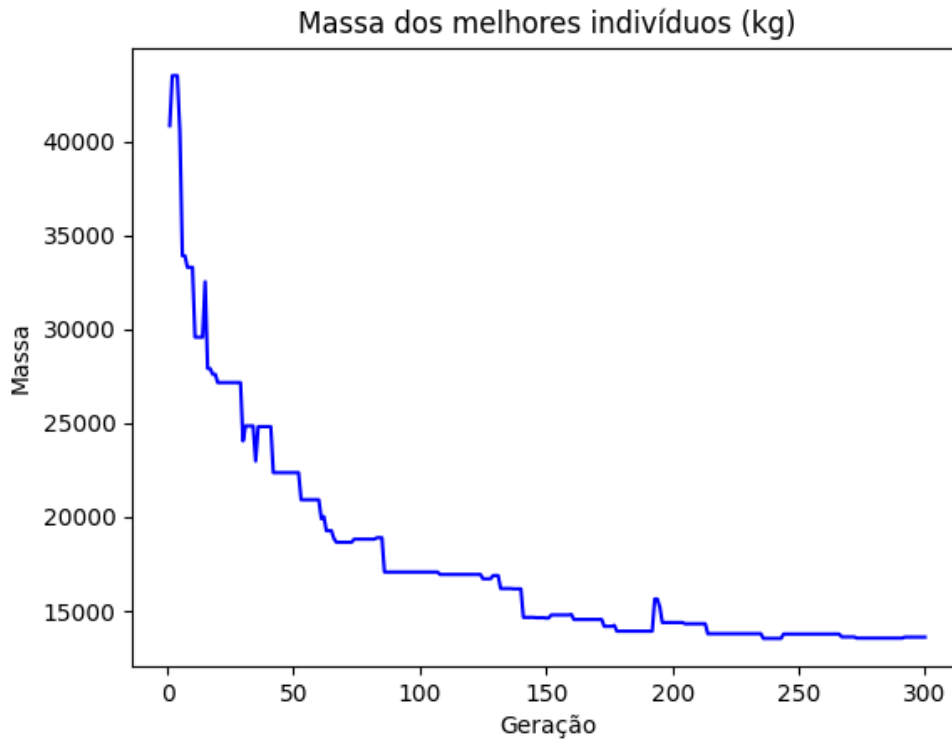
O gráfico da evolução da aptidão e a massa ao longo de toda a solução, é demonstrada nas Figuras 43 e 44, respectivamente.

