



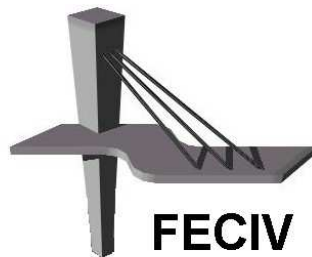
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Dissertação DE MESTRADO

Nº 0041

**OTIMIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE
TRELIÇAS PLANAS DE MADEIRA EMPREGANDO
O MÉTODO DOS ALGORITMOS GENÉTICOS**

LÍVIA MARIA PALÁCIO RIBEIRO



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Lívia Maria Palácio Ribeiro

**OTIMIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE TRELIÇAS
PLANAS DE MADEIRA EMPREGANDO O MÉTODO DOS
ALGORITMOS GENÉTICOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título **de Mestre em
Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Romero Gesualdo

Co-orientador: Prof. Dr. Dogmar Antonio de Souza Junior

Uberlândia, 15 de fevereiro de 2008

FICHA CATALOGRÁFICA

R484o Ribeiro, Livia Maria Palácio, 1980-

Otimização e dimensionamento de treliças planas de madeira empregando o método dos algoritmos genéticos / Livia Maria Palácio Ribeiro. - 2008.

103 f. : il.

Orientador: Francisco Antonio Romero Gesualdo.

Co-orientador: Dogmar Antonio de Souza Junior.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui bibliografia.

1. Estruturas de madeira (Construção civil) - Teses. 2. Algoritmos genéticos - Teses. I. Gesualdo, Francisco Antonio Romero. II. Souza Junior, Dogmar Antonio de. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624.011.1



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA Nº: 041/2008

CANDIDATA: Livia Maria Palácio Ribeiro

ORIENTADOR: Prof. Dr. Francisco Antonio Romero Gesualdo

TÍTULO: "Otimização e dimensionamento de treliças planas de madeira empregando o método dos algoritmos genéticos"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Estruturas e Construção Civil

LINHA DE PESQUISA: Estruturas

DATA DA DEFESA: 15 de fevereiro de 2008

LOCAL: Sala de Reuniões da FECIV

HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA: 9:15h - 10:45h

Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que a candidata foi:

☒ APROVADA

☐ REPROVADA

OBS: Os membros da banca sugerem que a versão final passe por uma revisão de alguns pontos em sua redação.

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:

Professor Orientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Romero Gesualdo – FECIV/UFU

Membro externo: Prof. Dr. Eduardo Chahud – Universidade FUMEC

Membro: Prof. Dr. Jesiel Cunha – FECIV/UFU

Uberlândia, 15 de fevereiro de 2008

Aos meus pais, Ildeu e Maria do Carmo (Cuca) que me ensinaram a confiar num Deus que eu não podia ver e a viver para um Salvador que nunca havia encontrado antes, crendo que meu futuro já preparou da melhor maneira. Aos meus irmãos Kátia e Kleber pelo carinho constante neste período importante da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que nunca me desamparou permitindo a conclusão de mais esse sonho. Mesmo quando pensei em desistir, sabia que poderia contar com sua presença constante me abençoando.

Ao meu orientador Prof. Dr. Francisco Antonio Romero Gesualdo pela dedicada orientação durante esses dois anos, e enorme carinho e atenção dispensados durante esse período.

Ao Prof. Dr. Dogmar Antonio de Souza Junior que contribuiu de maneira especial me co-orientando para o desenvolvimento deste trabalho

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Civil, que forneceram o apoio necessário à realização da pesquisa.

À minha tia Mércia que me acolheu esses dois anos em sua casa, dispensado carinho em todos os momentos difíceis me incentivando e apoiando. Amo muito a senhora.

À minha grande amiga Anne Danielle e seu esposo Gilberto que compartilharam comigo as alegrias e vitórias conquistadas, e pelo incentivo sempre presente.

Aos meus amigos e colegas do mestrado, em especial ao Ricardo Cruvinel, Kênia e Wanderli.

E ao Marcos que me suportou com paciência ajudando-me a superar meus medos, e me apoiando nos momentos decisivos.

Ribeiro, L. M P. Otimização e dimensionamento de treliças planas de madeira empregando o método dos algoritmos genéticos. 120p Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. 2008.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar informações sobre a otimização de estruturas planas de madeira do tipo treliçado utilizando o método dos algoritmos genéticos. Todas as avaliações são feitas por meio do programa computacional denominado Otimização de Estruturas Planas (OTP). Também foi usado o programa computacional GESTRUT para a determinação de esforços e deslocamentos em estruturas. São avaliadas estruturas do tipo telhado duas águas, com o objetivo de encontrar a melhor configuração geométrica em termos da distribuição de barras e a inclinação entre banzos. Foram avaliados três casos de estruturas treliçadas com diferentes configurações em relação ao comprimento/largura da área coberta.

Palavras-chave: Algoritmo genético, Estruturas de madeira, Otimização, Tesouras duas águas.

Ribeiro, L. M P. Optimization and dimensional of plane trusses of Wood, applying the genetic algorithms method. 120p Master dissertation, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlandia. 2008

ABSTRACT

The objective of this study is to present information on the optimization of plane truss wooden structure using the method of genetic algorithms. All assessments are made by the computer program called Optimization Structures Plane (OTP). It was also used the computer program GESTRUT for determining forces and displacement. It was evaluated pitched trusses, with the goal of finding the best geometrical configuration in terms of the distribution of members and inclination between chords. It was evaluated three study cases of trusses with different configurations in relation to the length/width of the area covered.

Keywords: Genetic algorithms, Wooden structure, Optimization, Pitched trusses

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

A	- Área da seção transversal
b	- Largura da seção transversal
C	- Comprimento da cobertura
E	- Módulo de elasticidade
$F(x)$	- Função aptidão
F_i	- Função aptidão do indivíduo
$f(x)$	- Função objetivo
f_{c0k}	- Resistência característica à compressão paralela às fibras
f_{v0k}	- Resistência característica ao cisalhamento na presença de tensões tangenciais paralelas às fibras
H	- Altura dos pilares
h	- Altura da seção transversal
L	- Largura da cobertura
l_i	- Comprimento entre montantes
M_z	- Momento em torno da direção Z
m	- Número de módulos na direção X
N	- Esforço normal de compressão
N_{pop}	- Tamanho da população
P_i	- Probabilidade de seleção do indivíduo
P_c	- Probabilidade de crossover
P_m	- Probabilidade de mutação
P_p	- Peso próprio
$pen(x)$	- Função penalidade
q_i	- Probabilidade acumulada
ra	- valor no rank

S_1	- Fator topográfico
S_2	- Fator associado a edificação e seu entorno
S_3	- Fator estatístico
sc	- Sobrecarga
V_i	- Volume de madeira consumido em cada modelo
V_1	- Volume de madeira consumido no modelo 1
W	- Carregamento devido a ação do vento
θ	- Ângulo de inclinação da treliça

ABREVIATURAS

<i>a.C</i>	Antes de Cristo
<i>d.C</i>	Depois de Cristo
<i>IND</i>	Índice de decodificação

SIGLAS

<i>AG</i>	- Algoritmo Genético
<i>CE</i>	- Computação Evolucionista
<i>EE</i>	- Estratégia Evolucionista
<i>PE</i>	- Programação Evolucionista
<i>OTP</i>	- Otimização de Estruturas Planas
<i>OTR</i>	- Otimização de Estruturas Reticuladas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Esquema comparativo entre projeto convencional e projeto ótimo.	2
Figura 1-2 – Trajetória das formigas em linha reta entre o ninho e o alimento.....	4
Figura 1-3 – Introdução do obstáculo no caminho original.....	4
Figura 1-4 – Divisão mediana das formigas nos dois sentidos.....	5
Figura 1-5 – O menor percurso é escolhido (ótimo) no decorrer do tempo.	5
Figura 2-1 – Habitação com cobertura em troncos de madeira.....	11
Figura 2-2 – Habitação com cobertura em pranchas de madeira.	12
Figura 2-3 – Habitações com coberturas côncavas.	12
Figura 2-4 – Seção transversal composta de madeira.....	13
Figura 2-5 – Estruturas de coberturas com barras encaixadas.....	14
Figura 2-6 – Estrutura de cobertura com barras inclinadas.	14
Figura 2-7 – Estrutura de cobertura posterior ao século IV d.C.....	15
Figura 2-8 – Estrutura de cobertura da Arquitetura Românica do séc. XV.....	16
Figura 3-1 – Procedimento de Algoritmos Evolucionistas.....	22
Figura 3-2 – Seleção pelo Método da Roleta.....	31
Figura 3-3 – Cruzamento <i>de um ponto</i>	32
Figura 3-4 – Cruzamento de multipontos	32
Figura 3-5 – Cruzamento de multipontos.	33
Figura 3-6 – Exemplo de mutação.....	33
Figura 4-1 – Exemplo de treliça com suas constantes e variáveis.....	41
Figura 4-2 – Tela principal do programa de otimização computacional – OTP.....	42
Figura 4-3 – Tela de entrada para a definição da ação do vento.....	45
Figura 4-4 – Tela de entrada do peso próprio das telhas e posição das terças.....	46
Figura 4-5 – Ilustração da tela “duas faces igualmente permeáveis”.	46
Figura 4-6 – Ilustração da tela de propriedades físicas da madeira.	47
Figura 4-7 – Carregamento da estrutura pela ação do peso próprio (pp) e sobrecarga (sc) ..	48
Figura 4-8 – Carregamento da estrutura pela ação do vento.	48

Figura 4-9 – Ilustração dos esforços.	48
Figura 4-10 – Fluxograma do algoritmo genético implementado.	53
Figura 5-1 – Primeiro caso – treliça Howe	57
Figura 5-2 – Segundo caso – treliça Pratt	57
Figura 5-3 – Terceiro caso – treliça Belga.....	58
Figura 5-4 – Resultados do aumento do volume de madeira (%) – Modelo 10×20	60
Figura 5-5 – Resultado do aumento do volume de madeira (%) – Modelo 12×20.....	61
Figura 5-6 – Resultado do aumento do volume de madeira (%) – Modelo 14×20.....	61
Figura 5-7 – Resultado do aumento do volume de madeira (%) – Modelo 15×20.....	61
Figura 5-8 – Índice de aproveitamento – Resistência.....	62
Figura 5-9 – Índice de aproveitamento – Estabilidade X.	63
Figura 5-10 – Índice de aproveitamento – Estabilidade Y.	63
Figura 5-11 – Aumento do volume de madeira (%) – Modelo 10×20.	65
Figura 5-12 – Aumento do volume de madeira (%) – Modelo 12×20.	66
Figura 5-13 – Aumento do volume de madeira (%) – Modelo 14×20.	66
Figura 5-14 – Aumento do volume de madeira (%) – Modelo 15×20.	66
Figura 5-15 – Índice de aproveitamento – Resistência.....	67
Figura 5-16 – Índice de aproveitamento – Estabilidade X.	68
Figura 5-17 – Índice de aproveitamento – Estabilidade Y.	68
Figura 5-18 – Aumento do volume de madeira (%) – Modelo 10×20.	71
Figura 5-19 – Aumento do volume de madeira (%) – Modelo 12×20.	71
Figura 5-20 – Aumento do volume de madeira (%) – Modelo 14×20.	71
Figura 5-21 – Aumento do volume de madeira (%) – Modelo 15×20.	72
Figura 5-22 – Índice de aproveitamento – Resistência.....	73
Figura 5-23 – Índice de aproveitamento – Estabilidade X	73
Figura 5-24 – Índice de aproveitamento – Estabilidade Y	74
Figura 5-25 – Variação do volume de madeira (%) – Modelo 10×20	76
Figura 5-26 – Variação do volume de madeira (%) – Modelo 12×20.....	78
Figura 5-27 – Variação do volume de madeira (%) – Modelo 14×20	79
Figura 5-28 – Variação do volume de madeira (%) – Modelo 15×20.....	80
Figura 5-29 – Índice de aproveitamento da resistência – Treliça Howe	81
Figura 5-30 – Índice de aproveitamento da resistência – Treliça Pratt	82
Figura 5-31 – Índice de aproveitamento da resistência – Treliça Belga.....	82

Figura 5-32 – Índice de aproveitamento da estabilidade X – Treliça Howe	83
Figura 5-33 – Índice de aproveitamento da estabilidade X – Treliça Pratt	83
Figura 5-34 – Índice de aproveitamento da estabilidade X – Treliça Belga.....	83
Figura 5-35 – Índice de aproveitamento da estabilidade Y – Treliça Howe	84
Figura 5-36 – Índice de aproveitamento da estabilidade Y – Treliça Pratt	84
Figura 5-37 – Índice de aproveitamento da estabilidade Y – Treliça Belga.....	84
Figura 5-38 – Disposição do valor do volume no modelo 10×20	86
Figura 5-39 – Disposição do valor do volume no modelo 12×20	86
Figura 5-40 – Disposição do valor do volume no modelo 14×20	87
Figura 5-41 – Disposição do valor do volume no modelo 15×20	88
Figura 5-42 – Deslocamento da estrutura – m=4.....	89
Figura 5-43 – Deslocamento da estrutura – m=5.....	89
Figura 5-44 – Deslocamento da estrutura quando as terças são definidas – m=4	89
Figura 5-45 – Deslocamento da estrutura quando as terças são definidas – m=5	89
Figura 5-46 – Estrutura real analisada	91
Figura 5-47 – Variação do volume de madeira.....	92
Figura 5-48 – Distribuição da função custo X geração	93
Figura 5-49 – Índice de aproveitamento da seção transversal	94
Figura 5-50 – Estrutura otimizada gerada pelo programa de otimização com m=6.....	95
Figura 5-51 – Estrutura otimizada com m=4.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1 – Trabalhos relevantes que utilizam o algoritmo genético na área de estruturas	5
Tabela 3-1 – Seleção Roleta.	30
Tabela 5-1 – Parâmetros geométricos e propriedades mecânicas dos materiais	55
Tabela 5-2 – Valores definidos para o carregamento da estrutura.....	56
Tabela 5-3 – Valores adotados para os parâmetros do AG.....	56
Tabela 5-4 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Howe	59
Tabela 5-5 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Howe	59
Tabela 5-6 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Howe	59
Tabela 5-7 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Howe	60
Tabela 5-8 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Pratt.....	64
Tabela 5-9 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Pratt.....	64
Tabela 5-10 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Pratt.....	64
Tabela 5-11 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Pratt.....	65
Tabela 5-12 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Belga	69
Tabela 5-13 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Belga	69
Tabela 5-14 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Belga	70
Tabela 5-15 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Belga	70
Tabela 5-16 – Posição no eixo x das terças definidas pelo usuário	75
Tabela 5-17 – Resultados da otimização de estruturas – Trelça Howe	75
Tabela 5-18 – Resultados da otimização de estruturas – Trelça Pratt	76
Tabela 5-19 – Resultados da otimização de estruturas – Trelça Belga	76
Tabela 5-20 – Resultados da otimização de estruturas – Trelça Howe	77
Tabela 5-21 – Resultados da otimização de estruturas – Trelça Pratt	77
Tabela 5-22 – Resultados da otimização de estruturas – Trelça Belga	77
Tabela 5-23 – Resultados da otimização de estruturas – Trelça Howe	78
Tabela 5-24 – Resultados da otimização de estruturas – Trelça Pratt	78

Tabela 5-25 – Resultados da otimização de estruturas – Treliça Belga	79
Tabela 5-26 – Resultados da otimização de estruturas – Treliça Howe	79
Tabela 5-27 – Resultados da otimização de estruturas – Treliça Pratt	80
Tabela 5-28 – Resultados da otimização de estruturas – Treliça Belga	80
Tabela 5-29 – Volume de madeira (m ³) para o modelo 10×20	85
Tabela 5-30 – Volume de madeira (m ³) para o modelo 12×20	86
Tabela 5-31 – Volume de madeira (m ³) para o modelo 14×20	87
Tabela 5-32 – Volume de madeira (m ³) para o modelo 15×20	87
Tabela 5-33 – Valores dos deslocamentos nodais (cm) – direção Y	90
Tabela 5-34 – Posição no eixo X das terças definidas na estrutura real.	92
Tabela 5-35 – Resultados obtidos na otimização do modelo 18×20	92
Tabela 5-36 – Comparação de resultados entre a estrutura real e otimizada.	96

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 PRELIMINARES.....	1
1.2 OBJETIVO.....	6
1.3 JUSTIFICATIVA.....	6
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	7
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS DO EMPREGO DAS ESTRUTURAS DE MADEIRA PARA COBERTURA.....	8
2.1.1 Preliminares.....	8
2.1.2 Resumo histórico da aplicação da madeira em estruturas para cobertura de edificações.....	10
2.2 OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS.....	16
2.3 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO.....	18
CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTOS DO ALGORITMO GENÉTICO	21
3.1 PRELIMINARES.....	21
3.2 ALGORITMO GENÉTICO.....	23
3.3 TERMINOLOGIA.....	24
3.4 REPRESENTAÇÃO OU CODIFICAÇÃO.....	25
3.4.1 Representação binária e real.....	25
3.5 POPULAÇÃO INICIAL.....	27
3.6 FUNÇÃO APTIDÃO.....	28
3.7 SELEÇÃO.....	29
3.8 OPERADORES GENÉTICOS.....	31
3.8.1 Operador Cruzamento (<i>crossover</i>).....	31
3.8.2 Operador mutação.....	33
3.9 CRITÉRIOS DE PARADA.....	34
3.10 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM OS AGs.....	34
3.11 TRATAMENTO DAS RESTRIÇÕES.....	35
3.12 FUNÇÃO PENALIDADE.....	36
3.13 VANTAGENS DO AGs.....	37
3.14 DESVANTAGENS DOS AGs.....	38
CAPÍTULO 4 – ALGORITMO GENÉTICO APLICADO A ESTRUTURAS PLANAS DE MADEIRA	39

4.1 VARIÁVEIS DE PROJETO	39
4.2 FUNÇÃO OBJETIVO	40
4.3 FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO GENÉTICO.....	41
CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE MODELOS ESTRUTURAIS PARA O DIMENSIONAMENTO DE TRELIÇAS DE MADEIRA	54
5.1 PRELIMINARES	54
5.2 VERIFICAÇÃO DO CONSUMO DE MADEIRA E ÍNDICE DE APROVEITAMENTO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DAS ESTRUTURAS SEM DEFINIR A POSIÇÃO DAS TERÇAS	57
5.2.1 Treliza Howe – verificação da análise dos resultados do aumento do volume de madeira	59
5.2.2 Verificação dos resultados do índice de aproveitamento das barras mais solicitadas fornecida pela iteração de n gerações – Treliza Howe	62
5.2.3 Treliza Pratt – verificação dos resultados do aumento do volume de madeira	64
5.2.4 Verificação dos resultados do índice de aproveitamento das barras mais solicitadas fornecida pela iteração de n gerações – Treliza Pratt	67
5.2.5 Treliza Belga – verificação dos resultados do aumento do volume de madeira	69
5.2.6 Verificação dos resultados do índice de aproveitamento das barras mais solicitadas fornecida pela iteração de n gerações – Treliza Belga	72
5.3 VERIFICAÇÃO DO CONSUMO DE MADEIRA E ÍNDICE DE APROVEITAMENTO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DAS ESTRUTURAS COM DEFINIÇÕES PARA POSIÇÕES DAS TERÇAS	74
5.3.1 Verificação dos resultados do aumento do volume de madeira para as três formas de treliza	75
5.3.2 Verificação dos índices de aproveitamento das barras mais solicitadas fornecida pela iteração de n gerações nas três formas de estrutura de treliza	81
5.4 AVALIAÇÃO DA COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS MODELOS ESTRUTURAIS ANALISADOS	85
5.4.1 Verificação dos resultados do deslocamento	88
5.5 AVALIAÇÃO E VERIFICAÇÃO DE CASO REAL DE TRELIÇA HOWE	91
5.5.1 Verificação dos resultados	91
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	97
REFERÊNCIAS.....	100

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 PRELIMINARES

A madeira tem sido utilizada como elemento estrutural na construção civil há milhares de anos, portanto, têm-se observado o surgimento de muitas variedades de sistemas estruturais devido à evolução dos diversos produtos provindos da madeira. Dentre os sistemas estruturais mais utilizados, o treliçado é tradicionalmente o mais empregado para estruturas de coberturas. O seu uso segue procedimentos convencionais baseados em hipóteses e considerações padronizadas estabelecidas no passado, quando as ferramentas de cálculo eram diferentes das atuais. O cálculo era totalmente manual, sem o uso de computadores. Essas condutas foram se consagrando com o passar do tempo. No entanto, hoje se têm muitos recursos facilitadores que exigem adaptações e redirecionamentos.

As análises de estruturas são feitas a partir do emprego dos métodos numéricos aliados ao crescente avanço dos processos utilizados em computadores e à enorme competitividade criada nas empresas para buscar uma redução nos custos de seus projetos, tendo se tornado, atualmente indispensável para qualquer especialista na área de engenharia das estruturas.

Os projetos são desenvolvidos para se obter estruturas que satisfaçam aos requisitos funcionais e que atendam as especificações da norma. Contudo, a maioria dos problemas de engenharia, tem mais que uma configuração possível para atender a essas exigências.

Projetar estruturas otimizadas é a função clássica do engenheiro. Ao idealizar projetos que sejam eficientes e econômicos são requeridos métodos computacionais de otimização que representem o problema analisado em função de suas variáveis de projeto simultaneamente e uma busca das melhores soluções, ou seja, soluções ótimas.

Rigo (1999) associa esse fato à evolução muito rápida dos computadores pessoais que tem servido de motivação para pesquisas de novas metodologias empregadas em projetos estruturais e, em particular, o emprego e desenvolvimento de algoritmos numéricos mais robustos e eficientes com vistas à obtenção de esforços em uma estrutura.

Baseando-se nas facilidades computacionais atuais, uma das técnicas importantes no cálculo e dimensionamento é a da otimização de parâmetros elásticos e geométricos. Para se ter um melhor entendimento sobre otimização de estruturas, deve-se ressaltar as diferenças básicas entre um projeto convencional e um projeto ótimo. A Figura 1-1 mostra de forma esquemática essas diferenças.

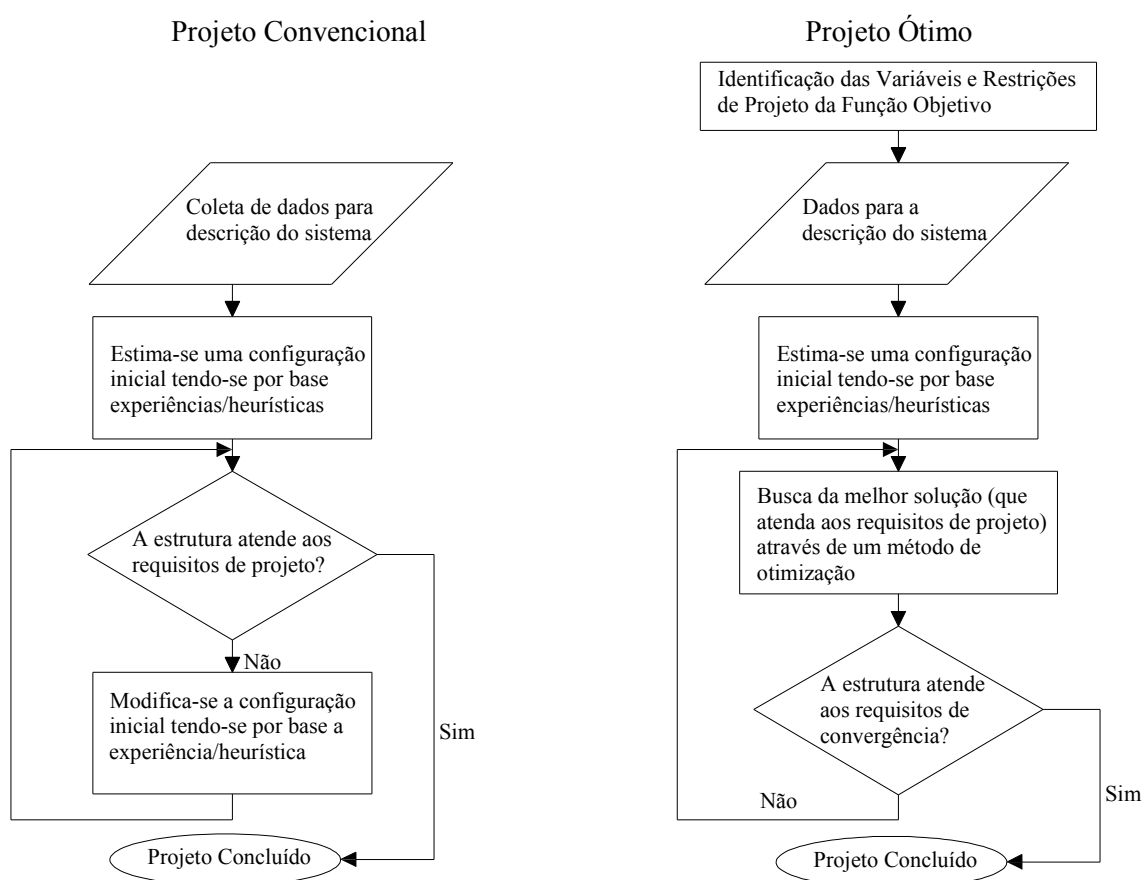


Figura 1-1 – Esquema comparativo entre projeto convencional e projeto ótimo.
Fonte: ARGOLLO (2000)

Quando se executa um projeto convencional de estruturas, visa-se obter uma configuração aceitável e adequada aos requisitos de sua funcionalidade, regidos normalmente por uma regulamentação que se caracteriza por sofrer influência direta do projetista, dependendo de sua habilidade, experiência e intuição. Esse processo nem sempre é o mais satisfatório. Primeiramente, devido às falhas humanas e, conseqüentemente, por não apresentar garantias de que a solução encontrada seja a melhor do ponto de vista econômico.

De modo geral, problemas de otimização têm a necessidade de identificar as variáveis de projeto, por situações em que se deseja maximizar ou minimizar uma função numérica de muitas variáveis, de modo a resolvê-las com o objetivo de representar seus problemas e suas restrições na busca da solução. Portanto, o emprego de sistemas de otimização conduz a um melhor entendimento no dimensionamento das estruturas, pois transforma o aspecto físico da estrutura em aspecto matemático, através de uma modelagem matemática da estrutura analisada. Além disto, as técnicas clássicas de otimização são confiáveis e possuem aplicações nas mais diferentes áreas da engenharia e outras ciências.

Pode-se então definir de forma objetiva a otimização como sendo uma maneira inteligente de se alcançar uma melhor solução dentre as inúmeras possíveis de um problema.

Como existe uma necessidade de identificar as variáveis envolvidas e seus domínios, bem como as constantes relevantes do problema, faz-se o equacionamento objetivando determinar a representação do problema e suas restrições na busca da solução ótima. Isso já vem sendo empregado em várias áreas da engenharia civil, como em projetos de redes de abastecimento de água, na dosagem de materiais, no gerenciamento de itinerários de linhas de transporte, bem como na otimização de projetos de estruturas, focalizando principalmente a minimização de custos (OLIVEIRA, 2004).

A utilização de técnicas de otimização teve início depois da Segunda Guerra Mundial, fase em que ocorreu o crescente desenvolvimento computacional. Uma das técnicas empregadas é a do Algoritmo Genético (AG), que se iniciou na década de 70 com o pesquisador John Holland, da Universidade de Michigan. Sua pesquisa é baseada no processo de seleção natural das espécies, de Charles Darwin que, segundo sua teoria da evolução, os indivíduos competem entre si, de maneira que os mais aptos têm maiores

chances de sobrevivência, enquanto os indivíduos menos aptos desaparecem durante o processo evolutivo (BASTOS 2004; LEMONGE, 1999; PIZZIRANI, 2003).

O motivo pelo qual muitos pesquisadores trabalham com a otimização de estruturas empregando o método dos AGs, é devido aos conhecimentos dos fatos que ocorrem na natureza de forma perfeita. A seguir estão relacionadas algumas dessas inspirações:

- Pássaros → Aviões
- Morcegos → Sonares
- Peixes → Submarinos

Outro exemplo também encontrado na natureza é o comportamento das formigas, que mesmo sendo elas tão simples e irracionais possuem um mecanismo de otimização natural, ou seja, são capazes de encontrar um caminho mais curto que vai do ninho até o local do alimento, mesmo quando lhe é imposto algum obstáculo no trajeto original. As Figuras 1.2, 1.3, 1.4 e 1.5 bem esse processo. Isso ocorre porque as formigas vão depositando ao longo de sua caminhada certa quantia de feromônio e dessa forma preferem seguir o caminho onde essa substância seja mais elevada (CASTRO, 2000; DORIGO, 2006).

Quando se introduz um obstáculo no caminho, as formigas se dividem e no decorrer do tempo escolhem o menor caminho onde passaram mais vezes e onde há uma concentração maior de feromônio, então dessa forma o caminho adotado será o chamado caminho ótimo ou novo trajeto.



Figura 1-2 – Trajetória das formigas em linha reta entre o ninho e o alimento.

Fonte: <http://www.aco-metaheuristic.org/RealAnts.html>, (2006)

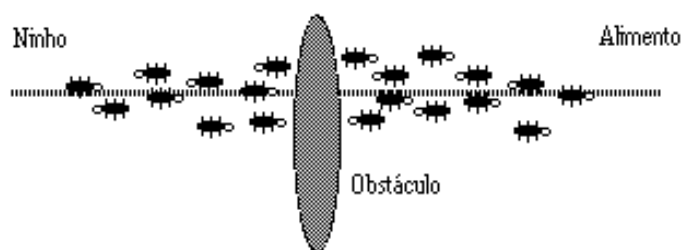


Figura 1-3 – Introdução do obstáculo no caminho original.

Fonte: <http://www.aco-metaheuristic.org/RealAnts.html>, (2006)

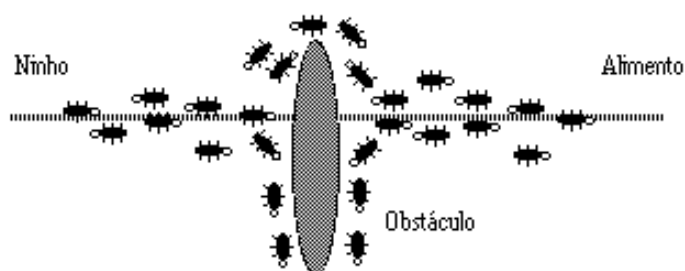


Figura 1-4 – Divisão mediana das formigas nos dois sentidos.
 Fonte: <http://www.aco-metaheuristic.org/RealAnts.html>, (2006)

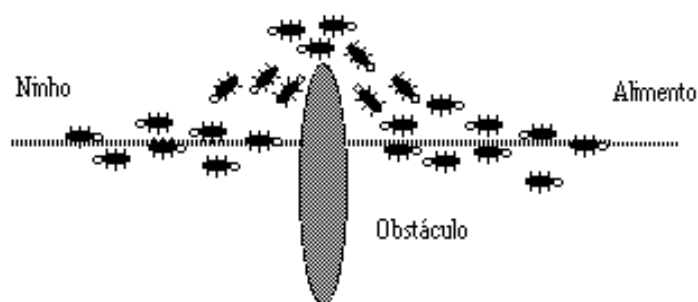


Figura 1-5 – O menor percurso é escolhido (ótimo) no decorrer do tempo.
 Fonte: <http://www.aco-metaheuristic.org/RealAnts.html>, (2006)

Outros trabalhos ainda foram desenvolvidos por muitos pesquisadores utilizando as técnicas de otimização, empregando o método dos AGs. A Tabela 1-1 mostra alguns trabalhos relevantes em engenharia estrutural realizados em otimização.

Tabela 1-1 – Trabalhos relevantes que utilizam o algoritmo genético na área de estruturas

ADELI e CHENG (1993)	Apresentaram a otimização de estruturas espaciais utilizando três diferentes tipos de treliças empregando a elas o método da função penalidade através do uso da integração do algoritmo genético.
ADELI e CHENG (1994)	Os autores apresentam um Algoritmo Genético Langrangeano para otimização de grandes estruturas, tais como altos edifícios e estações espaciais.
COHN e LOUNIS (1994)	Apresentam superestruturas de pequenas e médias extensões de sistemas de pontes que pode ser concebido como otimização de multinívies e multiobjetivos para projetos ótimos.
KOUMOUSIS e GEORGIOU (1994)	Mostra a utilização do algoritmo genético para a otimização de estruturas treliçadas de aço para telhados.
KOSKISTO e ELLINGWOOD (1997)	Apresenta um modelo para a minimização do custo do ciclo de vida de elementos e estruturas de concreto pré-fabricado.
CAMP e BICHON (2004)	Utiliza a técnica da otimização colônia de formiga para avaliar projetos de treliças espaciais, considerando o custo e o desempenho das restrições dos limites de tensões e deslocamentos.

Outros trabalhos foram ainda desenvolvidos usando o método dos AGs, tendo em vista suas facilidades de implementação quanto aos resultados encontrados na literatura. Muitos desses trabalhos agem no domínio da Engenharia Estrutural, mais especificamente em estruturas de aço e concreto, contudo poucos trabalhos estão relacionados à área das estruturas de madeira.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo avaliar por meio do método dos algoritmos genéticos, formatos otimizados de estruturas planas de madeira para cobertura do tipo treliçado. Foi usado o programa computacional chamado de OTP (Otimização de Estruturas Planas). Ele é uma adaptação do programa computacional OTR (Otimização de Estruturas Reticuladas) desenvolvido para o estudo de estruturas reticuladas espaciais formadas por barras cruzadas. Também foi usado o programa para cálculo de estruturas denominado GESTRUT que determina esforços e deslocamentos de estruturas. Os programas OTP e o GESTRUT foram desenvolvidos na Universidade Federal de Uberlândia. Enfim, este trabalho é uma proposta do uso de métodos de otimização, no caso, algoritmo genético, à criação de estruturas eficientes que satisfaçam as necessidades de maneira a se obter o menor custo.

1.3 JUSTIFICATIVA

As obras de engenharia são projetadas com uma preocupação muito grande em relação ao custo final na execução dos projetos. Assim, as estruturas de coberturas de galpões industriais, ginásios, depósitos etc., ou como parte de uma construção genérica merecem um tratamento otimizado para garantir sua eficiência ao longo de sua vida útil e economia na sua implantação.

Em um projeto estrutural é necessário se obter uma maneira adequada para a disposição das peças de tal forma que a estrutura seja capaz de suportar o carregamento imposto com segurança. Escolhida a disposição estrutural busca-se qual a melhor distribuição de material que será empregado à estrutura para que lhe seja garantido as condições de segurança ao projeto e o menor custo na execução. Para tanto são necessárias informações

sobre topologia, forma e dimensões da estrutura (tamanho das peças estruturais) (LEMONGE, 1999).

A diminuição dos custos das estruturas nas construções torna-se cada vez mais importante com a globalização da economia. No caso das treliças, que são estruturas leves, de rápida e fácil execução, o menor custo será em função do menor peso da estrutura, visando projetos de estruturas que cumpram com segurança a sua finalidade.

A utilização do algoritmo genético tem a vantagem de ser aplicado a qualquer tipo de problema complexo com um número muito grande de variáveis, onde os métodos tradicionais possuem deficiência. Portanto, o desenvolvimento deste trabalho é justificado pela busca da qualidade das estruturas e da economia, que são parâmetros importantes em qualquer atividade.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

No Capítulo 2 será apresentada uma revisão bibliográfica sobre treliças de madeira, bem como uma introdução geral à otimização de estruturas, mostrando os métodos de otimização mais utilizados.

No Capítulo 3 serão mostrados os principais conceitos relativos aos Algoritmos Genéticos (AGs), abordados como técnicas de otimização, que são relevantes neste trabalho. Serão detalhados também os operadores genéticos mais comuns.

O Capítulo 4 mostrará a aplicação do Algoritmo Genético na otimização de estruturas planas de madeira para cobertura do tipo treliçado.

No Capítulo 5 será feita uma análise dos comportamentos globais das estruturas planas de madeira do tipo treliçado através de resultados que serão obtidos da otimização de três modelos de treliças utilizando o programa computacional OTP, e a comparação dos resultados entre um modelo real e um otimizado.

Finalmente, o Capítulo 6 apresentará as principais conclusões e propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS DO EMPREGO DAS ESTRUTURAS DE MADEIRA PARA COBERTURA

2.1.1 Preliminares

Com a possibilidade de um aproveitamento mais direto dos recursos existentes na natureza, a madeira como recurso natural, vem sendo utilizada há muito tempo para fins estruturais.

Sendo a madeira um recurso natural sempre presente no dia-a-dia do ser humano, seu emprego ao longo do desenvolvimento histórico mostra que é um material pioneiro na engenharia estrutural. Possuindo uma diversidade em suas características observa-se o seu emprego para as mais diversas finalidades, tais como pontes, coberturas, silos, escoramentos, bem como na fabricação de móveis, peças de artesanato, brinquedos, lambris e pisos, instrumentos musicais, embalagens (caixas), implementos agrícolas, divisórias, produtos de papel e chapas de madeira em geral.

Contudo, o desenvolvimento atingido com a tecnologia da utilização da madeira vem alcançando níveis variados. Porém, no Brasil, existem grandes deficiências em alguns setores ligados ao seu emprego na construção civil, principalmente, no que se refere à sua aplicabilidade estrutural.

Dentre todos os sistemas estruturais encontrados tradicionalmente em estruturas de madeira para cobertura, o sistema estrutural mais difundido é o sistema treliçado.

Nota-se que tal fato está ligado aos aspectos históricos da utilização da madeira nas estruturas de cobertura, visto que toda a tradição de seu uso se traduz em vários pontos, desde as formas geométricas envolvidas até as técnicas construtivas utilizadas usualmente pelos carpinteiros. Entretanto, o comportamento e as características intrínsecas da madeira não alcançaram ainda um conhecimento pleno, fato que não pode ser ignorado.

Desde a sua existência, o homem tende a melhorar sua própria situação humana, propiciando um desenvolvimento gradativo de suprir suas necessidades. Dessa maneira, o homem tem se preocupado em oferecer a si mesmo, à sua família e à sociedade na qual está inserido, condição necessária de um ambiente, onde além de proteger das intempéries da natureza, possa exercer suas atividades com tranquilidade e segurança.

Para tanto, aos poucos foram surgindo as primeiras edificações, construídas com os materiais disponíveis da época, ou seja, a pedra, a argila e a madeira. No começo a pedra e a argila constituíam a moradia, destinando a madeira somente para a construção de estacas de defesas.

Sendo assim, no decorrer dos anos, foram surgindo novas técnicas para a aplicação dos materiais mais comuns, em contrapartida novos materiais eram descobertos, possibilitando uma crescente aplicação dos mesmos. Inicialmente, o grande interesse nas descobertas dos novos materiais relacionava-se ao melhoramento das habitações. Contudo, havia-se a preocupação em desenvolver técnicas construtivas para as edificações, bem como a estabilidade e a durabilidade das estruturas.

Pensando-se em aproveitar melhor o espaço, ou seja, aperfeiçoar as formas e os contornos, criando-se estilos e padrões, as funções dos elementos passaram a ser mais definidas proporcionando o aparecimento de edificações mais altas, amplas e esbeltas.

Segundo Lahr (1983), da interação engenharia-arquitetura, o problema da construção de edifícios para moradia, comércio, indústria, lazer, etc., vem sendo resolvido com técnicas

sempre mais aperfeiçoadas, com melhor utilização dos materiais, ao lado de configuração estético-funcional mais desenvolvida.

Desta forma, dentro de um contexto geral das edificações, cada elemento arquitetônico e estrutural inserido na construção, tem importância significativa, pois deve-se apresentar como todo, completo e homogêneo entre si. Para tanto, cada elemento deve ser cuidadosamente projetado e construído para atingir a homogeneidade desejada, sob todos os pontos de vista.

Contudo, os critérios de utilização da madeira vêm passando por um processo de reformulação profunda, que resgata a madeira como um material estrutural competitivo com o concreto e o aço.

Portanto, sendo a cobertura uma etapa de importância significativa em uma edificação, ela deve ser tratada, reconhecida e estudada de forma mais abrangente.