Figura 43: Aptidão dos melhores indivíduos



Fonte: Autor

Figura 44: Massa dos melhores indivíduos

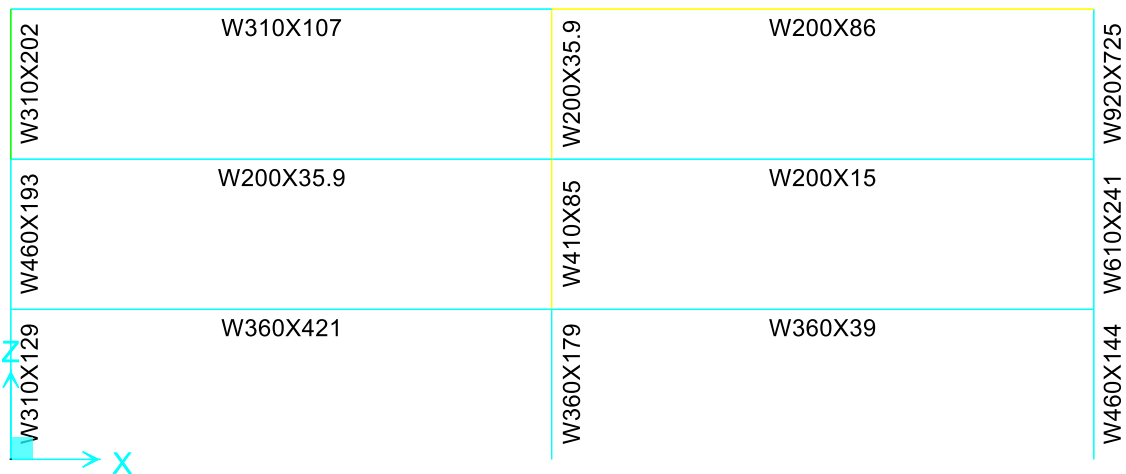


Fonte: Autor

As Figuras 43 e 44 fornecem uma clara visualização do comportamento da aptidão e da massa ao longo de cada geração, e esse comportamento está de acordo com o esperado. Observa-se que a aptidão aumenta progressivamente a cada geração, até atingir um estágio de estabilidade relativa. Por outro lado, a massa diminui gradualmente a cada geração, também chegando a um ponto de estabilização relativa. Esses padrões são consistentes com as expectativas de melhoria da aptidão e redução da massa conforme o algoritmo genético evolui.

A Figura 45, demonstra os perfis da solução 2 do caso 01 no SAP2000.

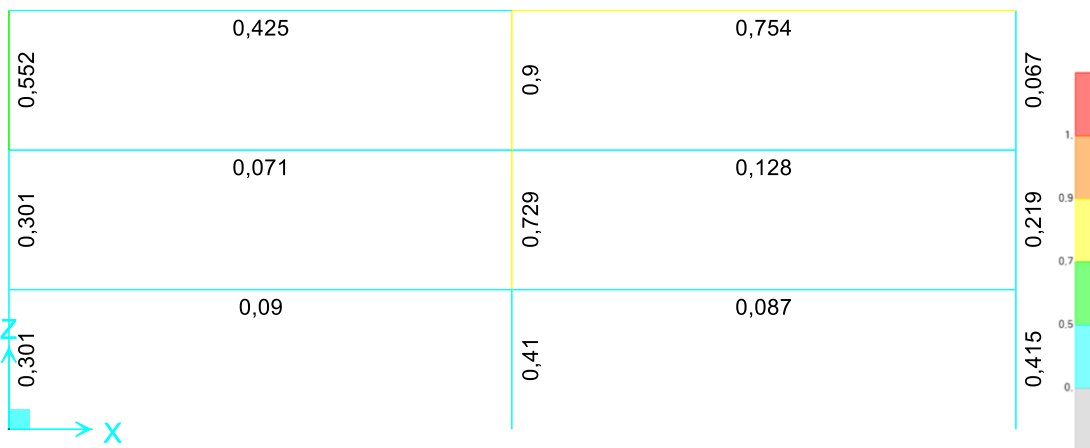
Figura 45: Perfis da solução 2 do caso 1.



Fonte: Autor

Já a Figura 46, representa os valores da flexo-compressão obtido pelo Software.

Figura 46: Resultados da flexo-compressão das barras para o Caso 01.



Fonte: Autor

4.1.1.1 Inserindo os perfis obtidos no AG no SAP2000 no caso 1

Com posse dos resultados do AG e do software, e com base nas Figuras 42 e 46, observamos que as capacidades de demanda nos dois casos não são compatíveis, sendo assim, os resultados obtidos pelo AG do caso 1 não são confiáveis. Considerando que o objetivo do trabalho é buscar uma solução ótima para o SAP2000, observamos que em algumas barras a capacidade de demanda está próxima de 0, deixando assim, a barra com um perfil mais pesado do que o ideal, deixando a estrutura mais pesada e conseqüentemente mais cara.

Existem várias possibilidades para esses resultados, e uma delas está relacionada às diferentes metodologias utilizadas para determinar o momento solicitante máximo. Enquanto o SAP2000 calcula o momento solicitante considerando toda a extensão da barra e selecionando o valor máximo, o AG, que é um método que leva em conta as cargas nodais, utiliza os momentos solicitantes em cada nó e utiliza a Equação (76) do item 2.3.5 para calcular o momento máximo. No entanto, esse método pode não ser tão preciso quanto o utilizado no SAP2000.