A realização de um resumo histórico do emprego do sistema treliçado de madeira para coberturas, tem o objetivo de mostrar as razões básicas do desenvolvimento atual nesta área da engenharia e da arquitetura, fornecendo elementos que contribuam para a elaboração deste trabalho.

2.1.2 Resumo histórico da aplicação da madeira em estruturas para cobertura de edificações

2.1.2.1 De 3000 a.C a 500 a. C no Ocidente

A aplicação da madeira como um dos primeiros materiais a serem utilizados na construção civil, foi empregado praticamente de maneira experimental, ou seja, as previsões de seu comportamento estrutural se davam da observação no dia-a-dia e intuitiva das propriedades naturais de sua origem viva.

Com o decorrer do tempo, a história tem apontado alguns períodos arquitetônicos definindo suas características próprias.

Tem-se no período neolítico, uma associação da madeira com a argila, sendo ambos os materiais abundantes e de fácil manipulação. Com respeito às primeiras evidências do emprego da madeira, destacam-se as estruturas feitas pelos egípcios, por volta do ano 3000 a.C, construídas ao longo do Rio Nilo. Estas construções eram feitas de elementos estruturais treliçados de madeira com argila, e tinham como função a vedação. A fundação era feita de pedra. Sendo a pedra e a madeira material de maior predominância na paisagem egípcia, começava-se a se definir as funções do emprego da madeira.

O uso de cobertura de madeira para a sustentação de telhados, foi uma evidência para os antepassados, pois era necessário cobrir certo espaço para se proteger dos intemperismos da natureza, e que também permitisse o escoamento da água da chuva, e para tanto era preciso um plano inclinado.

Por volta de 1000 a.C, esse processo já era executado na Mesopotâmia, em que a madeira era empregada na cobertura, usando-se troncos de palmeiras estendidos horizontalmente, apoiados uns nos outros e sustentados por troncos dispostos na vertical (Figura 2-1).

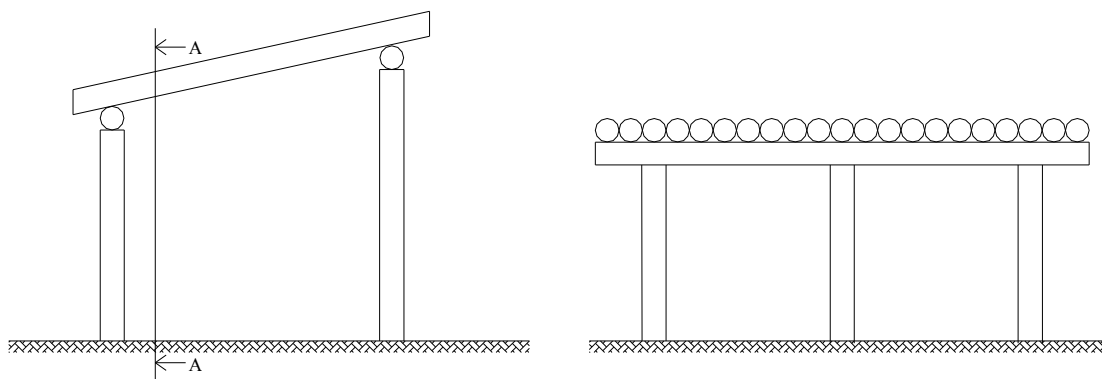


Figura 2-1 – Habitação com cobertura em troncos de madeira.

Fonte: LAHR, (1983).

Portanto, no que se refere às ligações feitas entre esses troncos não foram encontrados nenhuma referência. Contudo, a partir do século VII a.C na Pérsia, a madeira já era usada para coberturas em estruturas planas (Figura 2-2), sendo que seu madeiramento era feito em três níveis possibilitando o apoio dos elementos.

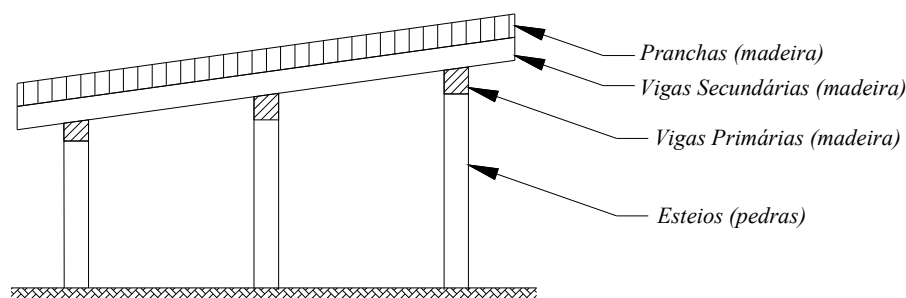


Figura 2-2 – Habitação com cobertura em pranchas de madeira.
Fonte: LAHR, (1983)

Para tanto a ausência de ferramentas adequadas na execução do corte da madeira, dificultava o trabalho. Outros exemplos da aplicação da madeira para cobertura são o Tabernáculo Móvel e o Templo de Jerusalém, feitos pelos Hebreus, usando o cedro do Líbano.

2.1.2.2 De 1000 a.C a 500 a. C no Oriente

Sendo o Oriente uma região mais rica em florestas naturais que o Ocidente, o emprego da madeira nessa região ocorreu de forma mais abrangente. Na Índia, as coberturas em formas de abóbadas ou arcos já eram empregadas em sua arquitetura, assim como as coberturas de forma piramidal.

A madeira sempre esteve presente na arquitetura chinesa, onde era empregada comumente nas estruturas de coberturas. Os conjuntos das peças que compunham as estruturas de cobertura se distribuíam em forma de retângulos rígidos superpostos. Foi desenvolvido para as regiões onde o índice pluviométrico é alto, um telhado com uma determinada concavidade que facilitava o escoamento das águas das chuvas, e possuindo beirais mais largos para a proteção das paredes (Figura 2-3).

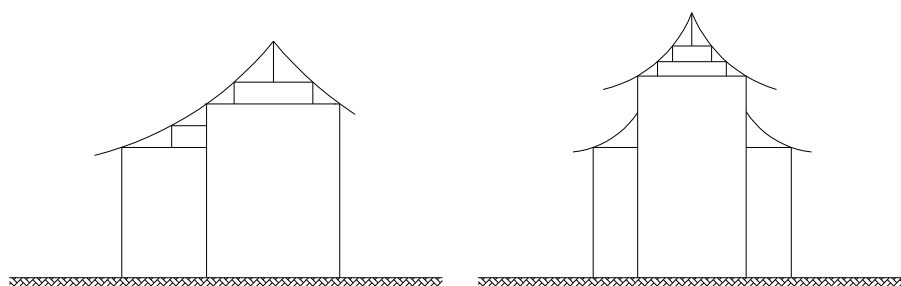


Figura 2-3 – Habitações com coberturas côncavas.
Fonte: LAHR, (1983)

Com o avanço do desenvolvimento das ferramentas, ainda no século V a.C, houve uma evolução das coberturas num processo de se ampliar as dimensões dos elementos, deixando as configurações geométricas mais complexas, possibilitando o vencimento de grandes vãos livres.

Bem mais simples que as estruturas chinesas, a geometria das estruturas japonesas empregava a madeira como uma forma típica de cobertura, além de utilizá-la como estrutura de vedação pintada com uma tinta especial aumentando a sua durabilidade natural.

2.1.2.3 Arquitetura grega e arquitetura romana

A clássica arquitetura grega já se baseava em muitas técnicas, em que seus arquitetos e construtores souberam aproveitar de forma satisfatória os materiais colocados à sua disposição pela natureza. Apesar de manterem uma obediência a algumas técnicas antigas, desenvolveram ferramentas aperfeiçoadas para facilitar o manuseio da madeira, trabalhando com o bronze e o ferro.

Quando não era possível obter peças de seções transversais suficientes para a estrutura projetada, fazia-se a união de dois ou mais elementos por meio de travessas, ou seja, as precursoras das cavilhas (Figura 2-4).

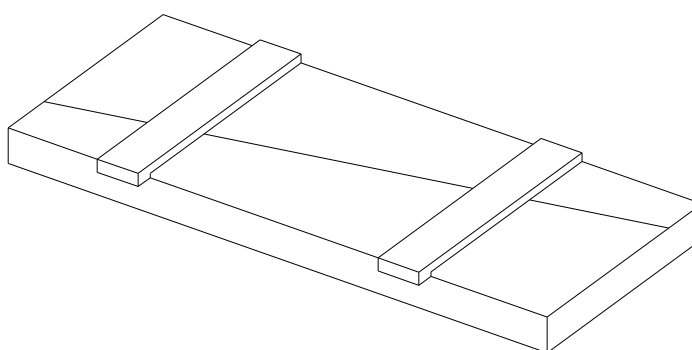


Figura 2-4 – Seção transversal composta de madeira
Fonte: PINHEIRO, (1996)

As primeiras coberturas de madeira eram bem simples e tinham o telhado construído de uma viga horizontal e duas vigas inclinadas, denominadas de banzo superior, e um esteio central, posicionado no ponto médio, que servia de sustentação para as vigas do telhado.

Os elementos que compunham essa estrutura, por serem apenas encaixados ou simplesmente apoiados, trabalhavam somente a esforços de flexão ou de compressão paralela às fibras, como pode ser observado na Figura 2-5.

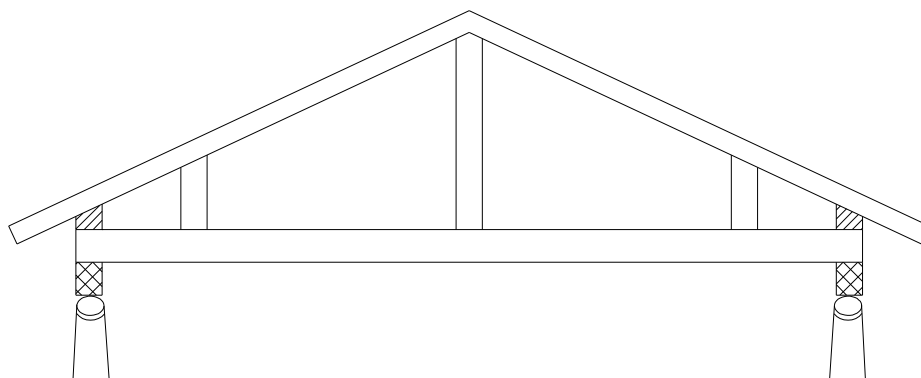


Figura 2-5 – Estruturas de coberturas com barras encaixadas.
Fonte: PINHEIRO, (1996)

Considerando o fato da viga horizontal da cobertura trabalhar somente à flexão as dimensões dos vãos livres ficavam limitadas devido às deformações excessivas. Dessa maneira surgiu a necessidade de se dispor as peças da estrutura de madeira de forma que a cobertura pudesse ter vãos livres maiores, ou seja, as peças começaram a trabalhar de modo semelhante às tesouras dos dias atuais, submetidas a esforços de tração e compressão paralela às fibras (Figura 2-6).

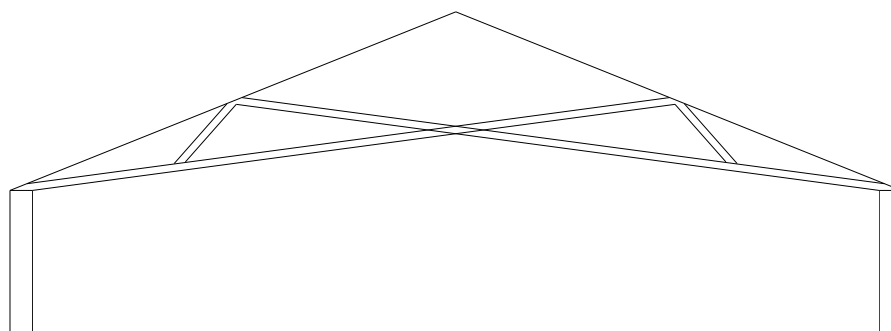


Figura 2-6 – Estrutura de cobertura com barras inclinadas.
Fonte: PINHEIRO, (1996)

Diante disso ficou mais fácil vencer grandes vãos sem que fosse necessário a utilização dos apoios intermediários, característica das coberturas gregas. É importante ressaltar que a arquitetura romana foi uma das primeiras a apresentar tesouras que tivessem banzos superiores e inferiores compostas por montantes e diagonais. Esse tipo de estrutura foi muito difundida nas regiões de domínio romano devido à expansão do Império Romano.

2.1.2.4 Arquitetura dos séculos d.C

Continuando com os romanos e posteriormente com os bizantinos, a partir do século IV d.C, houve uma evolução das tesouras no que diz respeito aos aspectos geométricos, adquirindo aspectos muito semelhantes ao visto nos dias atuais (Figura 2-7). Com o desenvolvimento das ferramentas disponíveis, a madeira passou a ser de fácil trabalhabilidade, tornando-se própria para a confecção de elementos decorativos e principalmente para o emprego de estruturas de cobertura.

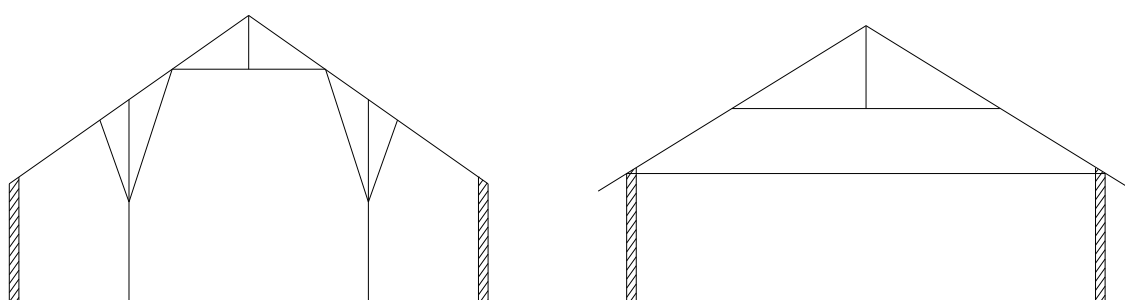


Figura 2-7 – Estrutura de cobertura posterior ao século IV d.C.

Fonte: PINHEIRO, (1996)

Essa forma de telhado foi mantida em grande parte das edificações. Nesse mesmo período surgiram as primeiras medidas contra incêndio, passando a utilizar folhas metálicas de maneira convenientemente associada à madeira, na estruturas de cobertura.

A Arquitetura Muçulmana a partir do final do século X d.C, em virtude das condições climáticas, se caracterizou por apresentar edificações com estruturas de vigas de madeira com pranchas sobrepostas que recebiam uma capa de material isolante e impermeabilizante, e revestidas de placas cerâmicas.

Já a Arquitetura Românica, por volta do século XV d.C, conservou os telhados de duas águas, implantados pelos bizantinos, para a cobertura dos templos. Outra forma bastante difundida foi a aplicação de telhados de uma água. Esta forma de telhado apresentava algumas particularidades: fácil execução e ótimo escoamento das águas pluviais, pela ausência da interseção dos banzos superiores (Figura 2-8).

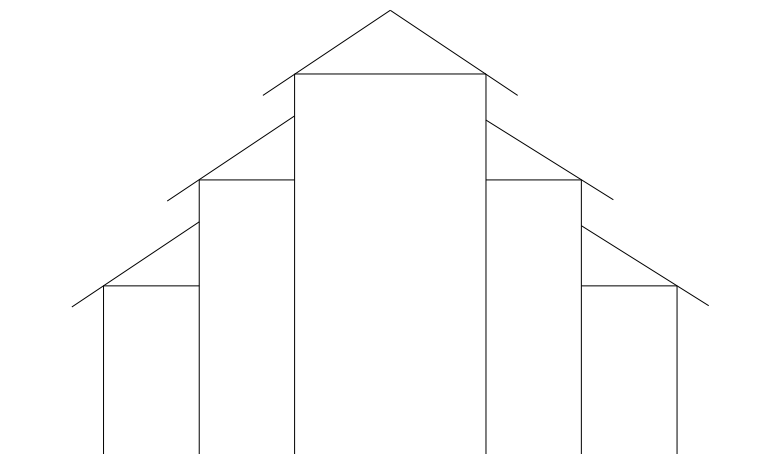


Figura 2-8 – Estrutura de cobertura da Arquitetura Românica do séc. XV.
Fonte: PINHEIRO, (1996)

Nesse mesmo período surgiram estruturas de coberturas com sistema estrutural contraventado, fato historicamente inusitado. Ocorreu também, no sentido de se utilizar também peças fletidas, permitindo o aparecimento de disposições geométricas que contribuíam para o melhoramento estético do conjunto.

Novamente é encontrado na Arquitetura Gótica o uso das treliças de madeira para a construção de grandes obras, ficando esse período marcado por esse estilo. Uma das características desse estilo é dada pela inclinação das faces da cobertura, o que acarretou problemas nas ligações, que eram feitas por meio de cavilhas ou de encaixes.

Posteriormente foram introduzidos os parafusos e as chapas metálicas. Isso se deu no final dos séculos XVI e início do século XVII. Uma das razões que impossibilitava o vencimento de vãos livres acima dos 25 metros para a construção de estruturas de madeira, foi a falta de conhecimento mais aprofundado do comportamento das ligações feitas por cavilhas, parafusos e encaixes.

2.2 OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS

Pelo relato histórico apresentado até agora, percebe-se que as primeiras estruturas de madeira utilizadas pelo homem com o fim específico para cobertura, foram as estruturas treliçadas na forma de tesoura. Mesmo com toda a tradição envolvendo o emprego da madeira, pode-se notar que até as primeiras décadas do século XIX, não existia um conhecimento aprofundado de suas propriedades, ou seja, de suas características físicas,

mecânicas e elásticas. Dessa forma, não havia como se desenvolver projetos estruturais mais elaborados devido à falta de processos de cálculo apropriados.

Alguns pesquisadores a partir da metade do século XIX, sentindo a necessidade de dar à madeira um uso mais racional, começaram a desenvolver pesquisas sobre suas propriedades físicas e mecânicas. Pouco depois, foram surgindo novos estudos que incluíam tanto a parte de caracterização do material, como de aplicação referente ao estudo das estruturas treliçadas.

Para o desenvolvimento de um projeto são necessários escolher os materiais, a topologia e a geometria a serem utilizados no sistema, bem como dimensionar as diversas partes que o constituem, para que atenda aos requisitos de desempenho, economia e segurança. Para melhorar este processo existem os procedimentos de otimização. Neles são definidas as funções objetivo, que estão sujeitas ou não a restrições, que podem estar relacionadas à escolha do material, à sua durabilidade, funcionalidade, confiabilidade, eficiência, tempo de execução, recursos disponíveis a análises, etc. Em geral, a função objetivo não incorpora somente um único interesse, mas uma série de questões que estão envolvidas no problema, isto é, a otimização de multi-objetivos.

Em resumo, os aspectos importantes da otimização estrutural que o projetista deve estar atento, incluem (XIE; STEVEN, 1997 *apud* LEMONGE, 1999):

- Tamanho, forma e topologia sendo otimizados no mesmo problema em diferentes partes da estrutura;
- Critérios diferentes de otimização em partes diferentes da estrutura;
- Estrutura submetida a vários carregamentos;
- Estrutura com possíveis variações no sistema de apoios;
- Estrutura composta por vários tipos de materiais;
- Consideração de análises bi e tridimensionais;

- Otimização considerando-se análise estática, dinâmica, e estabilidade simultaneamente;
- Otimização com não-linearidade física e geométrica.

Contudo, otimizar é projetar um sistema que tenha uma melhor eficiência com um baixo custo. É encontrar os parâmetros do sistema em estudo, de modo que o rendimento do sistema seja próximo do valor ótimo, baseado em um critério prévio de otimização (SOUZA JR, 2005).

2.3 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Os problemas de otimização apresentam alguns conceitos e definições que são empregados na literatura e são de conhecimento indispensável. Desta forma, as definições são apresentadas para melhor proporcionar um entendimento dos termos utilizados ao longo deste trabalho.

- **Função Objetivo:** É a representação de um critério matemático, que influenciado pelas variáveis de projeto levará o sistema estrutural a ser otimizado, ou seja, é a função que será maximizada ou minimizada, dependendo do problema.
- **Variáveis de Projeto:** São variáveis que se alteram ao longo do processo de otimização e podem ser contínuas (reais) ou discretas (inteiras).
- **Restrições de Projeto:** São funções de igualdade ou desigualdade que descrevem o comportamento ou funcionalidade do projeto que são consideradas não desejáveis.
- **Espaço de Busca:** É o conjunto, espaço ou região que compreende as soluções possíveis do problema a ser otimizado, sendo delimitado pelas funções de restrições.
- **Ponto Ótimo:** É o ponto formado pelas variáveis de projeto que extremizam a função objetivo e satisfaz as restrições.

- Valor Ótimo: É o valor da função objetivo no ponto ótimo.
- Solução Ótima: É a junção formada pelo ponto ótimo e valor ótimo, e podem ser do tipo local quando o valor ótimo é localizado, e global quando esse valor for global em uma região viável.

A solução de um problema de otimização depende de alguns fatores que influenciam diretamente no algoritmo:

- O Problema – onde é determinado com clareza a função objetivo, suas restrições e quais serão os tipos de variáveis que estarão presentes no projeto a fim de facilitar o processo de convergência dos resultados;
- O Usuário – ele é quem vai determinar se o algoritmo enquadra na problemática, a habilidade que tem de lidar com grande quantidade de números e a capacidade de efetuar mudanças a partir de resultados já obtidos;
- O Algoritmo – é onde ocorre o armazenamento e o processamento dos dados dentro dos métodos de otimização.

Os métodos podem ser classificados em dois grupos, os *Determinísticos*, baseados nos métodos de cálculos, que empregam considerações matemáticas para prever resultados, onde as decisões obedecem a uma rigorosidade, não havendo oportunidade para decisões aleatórias, e os *Estocásticos ou meta-heurísticas*, baseados nos métodos randômicos ou aleatórios, que tem como características a busca do projeto ótimo por regras probabilísticas.

Existe uma grande variedade de métodos empregados para solução de problemas de programação matemática, dentre eles se destacam: Método da Máxima Descida (*Steepest Descent*), Método do Gradiente Conjugado, Método de Newton, Método Quase-Newton, Métodos das Penalidades, Métodos do Langrangeano Aumentado, dentre outros (BASTOS, 2004).

Mesmo que os métodos matemáticos apresentem um teorema que lhe forneça uma convergência para a solução ótima, essa solução não será necessariamente a solução ótima global. Segundo Bastos (2004) isso ocorre porque a solução encontrada por esses métodos depende extremamente do ponto de partida que foi fornecido, e este é um problema que vem intrigando os pesquisadores desta área há algum tempo, mas que ainda continua sem uma solução.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS DO ALGORITMO GENÉTICO

3.1 PRELIMINARES

Com a existência da grande quantidade de problemas físicos e matemáticos que tem como finalidade a solução de valores extremos de uma determinada função, as resoluções para tais problemas têm se dirigido para os estudos dos métodos de otimização. Considerada como uma ferramenta indispensável na análise de soluções de problemas, a otimização pode maximizar ou minimizar um problema de forma clara e objetiva podendo com isso melhorar consideravelmente o desempenho de muitos processos das funções pré-estabelecidas que estejam ou não sujeitas às restrições.

Porém antes do surgimento da utilização do algoritmo genético como ferramenta de busca de soluções de problemas, alguns pesquisadores já usavam computadores digitais na tentativa de simular sistemas genéticos associados à evolução. Muitos trabalhos foram desenvolvidos baseados no princípio da evolução e da hereditariedade, em que esse sistema possuía uma população de soluções, alguns processos de soluções baseados a aptidões e alguns operadores genéticos.

Nos últimos anos houve um crescente interesse na busca de resoluções de problemas empregando os algoritmos. Desta forma, é considerado como um marco nas pesquisas da utilização da Computação Evolucionista (CE) os Professores da Universidade de Berlim, Ingo Recenberg e Hans-Paul Schwefel, que desenvolveram no início da década de 60, a resolução de um problema de otimização que era formado por placas de metal e havia uma

variação na posição dos apoios. Outros pesquisadores como Holland e Fogel também contribuíram para o avanço da computação evolucionista.

Através da computação evolucionista, pode-se estabelecer uma ligação que está associada aos Algoritmos Genéticos (AG), Programação Evolucionista (PE) e Estratégias Evolucionistas (EE). Todas elas estão baseadas no conceito de população de indivíduos, em que cada indivíduo representa uma solução potencial do problema e ainda são manipulados por meios de operadores genéticos, designados de mutação e cruzamento.

Essas três classes de algoritmos evolucionistas, foram de início projetadas para resolver problemas de otimização em ensaios experimentais. Porém existem diferenças entre elas, tanto na forma de representação dos indivíduos, quanto na definição do operador genético (mutação e cruzamento) e ainda na forma de seleção e reprodução.

Um algoritmo evolucionista tem como passo inicial a geração de uma população aleatória formada de possíveis soluções, que dependendo do problema podem ser simples ou complexas. Essa população passa por uma avaliação chamada aptidão, que vai refletir na qualidade da solução, isto é, os membros mais aptos são selecionados enquanto os menos aptos são descartados. Nessa fase de escolha ficam definidos quem serão os pais e quem serão os filhos. A partir daí os filhos começam a sofrer recombinação e mutação em suas características fundamentais gerando novos descendentes para a próxima população. Isso é repetido inúmeras vezes até que se consiga chegar a uma solução satisfatória, como mostra a Figura 3-1.

Algoritmo Evolucionista (AE)

Início

$t=0$

inicialize Pop.(t)

avale Pop(t)

enquanto não termina processo faça:

Início

$t=t+1$

selecione Pop(t) a partir de Pop(t+1)

altere Pop(t)

avale Pop(t)

Fim

Fim

Figura 3-1 – Procedimento de Algoritmos Evolucionistas.

Fonte: MICHALEWICH, (1996)

3.2 ALGORITMO GENÉTICO

Algoritmos Genéticos (AGs) são métodos de otimização e busca que utilizam alguns conceitos da genética e se baseiam na evolução da população de seres vivos. Desenvolvido pelo pesquisador John Holland, da Universidade de Michigan, na década de 70, foi inspirado na teoria do princípio da seleção natural e sobrevivência de indivíduos mais aptos, do naturalista e fisiologista Charles Darwin. Segundo a teoria de Darwin, quanto melhor for a genética de um indivíduo numa determinada população, melhor será a chance dele se adaptar ao meio em que está inserido e maior será sua probabilidade de sobreviver e gerar descendentes, enquanto os indivíduos menos aptos tendem a desaparecer.

Portanto, para Holland um dos pontos principais de sua pesquisa estava em abstrair e explicar rigorosamente os processos adaptativos dos sistemas naturais e criar programas de computadores para simular sistemas artificiais, mantendo os mecanismos importantes dos sistemas naturais (GOLDBERG, 1989). Dessa maneira, direcionou-se a pesquisa para três pontos: cromossomo, indivíduo e população. Essa divisão foi estabelecida na tentativa de achar um modo para codificar um cromossomo que representasse um indivíduo em uma dada população.

De acordo com Man *et al* (2001) supõe-se que a solução potencial do AG de qualquer problema está em um indivíduo e, portanto pode ser representado por um conjunto de parâmetros. Esses parâmetros, são considerados como genes de um cromossomo, podendo ser estruturados em uma cadeia de valores na forma binária. A geração de um valor positivo, conhecido como função aptidão, é geralmente usada para refletir o grau da “boa qualidade” do cromossomo para o problema do qual estaria relacionado com sua função objetivo.

Os algoritmos genéticos possuem uma eficiência na busca de soluções ótimas, ou próximas do ótimo, em problemas variáveis, por não impor muitas limitações, o que não ocorre nos métodos tradicionais de otimização. Sobretudo, os AGs são capazes de identificar e explorar espaços de busca que convergem para uma solução ótima, ou próxima da ótima em níveis globais.

Segundo Oliveira (2004) os AGs são capazes de resolver problemas diferentes e complexos de otimização explorando a idéia da seleção de indivíduos mais aptos e do cruzamento de populações visando obter novos e melhores indivíduos. Utilizam uma estratégia de busca paralela, estruturada e aleatória, voltada em direção à busca de pontos nos quais a função a ser minimizada ou maximizada tenha valores relativamente baixos ou altos. Apesar de realizarem uma pesquisa aleatória, para que possam direcionar sua busca, os AGs utilizam o conhecimento adquirido de gerações anteriores para construir uma nova geração que irá se aproximar da solução ótima.

3.3 TERMINOLOGIA

Entende-se um Algoritmo Genético como uma metáfora da evolução dos seres vivos, que incorpora alguns conceitos da genética. Isso explica o porquê dos AGs possuírem muitos termos originados da biologia. A lista a seguir mostra alguns dos principais termos que são encontrados na literatura e que serão utilizados ao longo deste trabalho.

- *Cromossomo* – É a cadeia que representa a estrutura de dados que codifica uma solução relativa às variáveis do problema, ou seja, um cromossomo representa um simples ponto no espaço de busca;
- *População* – É o conjunto de indivíduos que representam possíveis soluções;
- *Indivíduos* – Um simples membro da população, formado pelo cromossomo e sua aptidão;
- *Gene* – É um parâmetro que descreve cada uma das variáveis do problema, e representa certa característica da solução-cromossomo;
- *Genótipo* – Na biologia representa a composição genética contida no Genoma. Nos AGs, representa a informação contida no cromossomo ou genoma;
- *Geração* – Indica o número de iterações que o algoritmo genético executa durante o processo evolutivo;

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

3.4 REPRESENTAÇÃO OU CODIFICAÇÃO

Diferentes de outros métodos de otimização, os AGs utilizam uma forma de representação codificada na identificação das variáveis e seus limites envolvidos no projeto visando a solução de um problema. Essa representação ou codificação das variáveis do projeto proporciona um grande impacto no desempenho de busca, que deve ser simples sem perder as características de representação do problema em questão.

A codificação pode ter várias formas de variáveis em sua representação, como a representação binária, que é utilizada para problemas de variáveis discretas, a representação real, utilizada para problemas com variáveis contínuas e a representação binária que utiliza problemas de variáveis contínuas e vice-versa.

3.4.1 Representação binária e real

A maior parte dos trabalhos já realizados com algoritmos genéticos usou a representação binária, onde os valores das variáveis são codificados em cadeias de caracteres binários (0 e 1), que representa o gene. O tamanho total desse cromossomo é a soma das subcadeias que representam as n variáveis do problema. De acordo com Michalewisc (1996), esse tipo de representação se dá devido ao fato de que aplicações mais apropriadas requeiram valores discretos.

No caso de uma variável contínua a determinação do número de bits (m) para representar seus possíveis valores depende do limite inferior (b) e superior (c) do intervalo de valores que essa variável vai assumir, no domínio do problema, bem como da precisão que a solução vai requerer, dada pelo parâmetro k . Isso é feito determinando o número inteiro m que satisfaz a Equação 3.1 (CASTILHO, 2003).

$$2^{m-1} \leq (c - b)10^k \leq 2^m - 1$$

Equação 3.1

Para ilustrar melhor a utilização da codificação binária, considere um problema que tenha quatro variáveis x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , em que cada uma delas seja codificada com cinco bits, da seguinte forma:

$$x_1 = 10100$$

$$x_2 = 01001$$

$$x_3 = 11010$$

$$x_4 = 10001$$

Supondo que associação destas codificações gerada randomicamente, para uma possível solução inicial, seria representada através do cromossomo:

$$s_1 = 10100010011101010001$$

Para que os valores originais das variáveis sejam recuperados, é necessário, portanto um procedimento de decodificação.

Para uma variável discreta, a decodificação fornece um índice que localiza o valor da variável numa lista de referência, que representa o espaço de busca para essa variável (LEMONGE, 1999)

A título de ilustração, seja $x_1 = 101$. Sua decodificação vai indicar que o índice $IND = 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 5$, que apontará para quinta variável discreta do espaço de busca dessa variável.

Para as variáveis contínuas tem-se a decodificação:

$$x = x^L + IND \times \frac{x^U - x^L}{2^{nb} - 1}$$

É importante ressaltar que a escolha do número de bits para cada variável, o tamanho do cromossomo e sua decodificação, dependerá de cada problema.

A escolha desses bits para codificar uma variável discreta pode ser da seguinte forma: (Equação 3.2)

$$2^{nb} = nv \quad \text{Equação 3.2}$$

onde nb é o número de bits e nv o número de possíveis valores assumidos.

Já para uma variável contínua, a decodificação fornece um valor real mostrado na Equação 3.3:

$$x_k = x^{LI} + IND \times \varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{x^{LS} - x^{LI}}{2^{nb} - 1} \quad \text{Equação 3.3}$$

onde x^{LI} e x^{LS} são os limites superior e inferior do espaço de busca.

E conseqüentemente o número de bits que são necessários para que a precisão de ε seja garantida é dado pela Equação 3.4:

$$nb \geq \log_2 \frac{x^{LS} - x^{LI}}{\varepsilon} \quad \text{Equação 3.4}$$

Portanto, com relação a qual tipo de codificação usar, Goldberg (1990) *apud* Bastos (2004) sugere que, enquanto a codificação real pode não prejudicar o processo genético em alguns problemas e pode ser igualmente útil em outros, podem existir problemas onde a codificação real adicione “barreiras” para a busca do ótimo global. Contudo, a codificação real parece ser uma substituição natural da codificação binária, tão logo os teoremas de desempenho possam ser comprovados.

3.5 POPULAÇÃO INICIAL

Definido o processo de codificação, realiza-se a geração da população inicial, que é a representação de um conjunto de possíveis soluções do problema. Essa população pode ser gerada de muitas maneiras, mas geralmente é feita de forma aleatória, embora existam ocasiões em que é necessária a seleção heurística desta população, introduzindo já no início um ou mais indivíduos que sejam “interessantes”, como por exemplo, soluções

aproximadas conhecidas que contenham alguma informação prévia (LEMONGE, 1999; CASTRO 2001).

Goldberg (1989) afirma que vários trabalhos já realizados comprovam que a geração da população inicial não é um ponto crítico, desde que haja indivíduos suficientemente variados que cubram bem o espaço de busca do problema.

Pode ser interessante utilizar uma população inicial maior que a população que será utilizada nas gerações seguintes visando dessa forma uma melhor representação do espaço de busca.

Existe ainda uma técnica denominada “*seeding*” que pode ser de grande valia em muitos problemas práticos. Esta consiste em colocar na população inicial soluções encontradas por outros métodos de otimização. Isto garante que a solução gerada pelo AG não seja pior que as soluções geradas pelos outros métodos (LACERDA e CARVALHO, 1999).

3.6 FUNÇÃO APTIDÃO

Na busca de um indivíduo melhor dentro do processo evolutivo, é importante ressaltar duas questões. Qual a diferença entre uma boa e uma má solução? E qual a melhor forma de quantificá-la?

Diz-se que a boa solução é aquela em que os indivíduos possuem alta aptidão, ou seja, é a solução que melhor atende ao problema especificado, sendo a função aptidão a forma de se medir e distinguir essas soluções.

A necessidade de avaliação da população é feita através da função aptidão, que avalia a capacidade de sobrevivência dos indivíduos da população durante o processo evolutivo. Esta medida serve como base para a classificação dessas soluções indicando a sua qualidade, ou seja, suas chances de passar para a geração seguinte.

Cada indivíduo possui um valor aptidão que está associado a ele. Para um problema de otimização com restrições estruturais, a função aptidão pode ser definida como mostra a Equação 3.5.

$$F(x) = f(x) + pen(x) \quad \text{Equação 3.5}$$

em que $f(x)$ é a função objetivo e $pen(x)$ é conhecida como função penalidade. Em geral a função objetivo está ligada direta ou indiretamente ao critério econômico, e a função penalidade está ligada às restrições.

Segundo Castilho (2003) se não houver nenhum problema de violação às restrições, o valor da função aptidão será o próprio valor da função objetivo, sendo que o valor da função penalidade não será considerado. As funções penalidades serão abordadas mais adiante. A maior dificuldade quando se utiliza AG, é de definir a função penalidade que tem relação direta com o próprio problema.

3.7 SELEÇÃO

O processo de seleção foi inspirado no princípio da “sobrevivência do mais apto”, onde os indivíduos com melhores aptidões têm uma maior chance de serem copiados para uma população intermediária ou “*mating pool*” de onde serão aleatoriamente escolhidos para serem reproduzidos. E os indivíduos menos aptos são descartados. Existem muitos métodos de seleção de indivíduos implementados na prática dos AGs, portanto, serão apresentados apenas os principais: seleção *rank*, seleção da roleta e seleção por torneio.

- Seleção *rank*: essa seleção é feita pela classificação do valor da função aptidão, onde o primeiro indivíduo do *rank* e o último receberão valores de aptidão arbitrários, sendo que os indivíduos em melhor posição terão maiores chances de reprodução. As demais aptidões são obtidas pela interpolação desses dois extremos através de uma reta dada pela Equação 3.6.

$$p_{\alpha} = \frac{2r_{\alpha}}{N_{pop}(N_{pop} - 1)} \quad \text{Equação 3.6}$$

onde N_{pop} é a posição do melhor valor da função aptidão, $N_{pop} - 1$ o pior valor da função aptidão do *rank*, α é o indivíduo e r_{α} o valor no *rank*.

- Seleção da roleta: este método de seleção foi proposto por Holland em 1975, e ainda hoje é um dos mais implementados. É comparado com um esquema de escolha realizado através de sorteio de uma roleta em que cada indivíduo representa de forma proporcional seu grau de aptidão, ou seja, os indivíduos que tem melhor grau de aptidão recebem uma parcela maior na roleta, e os que têm menor aptidão uma parcela menor na roleta. A probabilidade de seleção p_i de um indivíduo com aptidão F_i , em uma população de tamanho N_{pop} está mostrada na Equação 3.7.

$$p_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^{N_{pop}} F_i} \quad \text{Equação 3.7}$$

A partir da Equação 3.7 calcula-se a probabilidade acumulada q_i de cada indivíduo, como mostra a Equação 3.8.

$$q_i = \sum_{j=1}^i p_j \quad \text{Equação 3.8}$$

Durante o processo de seleção gira-se a roleta N_{pop} vezes, elegendo os indivíduos que irão fazer parte da nova população. Girar a roleta significa que será gerado aleatoriamente um número $r \in [0,1]$. Se $r \leq q_i$ diz-se que o primeiro indivíduo foi selecionado, de outra forma é selecionado o i -ésimo indivíduo, de tal forma que $q_{i-1} < r < q_i$. A Tabela 3-1 e a Figura 3-2 apresentam um exemplo de utilização desse método de seleção.

Tabela 3-1 – Seleção Roleta.

População	f(x)	pi	qi	r	Nova População
1	169	0,14	0,14	0,30	2
2	576	0,49	0,63	0,88	4
3	64	0,06	0,69	0,35	2
4	361	0,31	1,00	0,11	1
$\sum f(x)=1170$					

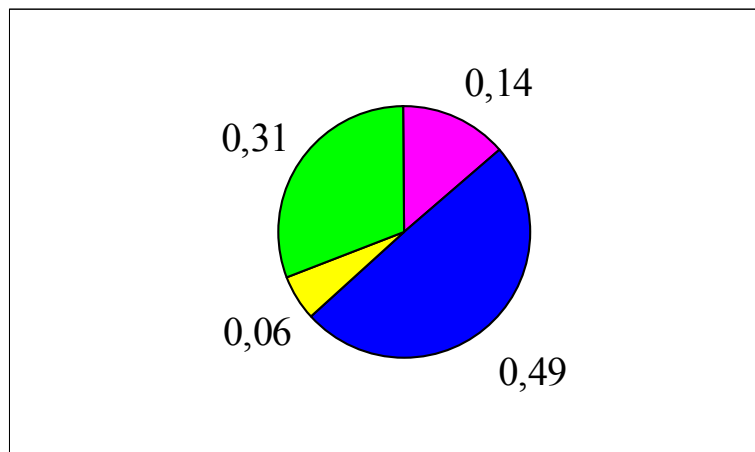


Figura 3-2 – Seleção pelo Método da Roleta
Fonte: GOLDBERG, (1989)

Esse método de seleção pode gerar problemas como convergência prematura.