Ao investigar essa possibilidade, observamos que os momentos solicitantes em cada caso realmente diferem em torno de 5% a 15%.

4.1.2 Caso 02

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos nas soluções do caso 2.

Tabela 6: Resultados das soluções do caso 2.

SOL.	MELHOR SOLUÇÃO		
	GERAÇÃO	INDIVÍDUO	MASSA
1	288	51	105200,1
2	292	173	101270,7
3	524	2	89586,5
4	509	86	100905,9
5	291	163	48687,2

Fonte: Autor

Com base nos valores obtidos na Tabela 6 e na análise dos resultados, percebemos que a solução 3 obteve o menor valor de massa e obteve todos os fatores de segurança abaixo de 1, como requerido pela NBR 8800:2008, como demonstrado na figura 46. As figuras 47 e 48 representa os gráficos da aptidão dos melhores indivíduos e da massa dos melhores indivíduos, respectivamente.

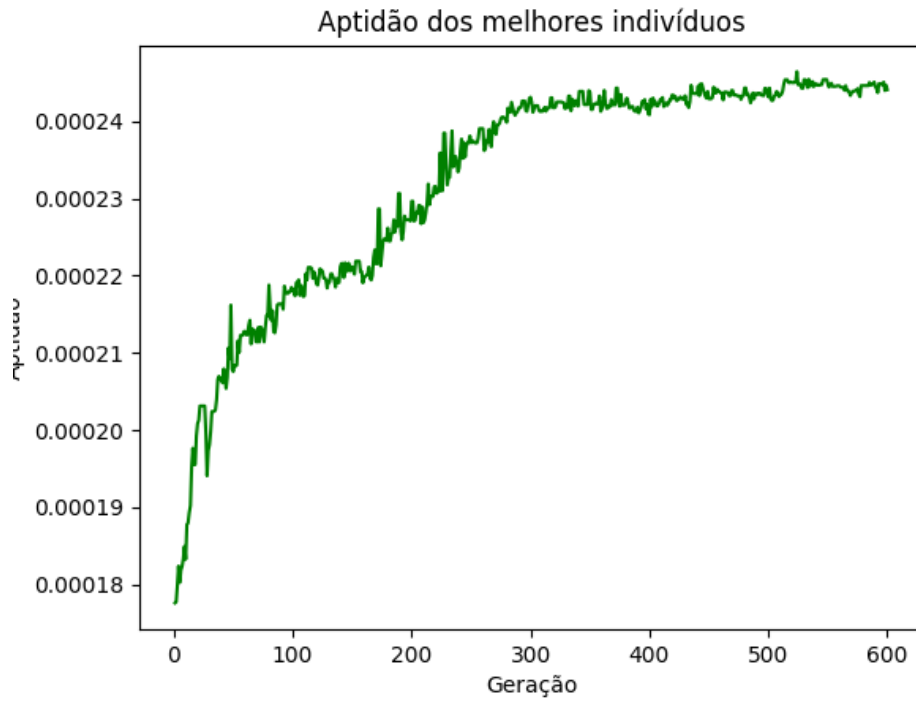
Figura 47: Solução 3 do caso 2

```
#####
MELHOR SOLUÇÃO
#####
GERAÇÃO: 524 | INDIVÍDUO: 02 | APTIDÃO: 0.000246
=====
```