- Seleção por torneio: tem a idéia de promover um torneio entre um grupo de N indivíduos de uma população escolhidos de forma aleatória, no qual o indivíduo que tem a melhor aptidão é selecionado para a população intermediária. O processo se repete até completar a população intermediária.

3.8 OPERADORES GENÉTICOS

Os operadores genéticos têm a finalidade de transformar a população ao longo de suas gerações, melhorando as características de aptidão adquirida nas gerações anteriores. Portanto são extremamente importantes à medida que diversifica o espaço de busca, possibilitando a exploração de diferentes pontos do domínio do problema. Os principais operadores são cruzamento (ou *crossover*) e mutação.

3.8.1 Operador Cruzamento (*crossover*)

O cruzamento na biologia significa misturar os cromossomos de dois pais gerando um novo cromossomo com características de ambos os pais. No AG o procedimento é o mesmo, ou seja, combina-se parte de dois indivíduos aleatoriamente de grupos de pais em potencial permitindo que seus descendentes herdem seus materiais genéticos.

O cruzamento é aplicado com uma determinada probabilidade para cada par de cromossomos selecionados. Isso na prática denomina-se taxa de cruzamento P_c que varia entre 60% e 90% podendo ocorrer ou não o cruzamento.

Este operador pode ser utilizado de várias formas, onde as mais empregadas são:

- Cruzamento de um ponto: é o operador mais clássico dentro dos algoritmos genéticos. Sua função é selecionar aleatoriamente um ponto de cruzamento e a partir deste ponto são feitas as trocas de informações genéticas dos pais, promovendo a recombinação de material genético entre eles, gerando os filhos. O exemplo abaixo ilustra bem este procedimento (Figura 3-3).

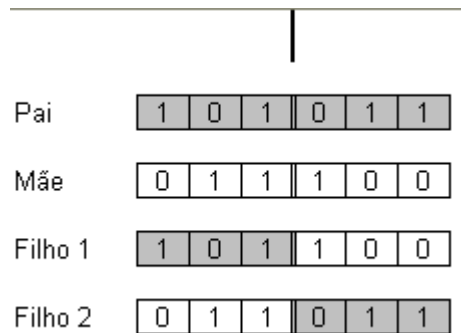


Figura 3-3 – Cruzamento *de um ponto*

- Cruzamento de multipontos: é a generalização de idéias de trocas de material genético usando mais de um ponto, como mostra a Figura 3-4.

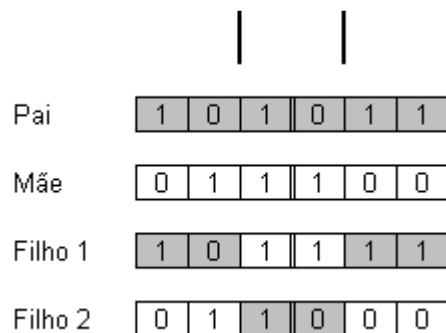


Figura 3-4 – Cruzamento de multipontos

- Cruzamento uniforme: para este caso, cada par de pais é gerada uma máscara de bits aleatórios que indicarão a troca do material genético. A codificação dos filhos é

obtida pela troca ou não de bits dos pais. Se a máscara tiver o bit 1 acontecerá a troca que corresponde à sua posição, se for o bit 0 não ocorrerá nada (Figura 3-5).

Máscara	1	1	0	0	0	1
Pai	1	0	1	0	1	1
Mãe	0	1	1	1	0	0
Filho 1	1	0	1	1	0	1
Filho 2	0	1	1	0	0	0

Figura 3-5 – Cruzamento de multipontos.

3.8.2 Operador mutação

O operador mutação tem a finalidade de introduzir e manter a diversidade genética de uma população, alterando de forma arbitrária um ou mais componentes de uma dada estrutura. Assim sendo, a mutação assegura que a probabilidade de examinar qualquer ponto do espaço de busca nunca seja zero, e também contorna o problema de mínimos locais.

Esse operador é aplicado a indivíduos com uma probabilidade dada pela taxa de mutação P_m que deve ser pequeno ($0,001 \leq P_m \leq 0,1$). Esta probabilidade refere-se ao total de bits da população que deverá ser mutacionada.

Além de permitir que o algoritmo faça buscas em diferentes regiões do espaço, o processo de mutação protege o algoritmo da perda de material genético potencialmente útil pela aplicação dos operadores reprodução e recombinação (SOUZA JR., 2005).

O operador de mutação muda os valores dos bits, ou seja, inverte o valor de um dado bit de 1 para 0 e vice-versa. O exemplo desse operador é ilustrado na Figura 3-6.

Indivíduo	0	1	1	1	0	0	1	1
Indivíduo mutado	0	1	1	1	0	0	1	0

Figura 3-6 – Exemplo de mutação.

3.9 CRITÉRIOS DE PARADA

Existem vários critérios de parada que são utilizados pelos AGs. Dentre eles, os principais encontrados na literatura são:

- Quando o AG atingir um dado número de gerações (ou avaliações), interrompe-se o processamento;
- Se o valor ótimo da função objetivo for conhecido, o critério de parada é a chegada a este valor durante o processamento;
- Convergência, isto é, quando não ocorre melhoramento significativo no cromossomo de maior aptidão por um dado número de gerações, para-se o processamento.

3.10 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM OS AGs

Um dos aspectos mais importantes nos algoritmos genéticos são as escolhas das configurações adequadas de seus parâmetros, taxa de cruzamento, taxa de mutação e tamanho da população, pois disto depende a sua eficiência.

O tamanho da população indica o número de indivíduos de cada população que é normalmente constante durante a evolução. O tamanho também afeta o desempenho global e a eficiência dos AGs, pois influencia na identificação das soluções ótimas. Um tamanho de população alto tem a tendência de levar a uma diversidade de indivíduos, pois a cobertura do espaço de busca é mais representativa e auxilia na prevenção de problemas de convergência prematura. No entanto, são necessários maiores recursos computacionais, pois quando se trabalha com grandes populações o tempo de processamento aumenta. Assim, uma população pequena pode ter seu desempenho afetado de forma significativa, pois a cobertura do espaço de busca é limitada, havendo, conseqüentemente, uma grande chance do algoritmo genético não conseguir obter a solução ótima global.

Com relação à taxa de cruzamento, se o valor for muito baixo, a convergência do algoritmo por ser muito lenta. Quando essa taxa for maior, serão introduzidas novas estruturas mais

rapidamente na população, mas se essa taxa for demasiadamente alta, podem ocorrer perdas de indivíduos com boas aptidões, pois a quebra desses indivíduos pode acarretar perda de material genético.

A mutação é empregada para se fornecer novas informações dentro das populações, prevenindo que as mesmas se saturem com indivíduos que sejam parecidos à medida que visa aumentar sua diversidade populacional e possibilitar uma maior área do espaço de busca. Se essa taxa for muito alta a busca se torna essencialmente aleatória e pode vir a destruir bons indivíduos.

3.11 TRATAMENTO DAS RESTRIÇÕES

Na engenharia, problemas com restrições em algoritmo genético tem sido tratado com certa atenção. É óbvio que o tratamento adequado das restrições do problema também é um ponto crítico, não só devido às restrições delimitarem o espaço de busca, mas também porque um bom tratamento das mesmas pode melhorar a eficiência do algoritmo genético.

Muitas técnicas de tratamento para restrições são encontradas na literatura, podendo ser agrupadas através do tipo de algoritmo, tipo de restrições e tipo de problema. Na maioria das vezes as estratégias estão associadas a algum tipo de procedimento, como a utilização de funções penalidades, de operadores especiais de técnicas de otimização multiobjetivo, de métodos de co-evolução, operadores de reparo, entre outros. Abaixo estão abordadas as principais técnicas para tratamento de restrições.

- **Estratégia de rejeição:** é caracterizada por descartar as soluções ineficazes criadas ao longo do processo de otimização, ou seja, são aquelas que não satisfazem alguma restrição. Esta forma de estratégia pode trabalhar razoavelmente bem uma vez que seu espaço de busca seja convexo, de outra forma pode apresentar em muitos casos dificuldades nos problemas de otimização.
- **Estratégia de reparação:** reparar um indivíduo consiste basicamente em transformar esse indivíduo ineficaz em eficaz através de uma estratégia de reparação que é fortemente dependente do problema em questão. Essa estratégia depende do processo determinístico de reparação que possibilita a conversão de filhos

infectíveis em filhos factíveis. Ainda relevante lembrar que, em muitos problemas de otimização, o processo de reparação de indivíduos infectíveis pode ser tão complexo quanto à solução do problema original, que de certa forma inviabiliza o emprego dessa técnica.

- Estratégia de penalidade: é normalmente encontrada em problemas que possuem número razoavelmente elevado de restrições, isso por que nesse caso, um grande número de soluções infectíveis compõe a população. Tais casos, soluções factíveis são difíceis de serem geradas se a pesquisa genética for confinada dentro das regiões factíveis. Assim sendo, a estratégia de penalidade é um tipo de técnica que trabalha com soluções infectíveis durante o processo de otimização.

3.12 FUNÇÃO PENALIDADE

A grande dificuldade no uso do algoritmo genético é como escolher a função penalidade a ser utilizada no problema de otimização, pois a função penalidade deve acelerar a convergência, evitando que o término seja prematuro. Essa técnica é usada para manter certa quantidade de soluções infectíveis em cada geração, a fim de guiar a pesquisa genética para uma solução ótima. Portanto a questão é encontrar a maneira mais adequada de se quantificar a violação das restrições em termos das penalidades, ou seja, os indivíduos de uma determinada população que não respeitarem uma determinada restrição serão penalizados, tendo sua avaliação dada pela função aptidão diminuída desta penalidade.

O principal objetivo para se formular uma função penalidade é que ela possa conduzir efetivamente a busca em direção a sub-regiões promissoras do espaço de solução. Segundo Gen e Geng (1997) *apud* Oliveira (2004) existem duas maneiras de se construir a função de aptidão com uma parcela relativa à penalização. As Equações 3.9 e 3.10 mostram essas duas maneiras:

$$F(x) = f(x) + pen(x) \quad \text{Equação 3.9}$$

onde $f(x)$ é a função objetivo do problema e $pen(x)$ é a função penalidade.

Nesta situação, se x for factível, $pen(x) = 0$, do contrário $pen(x) > 0$.

$$F(x) = f(x) \times pen(x)$$

Equação 3.10

Neste caso, se x for factível, $pen(x) = 1$, do contrário, $pen(x) > 1$.

3.13 VANTAGENS DO AGs

Os algoritmos genéticos têm sido empregados em problemas complicados de otimização. As principais vantagens desse método são:

- Funcionam tanto como parâmetros contínuos como discretos ou uma combinação dos dois;
- Realizam buscas simultâneas em várias regiões do espaço de busca (pois trabalham com uma população e não um único ponto);
- Utilizam informações de custo ou recompensa e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
- Não é necessário conhecimento matemático aprofundado do problema considerado;
- Otimizam um número grande de variáveis;
- Otimizam parâmetros de funções objetivos com superfícies complexas e complicadas, reduzindo a incidência de mínimos locais;
- Adaptam-se bem a computadores paralelos;
- Trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros;
- Fornecem uma lista de parâmetros ótimos e não uma simples solução;

- Trabalham com dados gerados experimentalmente e são tolerantes a ruídos e dados incompletos;
- São fáceis de serem implementados em computadores;
- São modulares e portáteis, no sentido que o mecanismo de evolução é separado da representação particular do problema considerado. Assim, eles podem ser transferidos de um problema para outro;
- São flexíveis para trabalhar com restrições arbitrárias e otimizar múltiplas funções com objetivos conflitantes;
- São também facilmente hibridizados com outras técnicas heurísticas e determinísticas.

3.14 DESVANTAGENS DOS AGs

- Dificuldade de achar o ótimo global exato;
- Requer um grande número de avaliação da função aptidão;
- Grandes possibilidades de configurações, o que pode complicar a resolução do problema tratado.

CAPÍTULO 4

ALGORITMO GENÉTICO APLICADO A ESTRUTURAS PLANAS DE MADEIRA

4.1 VARIÁVEIS DE PROJETO

Para que a representação de um problema vise uma solução que contenha o Algoritmo Genético (AG) como meio de resolução, é necessário que haja inicialmente a identificação das constantes e das variáveis de projeto, seus limites, e que a função objetivo seja definida. Essa representação pode ser feita de forma binária e real. Sendo as variáveis do problema em estudo discretas, a forma escolhida para a representação foi a real, devido a facilidade na interpretação do código do programa computacional.

A função objetivo de minimização depende das seguintes constantes de projeto:

- C: comprimento da cobertura;
- L: largura da cobertura;
- H: altura dos pilares;
- Propriedades físicas e mecânicas dos materiais.

- m_i : (sendo $m_i \cdot L$ igual ao comprimento do módulo i e $2 \sum_{i=1}^{m/2} m_i = 1,00$, onde m é o número total de módulos da treliça);

E das seguintes variáveis de projeto:

- θ : ângulo de inclinação da treliça;
- A : área da seção transversal (pode ser definida pelo usuário ou as disponíveis no mercado).

Se o parâmetro da área (A) for definido pelo usuário, o mesmo assumirá dois valores distintos, um para a base (b) e outro para a altura (h), ficando assim com duas variáveis. Mas, se o parâmetro da área (A) assumir os valores cadastrados no banco de dados do programa, haverá então, somente uma variável, a posição da seção transversal no banco de dados.

4.2 FUNÇÃO OBJETIVO

Neste trabalho, a função objetivo que será minimizada está na escolha do tipo de treliça que consuma o menor volume de peças de madeira. Para tanto, a Equação 4.1 define os parâmetros necessários os cálculos da função objetivo.

Função objetivo – consumo do volume de madeira

$$f = L \times A \quad \text{Equação 4.1}$$

$$\text{onde } L = \sum_{i=1}^n l_i$$

A Figura 4-1 ilustra um exemplo de treliça com suas constantes e variáveis.

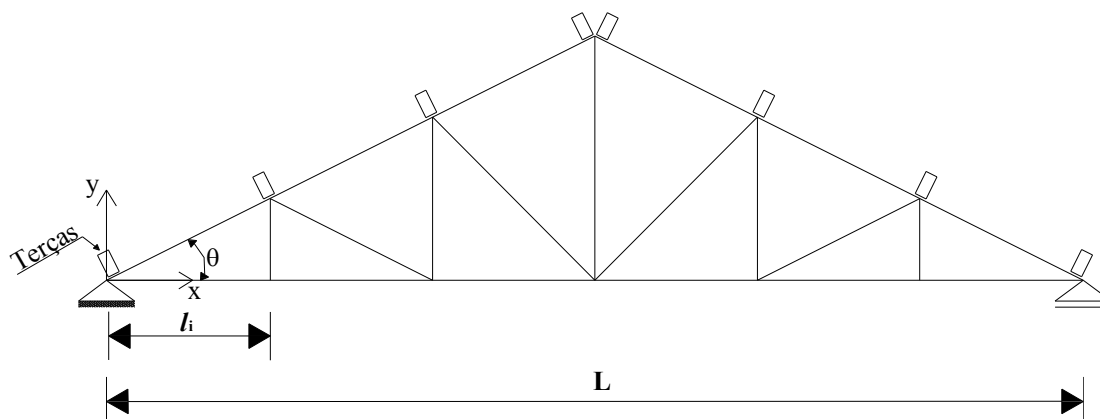


Figura 4-1 – Exemplo de treliça com suas constantes e variáveis

4.3 FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO GENÉTICO

Para se ter uma boa eficiência dos operadores genéticos utilizados nos AGs, trabalhando de forma adequada, é necessário que as soluções de problemas empregando o algoritmo genético exijam que suas variáveis de projeto estejam bem representadas. Neste trabalho, adotou-se trabalhar com as seguintes variáveis de projeto: m , θ e A , em representação real. O modelo que será estudado neste trabalho permitirá que se use tanto o banco de dados contendo as seções transversais de madeira encontradas no mercado, como também permitirá que sejam adotados valores para a largura e altura da seção transversal dos elementos.

Dessa forma, já definidas as variáveis de projeto, passa-se para o segundo passo que será criar um espaço de busca, isto é, os possíveis valores que serão assumidos pelas variáveis. É nessa etapa que o usuário fornece os valores exigidos pelo programa de otimização OTP, que são os seguintes: o número de módulos na direção x ($m_{\max}$) e os ângulos de inclinação máximo e mínimo ($\theta_{\max}$ e $\theta_{\min}$). Foi introduzido no programa OTP um banco de dados com algumas seções transversais, que podem ou não ser usadas pelo usuário, ou o usuário do programa pode definir os valores para a seção transversal desejada. Foram introduzidos também as propriedades físicas e geométricas da madeira que são necessárias para o cálculo do dimensionamento das peças.

A distância entre uma terça e outra, pode ser feita assumindo valores de forma aleatória, portanto, é necessário que seja fornecido ao algoritmo um comprimento máximo para as peças de madeira. Essa restrição do tamanho máximo da peça vai evitar que o algoritmo

perca tempo fazendo buscas em regiões do espaço de busca inviáveis. Contudo, o menor valor que a variável m poderá assumir é obtido pela Equação 4.2.

$$m_{\min} = \frac{L}{2l_{\max}} \quad \text{Equação 4.2}$$

onde L é o comprimento total da treliça, $l_{\max}$ é o comprimento parcial entre um montante e outro.

Para se ter um melhor entendimento do funcionamento do programa em uma visão global, é mostrado no exemplo abaixo alguns valores adotados para a execução do software. A Figura 4-2 ilustra a tela principal do programa de otimização computacional OTP.

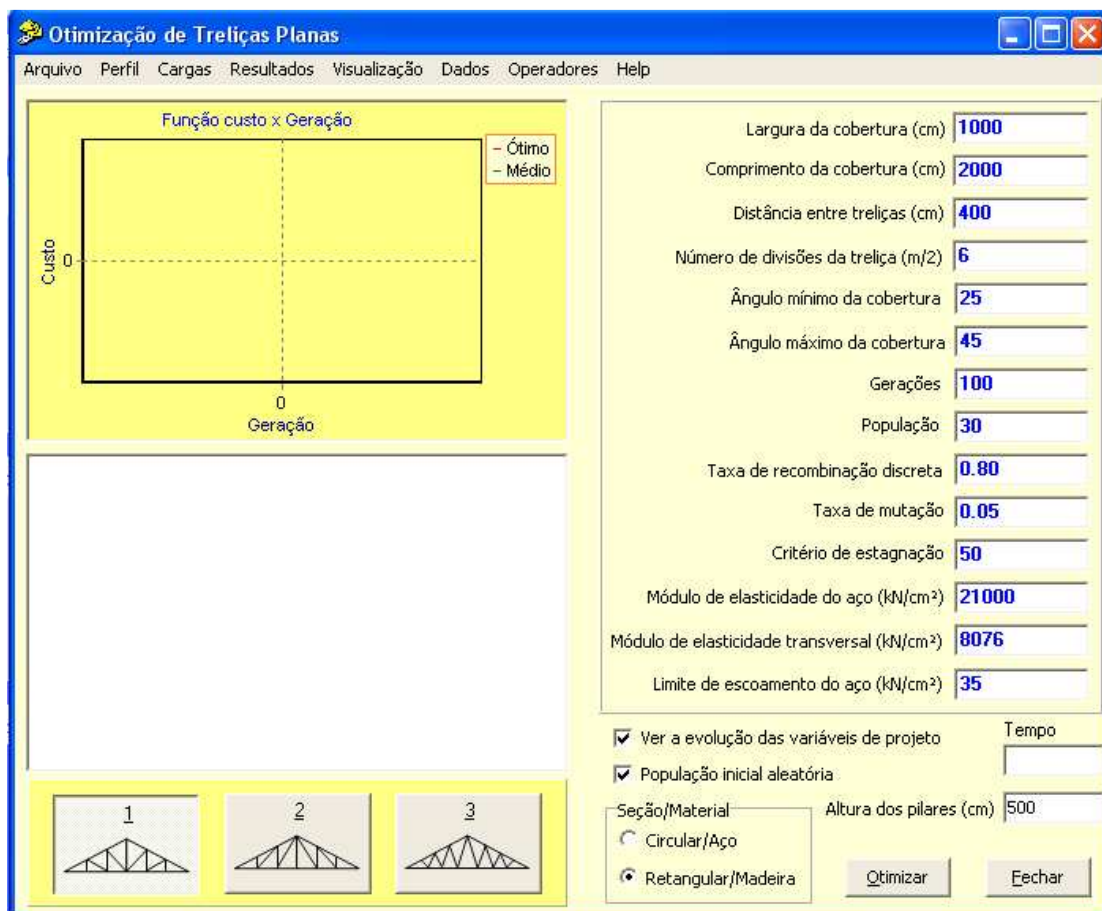


Figura 4-2 – Tela principal do programa de otimização computacional – OTP

Adotou-se, portanto, um comprimento da cobertura de $C=1000\text{cm}$, uma largura da cobertura de $L=2000\text{cm}$ e a altura dos pilares de $h=500\text{cm}$. Ainda foi fornecido ao AG os

valores de $m_{\max} = 12$, onde $m = m/2 = 6$, $\theta_{\max} = 45^\circ$ e $\theta_{\min} = 25^\circ$, gerando o seguinte espaço de busca.

m	6	8	10	12
posição	1	2	3	4

θ	25	26	27	28	29	30	...	40	41	42	43	44	45
posição	1	2	3	4	5	6	...	16	17	18	19	20	21

Para os valores assumidos pelo parâmetro da área da seção transversal (A), o número máximo cadastrado no banco de dados é de 1 a 7. Lembrando, portanto, que o usuário tem liberdade para inserir os valores que desejar às dimensões da peça que o mesmo deseja utilizar em seu projeto.