Elemento	Perfil	Decimal(cm²)	Área(cm²)	FSt	FSd	Penalidade	Massa(kg)	
1	278 W360X1086	1409.5869	1390.0	0.1146	0.3263	1.2378	4983.5	
2	94 W310X117	149.2802	150.0	0.8283	0.8657	0.0475	427.9	
3	99 W460X128	161.2998	163.0	0.9376	0.9423	0.0072	468.2	
4	279 W920X1194	1509.2911	1520.0	0.0645	0.9601	0.8768	4352.5	
5	278 W360X1086	1393.8609	1390.0	0.0365	0.9649	0.9295	3986.8	
6	187 W460X315	402.5382	402.0	0.1191	0.9649	0.7772	1152.1	
7	207 W310X375	479.6858	478.0	0.1668	0.9067	0.7029	1371.6	
8	279 W920X1194	1474.1325	1520.0	0.0459	0.9304	0.9152	4352.5	
9	141 W310X202	255.2853	257.0	0.3754	0.9657	0.3913	738.8	
10	81 W200X100	127.4120	127.0	0.8500	0.9967	0.0225	365.8	
11	278 W360X1086	1429.8137	1390.0	0.1728	0.3410	1.1185	4983.5	
12	273 W360X900	1166.5482	1150.0	0.1994	0.8685	0.6583	3291.8	
13	272 W1000X883	1104.1736	1120.0	0.1716	0.9317	0.6909	3229.7	
14	171 W310X283	353.6657	361.0	0.3850	0.9706	0.3791	1035.1	
15	271 W360X818	1040.6870	1050.0	0.1406	0.9706	0.7394	2991.9	
16	256 W840X576	734.3735	735.0	0.1177	0.9638	0.7798	2106.8	
17	281 W920X1269	1618.4202	1620.0	0.0575	0.8788	0.9031	4645.2	
18	57 W200X71.0	89.9237	91.0	0.9166	0.9988	0.0070	259.7	
19	141 W310X202	258.6212	257.0	0.4967	0.9988	0.2533	738.8	
20	70 W410X85.0	107.7677	108.0	0.7182	0.8810	0.0935	310.9	
21	150 W920X223	286.6845	286.0	0.1886	0.2131	1.2776	2039.1	
22	147 W530X219	279.1127	279.0	0.1761	0.4342	0.9989	2002.5	
23	281 W920X1269	1618.5791	1620.0	0.0665	0.4712	1.1512	11612.9	
24	269 W920X787	989.1670	1010.0	0.0509	0.4853	1.1657	7196.3	
25	266 W920X725	916.2554	923.0	0.0428	0.4824	1.1841	6629.4	
26	238 W1000X483	613.8601	615.0	0.0405	0.4394	1.2350	4416.6	
27	268 W1000X748	964.2807	955.0	0.0900	0.4533	1.1269	6839.7	
28	87 W310X107	137.4195	136.0	0.1422	0.4994	0.9865	978.4	
29	141 W310X202	257.7210	257.0	0.0864	0.4828	1.1022	1847.1	
30	15 W250X25.3	32.3145	32.2	0.6653	0.4983	0.3637	231.3	
TOTAL						=	22.1225	89586.5

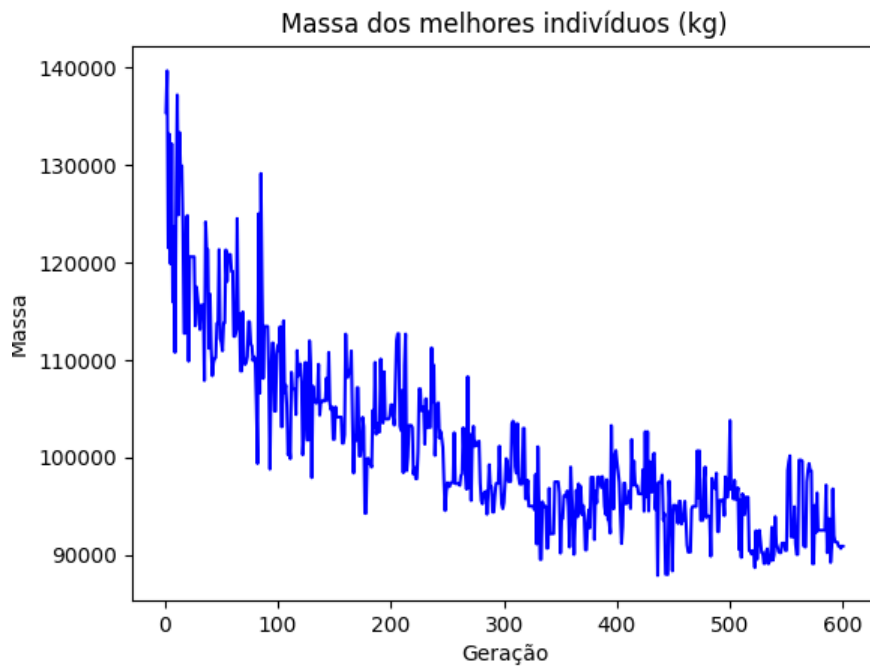
Fonte: Autor

Figura 48: Aptidão dos melhores indivíduos da solução 3 do caso 2



Fonte: Autor

Figura 49: Massa dos melhores indivíduos da solução 3 do caso 2



Fonte: Autor

Assim como no caso 1, as Figuras 48 e 49 demonstra que os gráficos apresentados nas Figuras 48 e 49 apresentam um comportamento como o esperado, onde a aptidão

aumenta ao longo das gerações até chegar a uma estabilidade, enquanto o valor da massa cai ao longo as gerações

A solução 5 foi a única com os coeficientes de penalidade igual a 1, e ao analisar os resultados da melhor solução, obteve fatores de segurança acima de 1, como demonstrado na figura 49, por isso, decidiu aumentar os coeficientes nos outros casos. A solução 2, mesmo com os coeficientes de penalidade aplicados obteve os fatores de segurança acima de 1, provavelmente pelo fato que o número de indivíduos iniciais e número de gerações serem insuficientes.

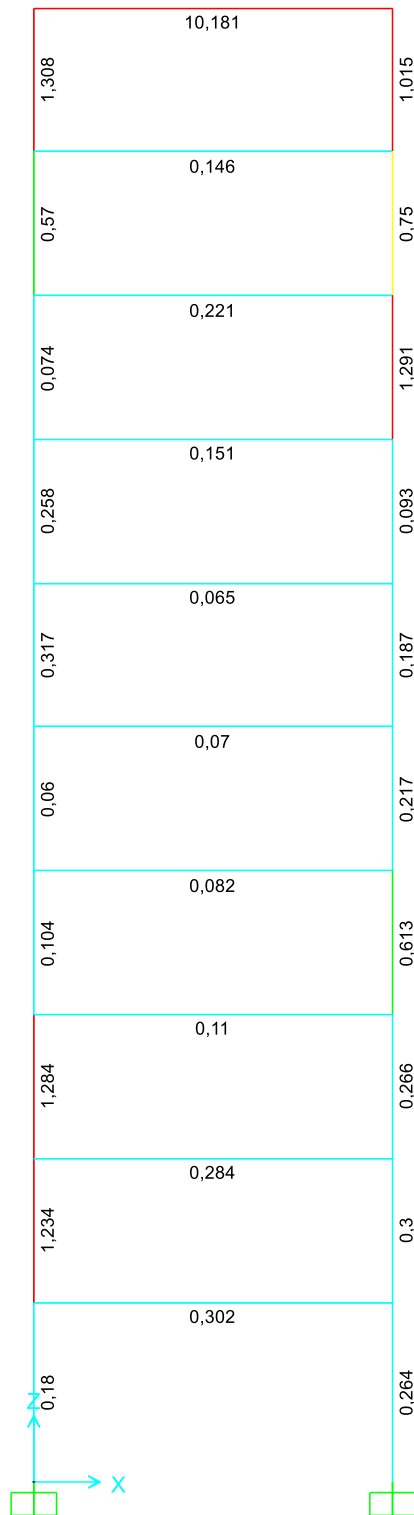
Figura 50: Resultados da solução 5 do caso 2.

```
#####
                                M E L H O R   S O L U Ç Ã O
#####
                GERAÇÃO: 291      |      INDIVÍDUO: 163      |      APTIDÃO: 0.019724
=====
```