A (b×h)	5×5	5×7	5×11	5×15	8×20	8×25	8×30
posição	1	2	3	4	5	6	7

Simulando um funcionamento dos AGs será usada uma população de 5 indivíduos. Sendo que a inicialização dos parâmetros será aleatória.

	m	θ	A (b×h)
$I_1 =$	6	25	1
posição	1	2	3

	m	θ	A (b×h)
$I_2 =$	8	25	5
posição	1	2	3

	m	θ	A (b×h)
$I_3 =$	10	30	3
posição	1	2	3

	m	θ	A (b×h)
$I_4 =$	10	35	2
posição	1	2	3

	m	θ	A (b×h)
$I_5 =$	12	25	4
posição	1	2	3

Dessa forma, para cada valor assumido pelos indivíduos os valores da função objetivo são apresentados usando a Equação 4.1, que são:

$$f(I_1) = 25.000$$

$$f(I_2) = 160.000$$

$$f(I_3) = 55.000$$

$$f(I_4) = 35.000$$

$$f(I_5) = 200.000$$

Associada à função objetivo tem-se a função avaliação, que tem por finalidade associar um valor numérico, chamado de índice de aptidão, a cada indivíduo da população. Essa função deve ter o cálculo sempre de forma rápida para que a mesma consiga fazer a avaliação de todos os indivíduos da população, o que faz com que gere um esforço computacional muito grande.

Como se trata de um processo de minimização, o cálculo do índice de aptidão (a) é feito usando a Equação 4.3:

$$a_i = \frac{F}{f_i} \quad \text{Equação 4.3}$$

onde F é o somatório das funções objetivo, e f_i a função objetivo de cada indivíduo.

Portanto tem-se o seguinte valor dos índices de aptidão de cada indivíduo com um

$$F = \sum_{i=1}^5 f(I_i) = 475.000 :$$

$$a_1 = 19$$

$$a_2 = 2,98$$

$$a_3 = 8,63$$

$$a_4 = 13,57$$

$$a_5 = 2,37$$

A probabilidade de seleção de cada indivíduo foi determinada usando a definição de que essa probabilidade é proporcional ao índice de aptidão, como mostra a Equação 4.4:

$$p_i = \frac{a_i}{S_i} \quad \text{Equação 4.4}$$

sendo que a_i é o índice de aptidão de cada indivíduo da população, e S_i é o somatório desse índice.

Portanto, têm-se os seguintes valores de probabilidade para cada indivíduo com

$$S = \sum_{i=1}^5 a(I_i) = 46,55.$$

$$p_1 = 0,41 \quad p_2 = 0,064 \quad p_3 = 0,185 \quad p_4 = 0,29 \quad p_5 = 0,051$$

Dos indivíduos gerados acima, o que melhor apresentou índice de adaptação foi o indivíduo (I_1), que possui o menor valor da função objetivo.

A próxima etapa é indicar a posição das terças, peso próprio e ação do vento. Contudo, a ação do vento e o carregamento permanente da peça, são gerados automaticamente pelo programa de otimização. As Figuras 4.3 e 4.4 mostram a tela de definição do carregamento da estrutura.

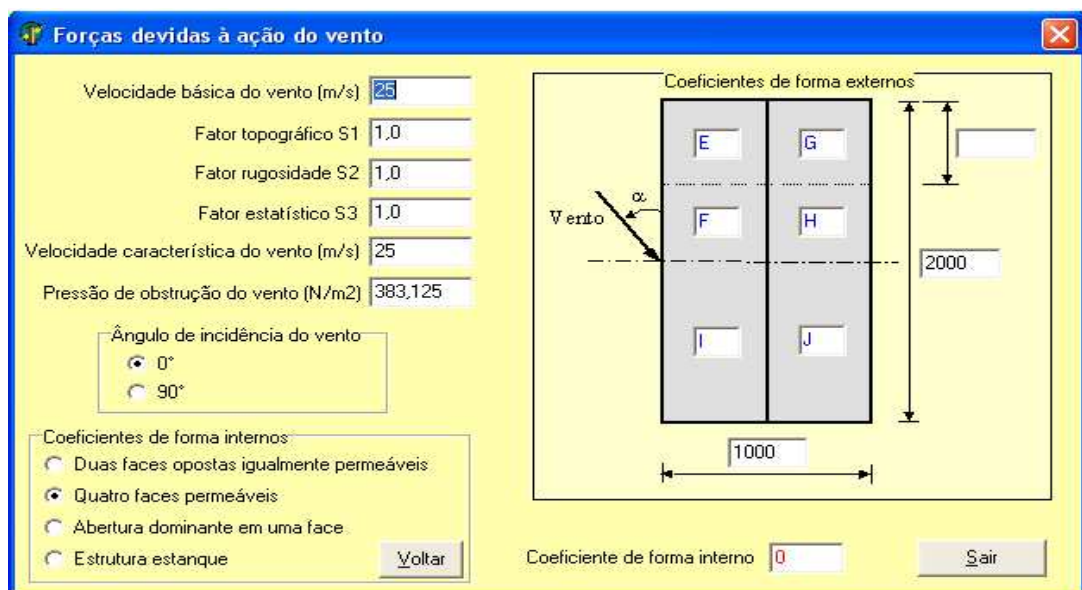


Figura 4-3 – Tela de entrada para a definição da ação do vento.

Peso Próprio

☐ Personalizar posição das terças

Peso da telha (N/m²) 250

Sobrecarga (N/m²) 250

Posição das Terças

N° Carga	Eixo x (cm)
1	

Fechar

Figura 4-4 – Tela de entrada do peso próprio das telhas e posição das terças.

Na tela de entrada da ação do vento, aparece uma tela que o usuário deve escolher para a determinação dos coeficientes de forma interno. Essa escolha pode ser feita para quatro casos específicos: duas faces opostas igualmente permeáveis, quatro faces permeáveis, abertura dominante em uma das faces e estrutura estanque. De acordo com a escolha do usuário, abrirá outra tela ou não. Se por exemplo o usuário escolher as “duas faces opostas igualmente permeáveis” o software abrirá a seguinte tela, como mostra a Figura 4-5.

Duas faces igualmente permeáveis

☒ Vento perpendicular a 1 face permeável

☐ Vento perpendicular a 1 face impermeável

Figura 4-5 – Ilustração da tela “duas faces igualmente permeáveis”.

Depois de feita a geração dessas solicitações, passa-se para a escolha da estrutura que se deseja otimizar, determinando suas propriedades físicas, que já estão arquivadas e são geradas automaticamente quando se escolhe o tipo de madeira e sua classe de resistência. Esses valores estão calculados de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997). A Figura 4-6 ilustra essa tela, mostrando todos os valores de uma madeira do tipo dicotiledônea, classe C-40, com todos os seus coeficientes devidamente majorados conforme a determinação da norma.

A imagem mostra uma janela de software intitulada "Propriedades físicas da madeira". No topo, há dois menus suspensos: o primeiro contém "Dicotiledônea" e o segundo contém "C40". Abaixo, há cinco campos de entrada com os seguintes valores: "Módulo de elasticidade longitudinal (MPa)" com 19500, "Resistência característica f_{cok} (MPa)" com 40, "Resistência característica f_{vok} (MPa)" com 6, "Densidade básica (kg/m^3)" com 750 e "Densidade aparente (kg/m^3)" com 950. Abaixo disso, há uma seção "Coeficientes de ponderação" com seis campos: "Kmod,1" (0.7), "Kmod,2" (1.0), "Kmod,3" (0.8), "Kmod" (0.56), "Gama_g" (1.3) e "Gama_q" (1.4). Na parte inferior, há uma seção "Tipo seção" com duas opções: "Comercial" (selecionada com um botão de rádio) e "Personalizada". À direita, há campos para "Largura (mm)" e "Altura (mm)", cada um com subcampos "Mínima" e "Máxima". No canto inferior direito, há um botão "Fechar".

Figura 4-6 – Ilustração da tela de propriedades físicas da madeira.

Conhecidos todas as propriedades físicas da madeira e propriedades da peça, é feito o cálculo do dimensionamento, verificando se a estrutura melhor adaptada ao problema atende todos os critérios exigidos em norma. Caso isso não ocorra, a estrutura é descartada da população, impondo seu índice de aptidão igual a zero. Neste instante, é dimensionada a segunda estrutura melhor adaptada. Este procedimento é realizado até que uma estrutura passe por todas as recomendações exigidas pela NBR 7190 (ABNT, 1997).

As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 ilustram a configuração de esforços e dos carregamentos impostos à estrutura. É importante ressaltar, que mesmo os carregamentos a serem distribuídos ao

longo de toda a estrutura, foi considerado apenas carregamento aplicado como forças concentradas sobre as terças.

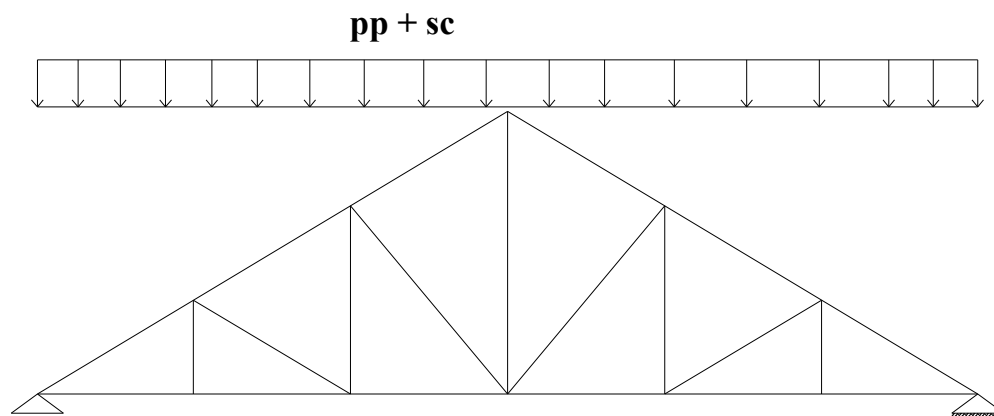


Figura 4-7 – Carregamento da estrutura pela ação do peso próprio (pp) e sobrecarga (sc)

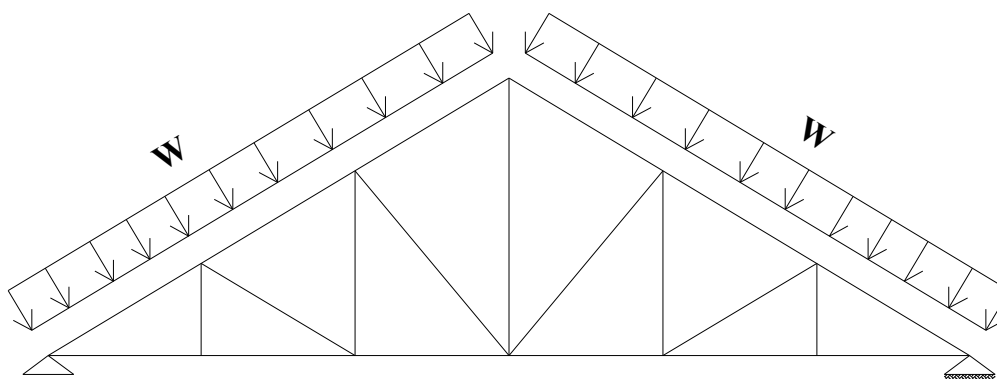


Figura 4-8 – Carregamento da estrutura pela ação do vento.

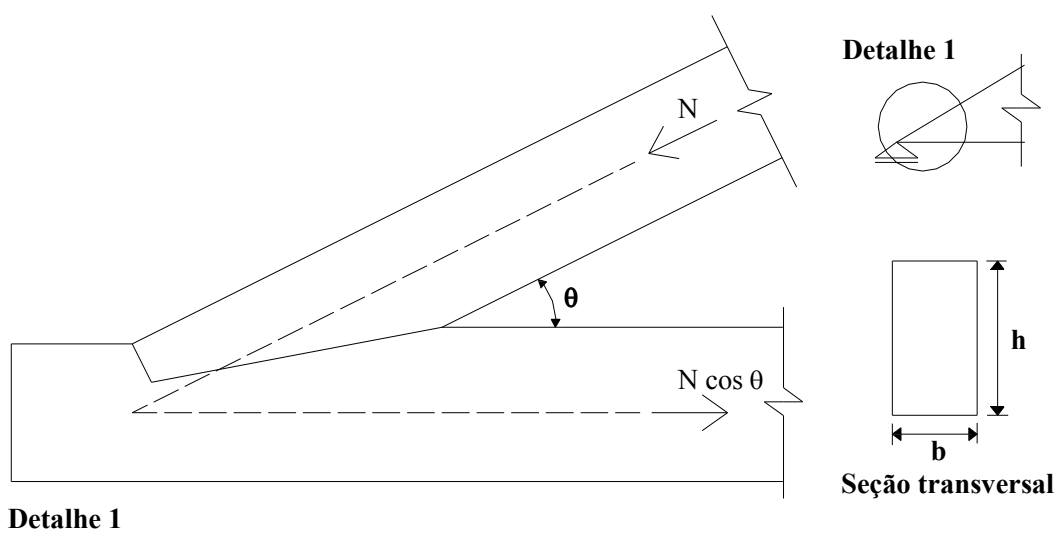


Figura 4-9 – Ilustração dos esforços.

Os parâmetros definidos na Figura 4-7 à Figura 4-9 correspondem às seguintes ações:

- pp – peso próprio da estrutura;
- sc – sobrecarga;
- W – carregamento devido a ação do vento;
- N – esforço normal de compressão;
- θ – ângulo de inclinação da cobertura;
- b – largura da seção transversal;
- h – altura da seção transversal.

Contudo, é esperado que com a configuração da estrutura adotada e com suas dimensões geométricas, a distribuição dos esforços nas peças seja distribuída por toda estrutura. O dimensionamento é feito de forma em que a solicitação da estrutura é menor ou igual a sua resistência, ou seja, é garantir que tenha uma segurança estrutural para que a estrutura não entre em colapso.

Depois de se fazer a avaliação dos indivíduos da população faz-se a seleção dos mesmos, utilizando os métodos de seleção. O método escolhido para ser usado neste trabalho, dentre os muitos métodos vistos no Capítulo 3, é o método da roleta. É na fase da seleção que os indivíduos com maiores valores de probabilidade (p), têm maiores chances de serem escolhidos para as próximas gerações, e os com menores valores tendem a desaparecer nas futuras gerações.

Considera-se que o indivíduo I passou por todos os critérios do dimensionamento, portanto, os valores obtidos para suas probabilidades acumuladas são:

$$\begin{aligned}
 q_1 &= p_1 = 0,41 \\
 q_2 &= p_2 + q_1 = 0,474 \\
 q_3 &= p_3 + q_2 = 0,659 \\
 q_4 &= p_4 + q_3 = 0,949 \\
 q_5 &= p_5 + q_4 = 1,00
 \end{aligned}$$

Sabe-se, contudo que a seleção é feita a partir da escolha de cinco números aleatórios que variam entre 0 e 1, sendo eles iguais a 0,95; 0,19; 0,60; 0,45 e 0,20.

Diante dos números escolhidos, pode-se concluir que os novos indivíduos serão da seguinte forma. O primeiro número é maior que q_4 , isso indica que o indivíduo I_4 foi escolhido. O segundo número é menor que q_1 , indica que o indivíduo I_1 foi escolhido. O terceiro número é maior que q_2 e menor que q_3 , indicando que I_3 foi escolhido. O quarto número é maior que q_1 e menor que q_2 , escolhendo assim o indivíduo I_2 , e por fim, o quinto número é menor que q_1 sendo escolhido o indivíduo I_1 . Sendo excluído o indivíduo I_5 , porque possuía valores de probabilidades menores.

$I'_1 = I_4$	10	35	2
posição	1	2	3

$I'_2 = I_1$	6	25	1
posição	1	2	3

$I'_3 = I_3$	10	30	3
posição	1	2	3

$I'_4 = I_2$	8	25	5
posição	1	2	3

$I'_5 = I_1$	6	25	1
posição	1	2	3

Feita a seleção dos indivíduos que passarão para a próxima geração, são aplicados nesta fase, os operadores genéticos, a recombinação (*crossover*) e a mutação. A recombinação é feita de forma simples, ou seja, esta operação consiste apenas em trocar o material genético

dos indivíduos dois a dois, ressaltando que essa escolha é aleatória. Considerando que seja trocado o material genético apenas dos indivíduos I_2 e I_3 tem-se:

$$I'_2 =$$

6	25	1
1	2	3

$$I'_3 =$$

6	25	1
1	2	3

Admitindo-se que as amostras sejam:

Amostra 1	2	1	1
Amostra 2	1	2	1

Ficando os novos indivíduos da seguinte maneira:

$$I''_2 =$$

10	25	1
1	2	3

$$I''_3 =$$

6	30	1
1	2	3

Passando assim a ficar a nova população:

$$I''_1 =$$

10	35	2
1	2	3

$$I''_2 =$$

10	25	1
1	2	3

$$I''_3 =$$

6	30	1
1	2	3

$$I''_4 =$$

8	25	5
1	2	3

$$I''_5 =$$

6	25	1
1	2	3

O passo seguinte é fazer a mutação, isto é, é alterar o valor de um gene escolhido de forma aleatória dentro do conjunto de genes de toda a população. Esse operador de mutação é

aplicado aos indivíduos com uma probabilidade dada pela taxa de mutação p_m , sendo que o valor dessa taxa é pequeno e indica a quantidade de genes que serão mudados na população. O valor adotado para $p_m = 0,05$, tendo um total de 20 genes e somente um sofrerá a mutação. Dessa forma o gene escolhido foi o da posição em destaque.

$$I''_1 =$$

10	35	2
1	2	3

$$I''_2 =$$

10	25	1
1	2	3

$$I''_3 =$$

6	30	1
1	2	3

$$I''_4 =$$

8	25	5
1	2	3

$$I''_5 =$$

6	25	1
1	2	3

O parâmetro 3 tem um limite que varia de 1 a 7. Assim sendo, gera-se um número aleatório dentro desse intervalo, encontrando um novo valor para esse parâmetro de $n_{var} = 4$, ficando a nova população:

$$I'''_1 =$$

10	35	2
1	2	3

$$I'''_2 =$$

10	25	1
1	2	3

$$I'''_3 =$$

6	30	4
1	2	3

$$I'''_4 =$$

8	25	5
1	2	3

$$I'''_5 =$$

6	25	1
1	2	3

Após ter feito todos os procedimentos anteriores, aplica-se ainda o método do elitismo, em que o melhor indivíduo é inserido na geração seguinte. Esta fase representa o fim de uma iteração, com isso, retorna-se ao cálculo da função objetivo, agora com os novos indivíduos, e repete-se todo o processo até chegar a uma população ótima. A Figura 4-10 ilustra um esquema simplificado do funcionamento do algoritmo genético.

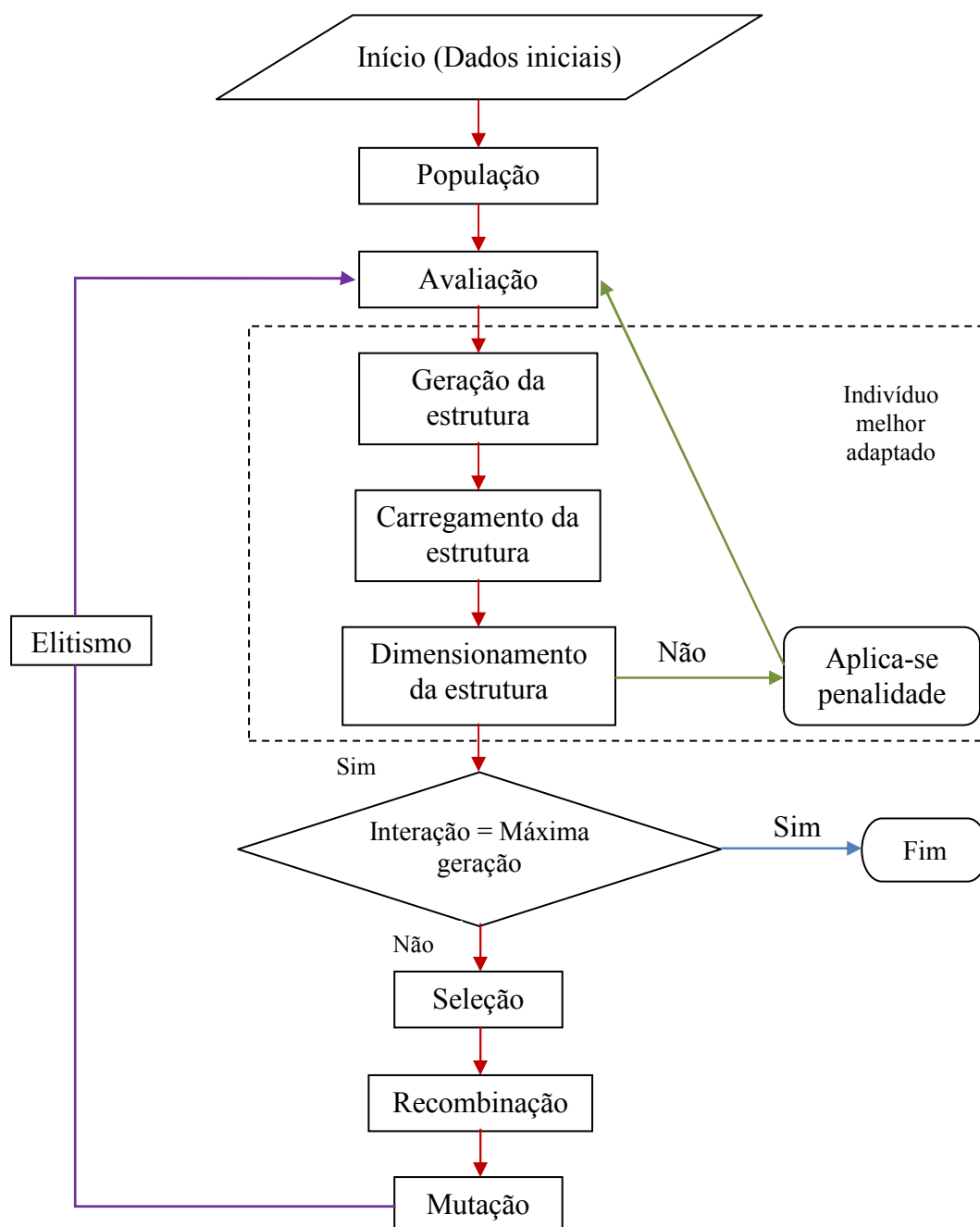


Figura 4-10 – Fluxograma do algoritmo genético implementado.
Fonte: SOUZA (2005).

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE MODELOS ESTRUTURAIS PARA O DIMENSIONAMENTO DE TRELIÇAS DE MADEIRA

5.1 PRELIMINARES

Neste capítulo serão mostrados os resultados obtidos pelas análises aplicadas em três modelos de estruturas de trelças planas, que estão subdivididas em quatro casos. Será feita uma comparação dos valores encontrados, objetivando conhecer a melhor estrutura necessária para as ações aplicadas e as condições impostas.

Para se ter um bom desempenho mecânico da estrutura é importante entender sua configuração estrutural, ou seja, sua geometria. Para tanto, faz-se necessário conhecer de forma detalhada qual a influência das variáveis de projeto pré-estabelecidas para o comportamento estrutural das estruturas em estudo.

Para trelças planas de madeira foi avaliada a influência dos parâmetros do ângulo de inclinação da cobertura e a posição das terças, bem como a distância entre as trelças e a relação do comprimento e largura da área coberta. Portanto, é esperado dessa forma, uma diminuição do volume de madeira para os modelos estruturais estabelecidos, que mostrem uma melhor capacidade de resistir aos esforços solicitantes.

As estruturas treliçadas planas foram modeladas por meio do programa de otimização OTP, onde num processo iterativo de 100 gerações de uma população estimada de 50 indivíduos, foi encontrada a estrutura com a melhor configuração geométrica em função do menor volume das peças de madeira. Esta otimização está diretamente ligada ao comportamento mecânico da estrutura, onde todas as barras da estrutura são dimensionadas de acordo com a ABNT NBR 7190:1997. Numa etapa suplementar o programa de cálculo estrutural GESTRUT auxilia na análise dos dados para a estrutura específica escolhida, onde podem ser avaliados com maior especificidade os esforços solicitantes e deslocamentos máximos, bem como o índice de aproveitamento da seção transversal.

A Tabela 5-1 mostra os valores aplicados aos parâmetros geométricos e as propriedades mecânicas e propriedades do material madeira, comuns aos modelos analisados. Com esses valores, o programa de otimização OTP, fará as iterações, e a cada iteração será selecionado o indivíduo mais apto ao problema de otimização. Tomando os valores de suas variáveis, são gerados os dados geométricos, ou seja, posição dos nós, incidência de barras e restrições de apoio. Após esta etapa, o programa OTP utiliza os valores fornecidos pelo usuário (Tabela 5-2), selecionando no banco de dados os valores dos coeficientes que determinam o carregamento imposto à estrutura que será utilizado para o cálculo do dimensionamento. Todos estes dados são armazenados num arquivo do tipo texto.

Tabela 5-1 – Parâmetros geométricos e propriedades mecânicas dos materiais

Comprimento máximo das peças de madeira	4,00 m
Ângulo mínimo de inclinação	5°
Ângulo máximo de inclinação	35°
Tipo de madeira	Dicotiledônea
Classe da madeira	C60
Modulo de elasticidade da madeira (E)	24500 kN/cm ²
Resistência característica a compressão (f_{ck})	60 MPa
Resistência característica ao cisalhamento (f_{vk})	8 MPa
Seção transversal do pilar de apoio	30 × 30 cm
Módulo de elasticidade do concreto	3500 kN/cm ²

Tabela 5-2 – Valores definidos para o carregamento da estrutura

Peso próprio das telhas	500 N/m ²
Sobrecarga	250 N/m ²
Altura da edificação	5,00 m
Velocidade básica do vento	25,00 m/s
Fator S ₁	1,00
Fator S ₂	1,00
Fator S ₃	1,00
Ângulo de incidência do vento	0°/90°
Quatro faces permeáveis	-

A Tabela 5-3 mostra os valores que foram utilizados pelo programa de otimização OTP para a execução do AG. Nessa execução foram usados como operadores genéticos: seleção (método da roleta), recombinação discreta, mutação uniforme e restrita e elitismo. Definiu-se ainda um critério de parada, ou seja, onde o programa executa o dimensionamento de n números de estruturas e não obtendo uma melhora na função objetivo essa execução é interrompida.

Tabela 5-3 – Valores adotados para os parâmetros do AG

Geração	100
População	50
Taxa de recombinação	0,80
Taxa de mutação	0,05
Critério de estagnação	50

Os valores dos números dos módulos adotados dependerão do vão coberto da estrutura que estará sendo analisada. Sendo o vão de cobertura uma constante de projeto, o valor máximo para a variável m é fornecido pelo usuário.

5.2 VERIFICAÇÃO DO CONSUMO DE MADEIRA E ÍNDICE DE APROVEITAMENTO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DAS ESTRUTURAS SEM DEFINIR A POSIÇÃO DAS TERÇAS

São analisados nesta seção os três casos de trelças planas já determinadas, sem, definir a posição das terças. Neste caso, é admitido que as posições das terças coincidem com os montantes.

Serão otimizados três modelos estruturais variando os valores da largura da cobertura e mantendo fixo o comprimento. A distância entre montantes será variada de forma a encontrar a estrutura que desempenhe bem seu comportamento mecânico e tenha um custo menor, ou seja, que a estrutura tenha um consumo de madeira diminuído, considerando o valor dessas divisões, para que o valor ótimo da função custo seja pequeno.

As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 ilustram os três tipos de trelças.

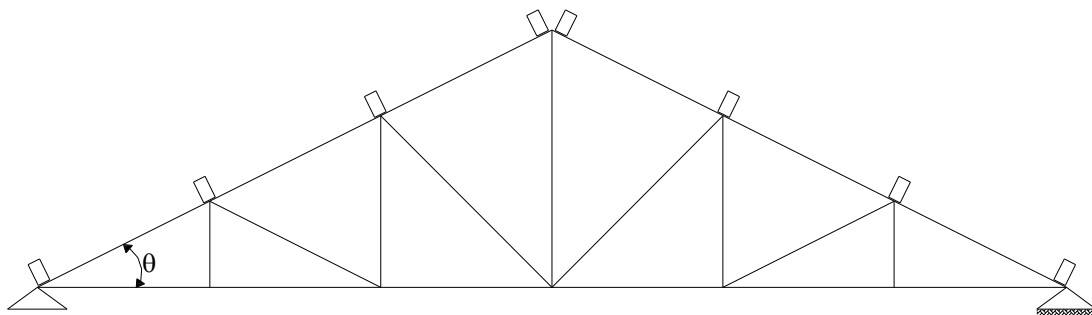


Figura 5-1 – Primeiro caso – treliça Howe

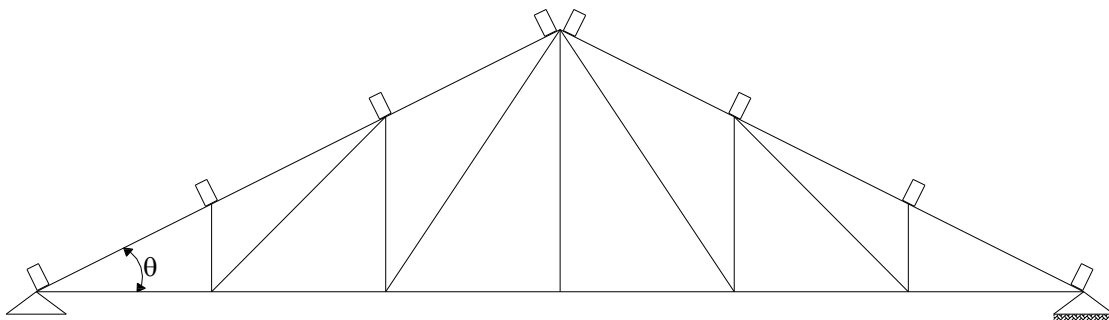


Figura 5-2 – Segundo caso – treliça Pratt

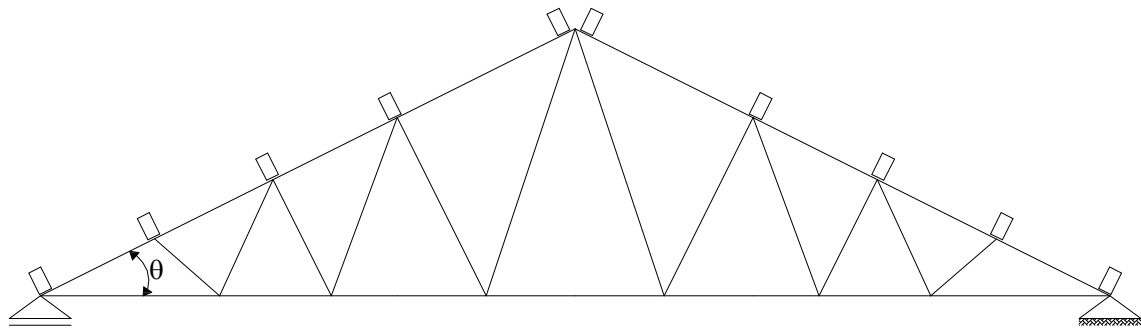


Figura 5-3 – Terceiro caso – treliça Belga

Os modelos analisados são:

- Modelo 1: 10 m × 20 m;
- Modelo 2: 12 m × 20 m;
- Modelo 3: 14 m × 20 m.
- Modelo 4: 15 m × 20 m

Os resultados das análises feitas dos modelos definidos anteriormente estão apresentados nas Tabelas 5.4 até 5.7. O cálculo do aumento do volume de madeira é feito empregando a Equação 5.1.

$$Aumento = \frac{C_i - C_1}{C_1} \cdot 100\% \quad \text{Equação 5.1}$$

onde:

C_i : volumes de madeira consumidos em cada modelo

C_1 : volume de madeira consumido no modelo 1.

5.2.1 Trelça Howe – verificação da análise dos resultados do aumento do volume de madeira

- *Aumento do volume de madeira (%) para número de módulos na direção X ($m = 4$)*

Tabela 5-4 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Howe

Modelos de trelças (m×m)	10×20	12×20	14×20	15×20
Inclinação da cobertura (°)	11	12	10	17
Largura da seção transversal (mm)	50	80	80	80
Altura da seção transversal (mm)	110	200	200	200
Deslocamento da estrutura (cm)	2,90	1,25	2,42	1,05
Volume de madeira (m ³)	0,1660	0,5635	0,6385	0,7235

- *Aumento do volume de madeira (%) para número de módulos na direção X ($m = 5$)*

Tabela 5-5 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Howe

Modelos de trelças (m×m)	10×20	12×20	14×20	15×20
Inclinação da cobertura (°)	23	19	9	12
Largura da seção transversal (mm)	50	50	80	80
Altura da seção transversal (mm)	70	150	200	200
Deslocamento da estrutura (cm)	1,13	1,13	2,92	2,02
Volume de madeira (m ³)	0,1347	0,3426	0,6536	0,7290

- *Aumento do volume de madeira (%) para número de módulos na direção X ($m = 6$)*

Tabela 5-6 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Howe

Modelos de trelças (m×m)	10×20	12×20	14×20	15×20
Inclinação da cobertura (°)	21	17	12	8
Largura da seção transversal (mm)	50	50	80	80
Altura da seção transversal (mm)	70	110	200	200
Deslocamento da estrutura (cm)	1,39	1,87	1,77	4,20
Volume de madeira (m ³)	0,1407	0,2659	0,6979	0,7247

- *Aumento do volume de madeira (%) para número de módulos na direção X ($m = 7$)*

Tabela 5-7 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Howe

Modelos de treliças (m×m)	10×20	12×20	14×20	15×20
Inclinação da cobertura (°)	22	17	9	8
Largura da seção transversal (mm)	50	50	80	80
Altura da seção transversal (mm)	70	150	200	200
Deslocamento da estrutura (cm)	1,26	1,37	2,84	4,21
Volume de madeira (m ³)	0,1449	0,3310	0,7205	0,7453

Os gráficos das Figuras 5.4 a 5.7 ilustram a variação no consumo de madeira nos quatro modelos analisados em função do número de módulos na direção X. A estrutura de referência para o cálculo do aumento do volume de madeira é a estrutura com 4 módulos na direção X.

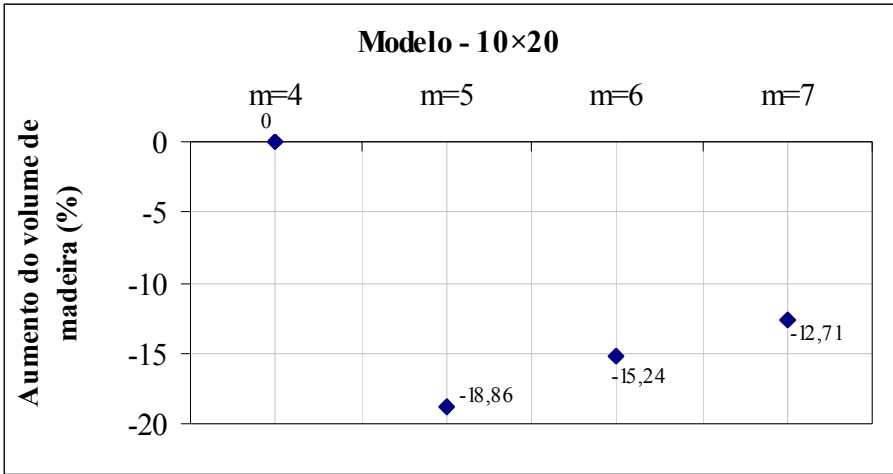


Figura 5-4 – Resultados do aumento do volume de madeira (%) – Modelo 10×20

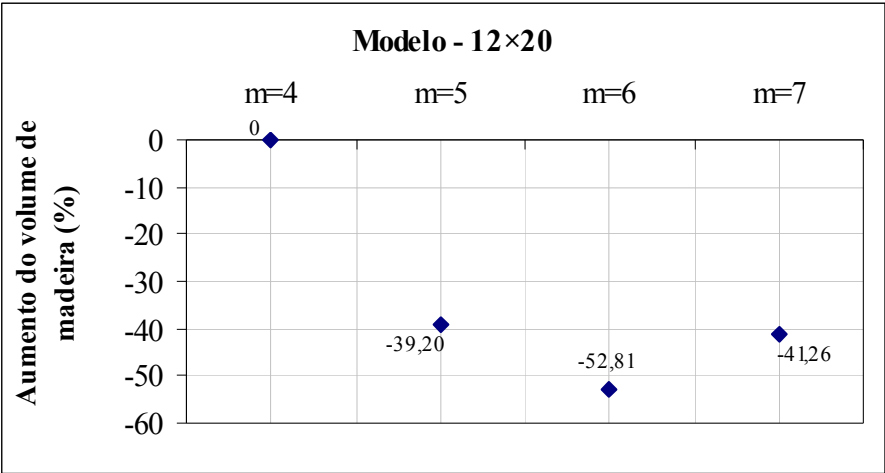


Figura 5-5 – Resultado do aumento do volume de madeira (%) – Modelo 12×20

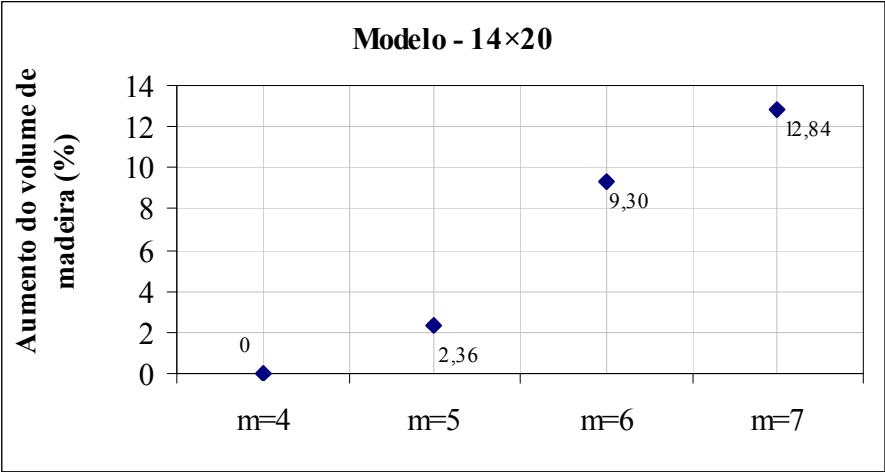


Figura 5-6 – Resultado do aumento do volume de madeira (%) – Modelo 14×20

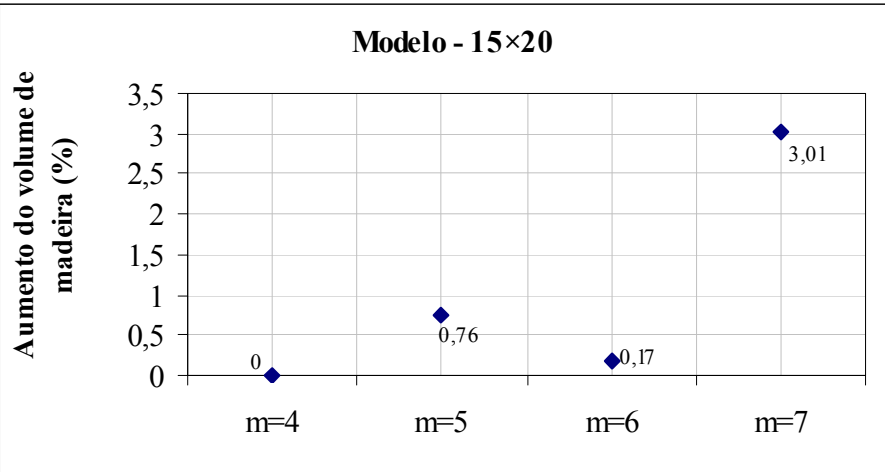


Figura 5-7 – Resultado do aumento do volume de madeira (%) – Modelo 15×20

De acordo com os resultados apresentados nas Tabelas 5.4 a 5.7 e nas Figuras 5.4 a 5.7, o consumo de madeira está simultaneamente associado ao número de módulos na direção X e a seção transversal ótima encontrada para as barras. Percebe-se que o consumo de madeira diminui com o aumento do número de módulos somente quando isto provoca uma redução na seção transversal, caso contrário, o consumo de madeira aumenta, o que é esperado, pois a quantidade de barras aumenta diretamente com o número de módulos. Por fim, para cada modelo analisado existe um número ótimo para a quantidade de módulos na direção X que proporciona o menor consumo de madeira.