Elemento	Perfil	Decimal(cm ²)	Área(cm ²)	FSt	FSd	Penalidade	Massa(kg)	
1	266 W920X725	908.6836	923.0	0.1741	0.2455	1.2515	3314.7	
2	191 W530X332	430.8133	429.0	0.2280	0.6363	0.7283	1214.3	
3	70 W410X85.0	108.8267	108.0	0.8511	0.9274	0.0274	310.9	
4	141 W310X202	260.2097	257.0	0.3474	0.9636	0.4272	738.8	
5	141 W310X202	257.7740	257.0	0.3143	0.9932	0.4702	738.8	
6	74 W250X89.0	113.4863	114.0	0.8494	1.2757	1.2984	325.5	
7	81 W200X100	126.7237	127.0	0.7283	1.4775	1.5514	365.8	
8	74 W250X89.0	113.9628	114.0	0.7734	1.6429	1.6943	325.5	
9	101 W250X131	168.3950	168.0	0.6488	1.7119	1.8353	479.1	
10	65 W250X80.0	102.3669	102.0	0.7590	1.7496	1.8076	292.6	
11	267 W360X744	945.8013	948.0	0.1849	0.2680	1.2002	3401.6	
12	240 W760X484	617.0371	619.0	0.3369	0.6323	0.5749	1770.3	
13	201 W690X350	453.1581	448.0	0.4570	0.9244	0.3006	1280.2	
14	269 W920X787	1018.8717	1010.0	0.1174	0.9615	0.7804	2878.5	
15	241 W920X491	622.2791	625.0	0.1637	0.9615	0.7009	1795.9	
16	205 W610X372	473.5437	474.0	0.2252	0.9404	0.6038	1360.6	
17	211 W690X384	493.2409	491.0	0.1627	0.8784	0.7158	1404.5	
18	201 W690X350	451.1460	448.0	0.1343	0.7400	0.8170	1280.2	
19	139 W360X196	250.8905	250.0	0.4145	0.7898	0.3870	716.9	
20	87 W310X107	136.7312	136.0	0.6057	0.8204	0.1877	391.4	
21	168 W1000X272	344.7172	344.0	0.1448	0.1675	1.4245	2487.2	
22	217 W1000X412	516.4328	526.0	0.1058	0.3181	1.2646	3767.3	
23	178 W1000X296	375.3751	379.0	0.1295	0.4637	1.0454	2706.6	
24	266 W920X725	901.1647	923.0	0.0531	0.4818	1.1651	6629.4	
25	202 W840X359	457.8176	459.0	0.1056	0.4966	1.0533	3282.7	
26	133 W690X192	242.2068	244.0	0.2222	0.6379	0.7362	1755.6	
27	132 W760X185	234.1585	235.0	0.1927	0.7388	0.7200	1691.6	
28	85 W610X101	131.7539	130.0	0.2622	0.8215	0.5763	923.5	
29	43 W360X57.8	72.1856	72.3	0.3012	0.8559	0.5091	528.5	
30	43 W360X57.8	70.4382	72.3	0.3028	0.8748	0.5017	528.5	
TOTAL						=	26.3559	48687.2

Fonte: Autor

Figura 52: Capacidade de demanda dos perfis da solução 3 do caso 2.



Fonte: Autor

Com base nas Figuras 51 e 52, observamos que os perfis da solução 3 do caso 2, não obedece a capacidade de demanda, portanto, essa é uma solução que não atende à norma AISC, assim como no caso 1, a solução do AG não está coerente com os valores obtidos pelo SAP2000.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, podemos afirmar que o código em algoritmo genético apresenta inconsistências, tanto para o caso 1 quanto para o caso 2, os perfis obtidos não têm os coeficientes de demanda de acordo com o SAP2000, e para o caso 2, os valores superam a capacidade de demanda mínima para a AISC. existem algumas possibilidades para ter ocorrido esses resultados. Primeiramente, o momento solicitante considerado no AG é diferente do software, pois, como o AG utiliza apenas cargas nodais, é necessário fazer uma consideração para calcular o momento máximo da barra, para esse trabalho, utilizou a Equação (67) do item 2.3.5, que não é uma forma precisa como os momentos máximos considerados no SAP2000, já que este utiliza o método de elementos finitos.

Outra possibilidade que pode aumentar a diferença, é que, como o AG utilizou como base o dimensionamento proposto pela NBR8800:2008, e o SAP2000 utiliza a norma americana AISC, portanto, é esperado obter diferentes resultados, já que, apesar de ser parecidas, a norma americana é atualizada com mais frequência, e a norma brasileira não foi atualizada desde 2008.

Os resultados obtidos pelo AG estão de acordo com a teoria, quando observamos os comportamentos dos gráficos de aptidão, massa e o desenvolvimento dos indivíduos ao longo das gerações.

Uma sugestão seria utilizar a norma AISC como base do dimensionamento dos esforços internos. Para obter valores mais consistentes, outra importante mudança, seria limitar a utilização do AG apenas para casos em que não possui cargas distribuídas ao longo das barras, apenas cargas nodais.

REFERÊNCIAS

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

ANSI/AISC 360-16. **Specification for Structural Steel Buildings**. Chicago, 2016.

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

BARRETO, Áleson Miranda. **Otimização Estrutural de Pórticos Planos Metálicos Via Algoritmos Genéticos**. Orientador: Pedro Claudio dos Santos Vieira. 2019. 96 f. TCC (Graduação) – Engenharia Civil, Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras. 2019.

BERNADINHO, 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.

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

COLEY, David Alexander. **An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers**. Singapore: World Scientific. 1999.

COMPUTERS & STRUCTURES, INC. **Analysis Reference Manual**, Novembro 2017, 569 p.

COUTINHO, K. D. **Método de Otimização Topológica em Estruturas Tridimensionais**. 2006. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

DEGERTEKIN, S. O. Optimum design of steel frames using harmony search algorithm, **Structural and multidisciplinary optimization**, v. 30, n 34, p. 393-401, Springer-Verlag, 2008

E. Oñate, **Structural Analysis with the Finite Element Method**. Linear Statics. Volume 1. Basis and Solids, 2009.

EDMUNGO, Douglas, A. et al. **Teoria das Estruturas**. Porto Alegre, SAGAH, 2018

FONSECA, Marcelo da. **Otimização de estruturas treliçadas planas e espaciais sob carregamentos estáticos e dinâmicos, usando algoritmos genéticos e redes neurais**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

GOLDMAN, Pedrinho. **Introdução ao planejamento e controle de custos na construção civil brasileira**. São Paulo: Pini, 2004. 175 p.

GUANABARA, Matheus Kerkhoff. **Dimensionamento de estruturas metálicas: Rotina computacional para seleção de perfis metálicos**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

LEMONGE, A. 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 Implementação**. 3. ed. Ciência Moderna, 2005.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**, 3 ed. Ciência Moderna, 2012.

LOPEZ, R. H.; MIGUEL, L. F. F. **Introdução a Otimização Estrutural**. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2013.

MAIA, J. P. R. **Otimização Estrutural: Estudo Aplicações em Problemas Clássicos de Vigas Utilizando a Ferramenta Solver**. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

MARTHA, Luiz F. **Análise de Estruturas: Conceitos e Métodos Básicos**. Rio de Janeiro, Grupo GEN, 2022. *E-book*. ISBN 9788521638216. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521638216/>. Acesso em: 10 jul. 2023.

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.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Aço - Dimensionamento Prático**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2021. *E-book*. ISBN 9788521637974. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637974/>. Acesso em: 10 jul. 2023.

PINHEIRO, Líbano M.; et. al. **Estruturas de concreto**. Departamento Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

RABELO, Yopanan Conrado Pereira. **Bases para projetos estruturais na arquitetura**. São Paulo: Zigurate Editora, 1949. 285 p.

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

RESENDE, Claudio Horta Barbosa de. **Otimização estrutural de pórticos espaciais de aço via algoritmos de evolução diferencial**. 2020. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2020.

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.

SOUZA, A. S. C. De. **Dimensionamento de Elementos Estruturais em Aço Segundo a NBR8800:2008**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2009.

SÜSSEKIND, J. C. **Curso de Análise Estrutural – Vol. 3: Método das Deformações e Processo de Cross**, Editora Globo, Porto Alegre, 1987.

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

TAVES, G. G. **Engenharia de Custos Aplicada à Construção Civil**. 2014. (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

APÊNDICE A – Dados de Entrada

```

-----
                                DADOS DE ENTRADA
-----
                                PROPRIEDADES DO ALGORITMO GENÉTICO
-----
PSIZE  NUNKNO  SUBLN  MAXG  CP    SCALE  ELITE  LF    E    fy    fu
400    15     8     400   0.8   10     0     2000 20000 34.5 45.0
-----
PROPRIEDADES DO EXEMPLO
-----
NN  NE  NDF  MS  NNE  NL  NC  CAT
12  15  3   150 2   18  6   1
  NÓ      X      Y
  1      0.000000  0.000000
  2      0.000000  304.8000
  3      0.000000  609.6000
  4      0.000000  914.4000
  5      1097.2800  000.0000
  6      1097.2800  304.8000
  7      1097.2800  609.6000
  8      1097.2800  914.4000
  9      2194.5600  000.0000
 10      2194.5600  304.8000
 11      2194.5600  609.6000
 12      2194.5600  914.4000
ELEM  NO I    NO F  IRZ
  1    1    2    11
  2    2    3    11
  3    3    4    11
  4    5    6    11
  5    6    7    11
  6    7    8    11
  7    9   10    11
  8   10   11    11
  9   11   12    11
 10    2    6    11
 11    3    7    11
 12    4    8    11
 13    6   10    11
 14    7   11    11
 15    8   12    11
CARGA  NÓ      DIR.  VALOR
  1     2     1     22.240000
  2     2     2    -224.179400
  3     2     3   -40997.8921
  4     3     1     22.240000
  5     3     2   -224.179400
  6     3     3   -40997.9000
  7     4     1     11.120000
  8     4     2   -224.179400
  9     4     3   -40997.9000
 10     6     2   -448.358400
 11     7     2   -448.358400
 12     8     2   -448.358400
 13    10     2   -224.179400
 14    10     3    40997.9000
 15    11     2   -224.179400

```

16	11	3	40997.9000		
17	12	2	-224.179400		
18	12	3	40997.9000		
COND.	NÓ	DIR.	VALOR		
1	1	1	0		
2	1	2	0		
3	5	1	0		
4	5	2	0		
5	9	1	0		
6	9	2	0		
NUM.	AR.	E	IZ	Tipo	ORIENTAÇÃO
1	0.00277	20000	0.000191	PILAR	2
2	0.00277	20000	0.000191	PILAR	2
3	0.00277	20000	0.000191	PILAR	2
4	0.00277	20000	0.000191	PILAR	2
5	0.00277	20000	0.000191	PILAR	2
6	0.00277	20000	0.000191	PILAR	2
7	0.00277	20000	0.000191	PILAR	2
8	0.00277	20000	0.000191	PILAR	2
9	0.00277	20000	0.000191	PILAR	2
10	0.00277	20000	0.000191	VIGA	1
11	0.00277	20000	0.000191	VIGA	1
12	0.00277	20000	0.000191	VIGA	1
13	0.00277	20000	0.000191	VIGA	1
14	0.00277	20000	0.000191	VIGA	1
15	0.00277	20000	0.000191	VIGA	1

Fonte: Autor

APÊNDICE B - Código

Link e QR Code para consulta aos códigos utilizados neste trabalho: [TCC - Yago Conegundes](#)