5.2.2 Verificação dos resultados do índice de aproveitamento das barras mais solicitadas fornecida pela iteração de n gerações – Treliça Howe

Os cálculos da resistência e estabilidades nas direções X e Y foram realizados de acordo com as especificações da ABNT NBR 7190:97, atendendo as exigências de cálculo para que fosse garantida a segurança da estrutura.

As Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam os valores dos índices de aproveitamento quanto ao dimensionamento à resistência e estabilidades em torno dos eixos X e Y para a barra mais solicitada da estrutura.

- *Resistência*

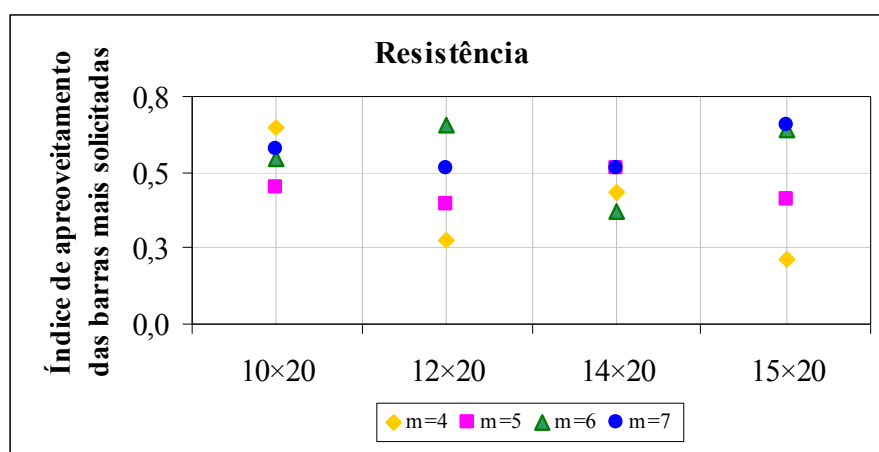


Figura 5-8 – Índice de aproveitamento – Resistência.

- *Estabilidade em X*

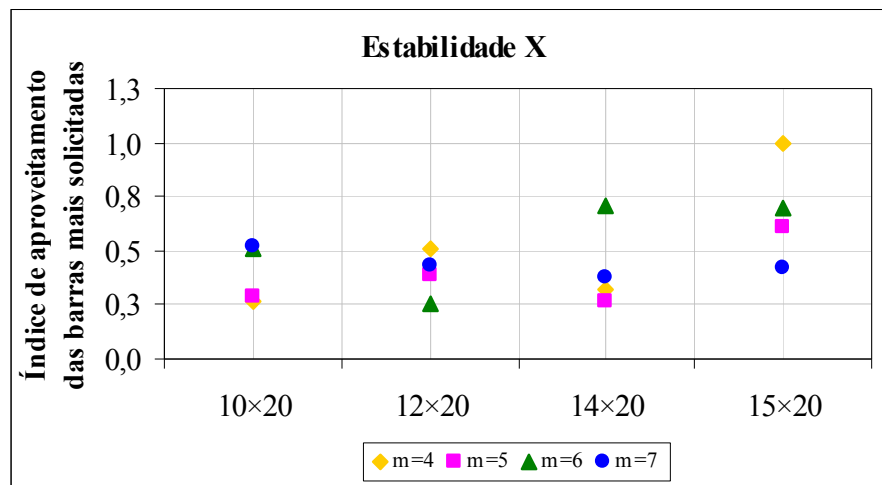


Figura 5-9 – Índice de aproveitamento – Estabilidade X.

- *Estabilidade em Y*

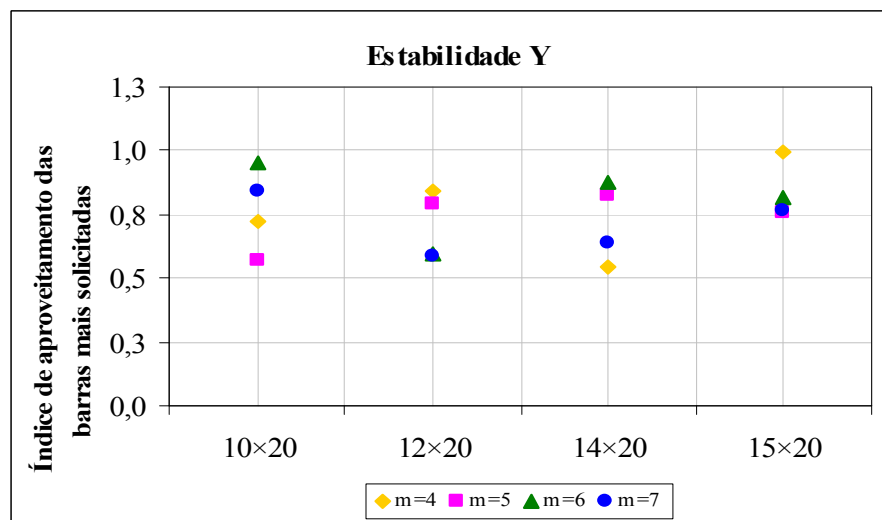


Figura 5-10 – Índice de aproveitamento – Estabilidade Y.

O índice de aproveitamento das seções transversais para a treliça Howe foi obtido por meio do programa computacional GESTRUT. Os resultados ilustrados nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 para os índices de aproveitamento apresentam uma dispersão significativa, o que pode ser explicado pelo fato da variável seção transversal ser discreta e interferir fortemente na otimização da estrutura. Contudo, nota-se que os maiores valores para os índices de aproveitamento estão associados à estabilidade em torno do eixo Y, de menor inércia.

5.2.3 Trelça Pratt – verificação dos resultados do aumento do volume de madeira

As Tabelas 5.11 a 5.14 mostram as estruturas escolhidas pelo programa de otimização OTP que demonstram o menor custo no consumo de madeira.

- *Aumento do volume de madeira (%) para número de módulos na direção X ($m = 4$)*

Tabela 5-8 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Pratt

Modelos de treliças (m)	10×20	12×20	14×20	15×20
Inclinação da cobertura (°)	11	13	12	10
Largura da seção transversal (mm)	50	80	80	80
Altura da seção transversal (mm)	110	200	200	200
Deslocamento da estrutura (cm)	2,90	1,07	1,74	2,82
Volume de madeira (m ³)	0,1660	0,5493	0,6607	0,7038

- *Aumento do volume de madeira (%) para número de módulos na direção X ($m = 5$)*

Tabela 5-9 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Pratt

Modelos de treliças (m)	10×20	12×20	14×20	15×20
Inclinação da cobertura (°)	27	18	12	10
Largura da seção transversal (mm)	50	50	80	80
Altura da seção transversal (mm)	70	110	200	200
Deslocamento da estrutura (cm)	0,89	1,69	2,06	2,81
Volume de madeira (m ³)	0,1478	0,2428	0,6672	0,7326

- *Aumento do volume de madeira (%) para número de módulos na direção X ($m = 6$)*

Tabela 5-10 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Pratt

Modelos de treliças (m)	10×20	12×20	14×20	15×20
Inclinação da cobertura (°)	25	14	18	8
Largura da seção transversal (mm)	50	50	50	80
Altura da seção transversal (mm)	70	110	150	200
Deslocamento da estrutura (cm)	1,02	2,63	1,55	4,16
Volume de madeira (m ³)	0,1560	0,2599	0,4189	0,7596

- *Aumento do volume de madeira (%) para número de módulos na direção X ($m = 7$)*

Tabela 5-11 – Resultados obtidos na otimização da Treliça Pratt

Modelos de treliças (m)	10×20	12×20	14×20	15×20
Inclinação da cobertura (°)	22	23	6	10
Largura da seção transversal (mm)	50	50	80	80
Altura da seção transversal (mm)	70	100	200	200
Deslocamento da estrutura (cm)	1,28	1,10	5,75	2,81
Volume de madeira (m ³)	0,1522	0,3114	0,4055	0,7911

Os gráficos das Figuras 5.11 até 5.14 ilustram como se distribuíram os volumes de madeira para os casos analisados. O valor do volume de madeira tende à aumentar a medida que a seção transversal das peças encontradas e o número de módulos aumentam, fazendo com que o valor do custo aumente.

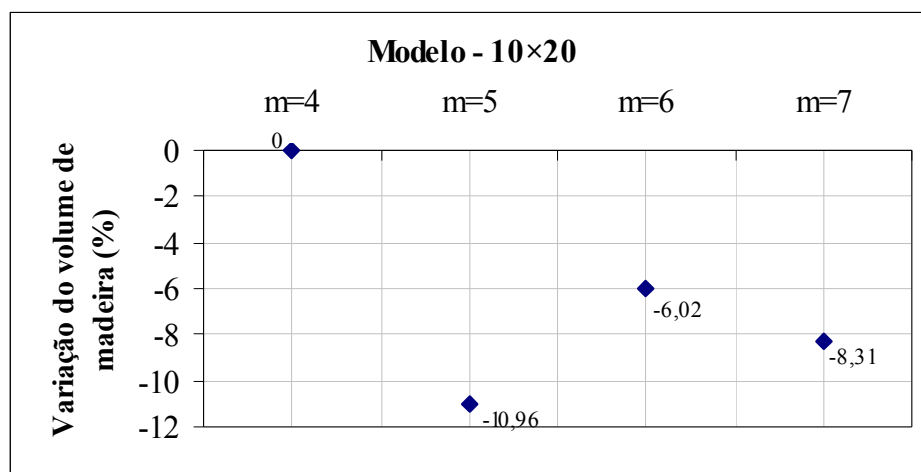


Figura 5-11 – Aumento do volume de madeira (%) – Modelo 10×20.

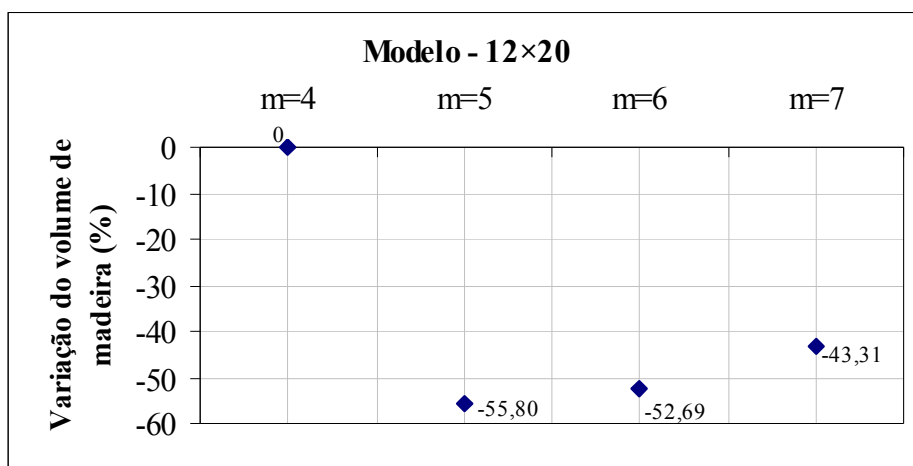


Figura 5-12 – Aumento do volume de madeira (%) – Modelo 12×20.

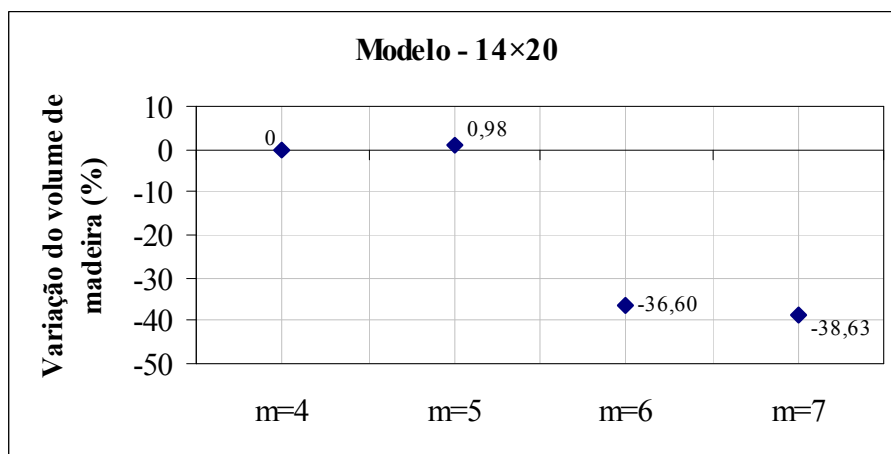


Figura 5-13 – Aumento do volume de madeira (%) – Modelo 14×20.

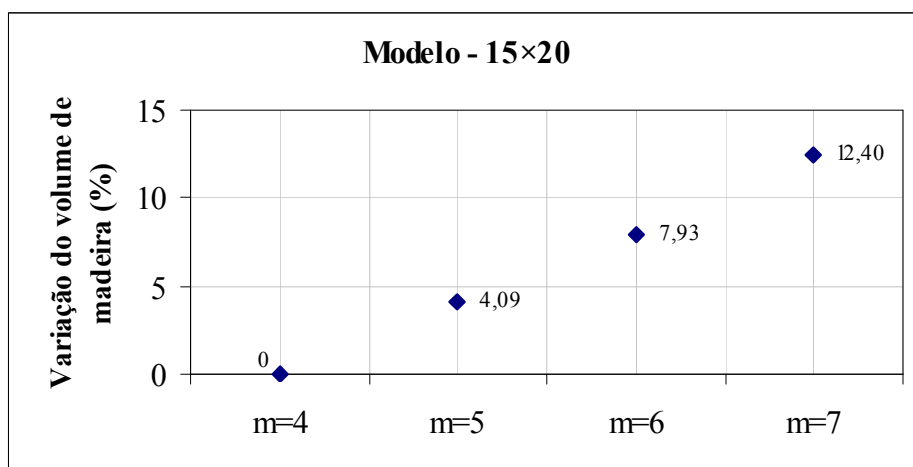


Figura 5-14 – Aumento do volume de madeira (%) – Modelo 15×20.

Como visto na análise feita para a Trelça Howe, os resultados das distribuições dos volumes encontrados para a trelça Pratt, se deram de forma semelhante. Observa-se que quando se aumenta o número de módulos na direção X ocorre uma redução no volume de madeira utilizada para montar a estrutura somente quando há a redução das dimensões da seção transversal.

5.2.4 Verificação dos resultados do índice de aproveitamento das barras mais solicitadas fornecida pela iteração de n gerações – Trelça Pratt

Os cálculos de resistência e estabilidades nas direções X e Y para essa forma de trelça também foram realizados de acordo com as especificações da ABNT NBR 7190:97, atendendo às exigências de cálculo e garantindo a segurança da estrutura. Os valores apresentados nas Tabelas 5.15 a 5.17 representam os valores encontrados para a resistência e estabilidades para a barra mais solicitada em cada modelo de estrutura analisada.

O índice de aproveitamento máximo da seção transversal de cada modelo estrutural está mostrado nos gráficos das Figuras 5.15 a 5.17, onde se observa a dependência em relação ao número de divisões na direção X, tendo como referência a resistência, a estabilidade na direção X e Y das barras.

- *Resistência*

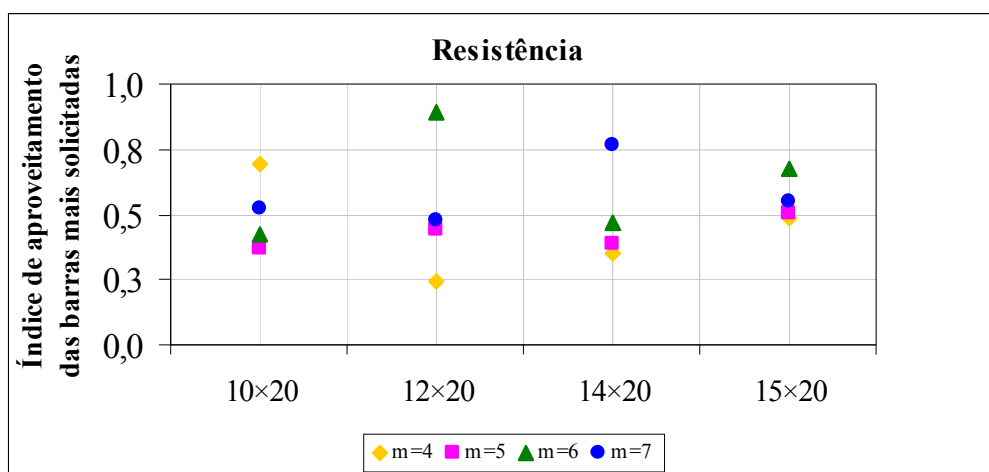


Figura 5-15 – Índice de aproveitamento – Resistência.

- *Estabilidade X*

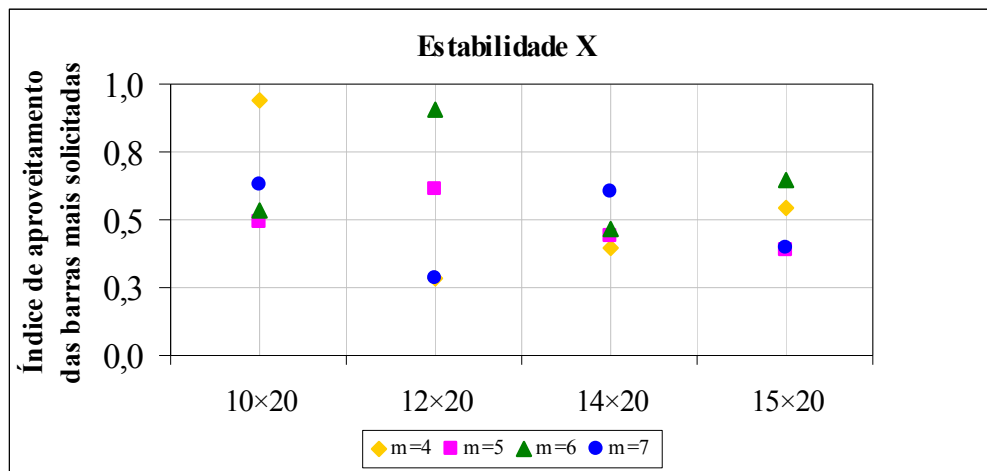


Figura 5-16 – Índice de aproveitamento – Estabilidade X.

- *Estabilidade Y*

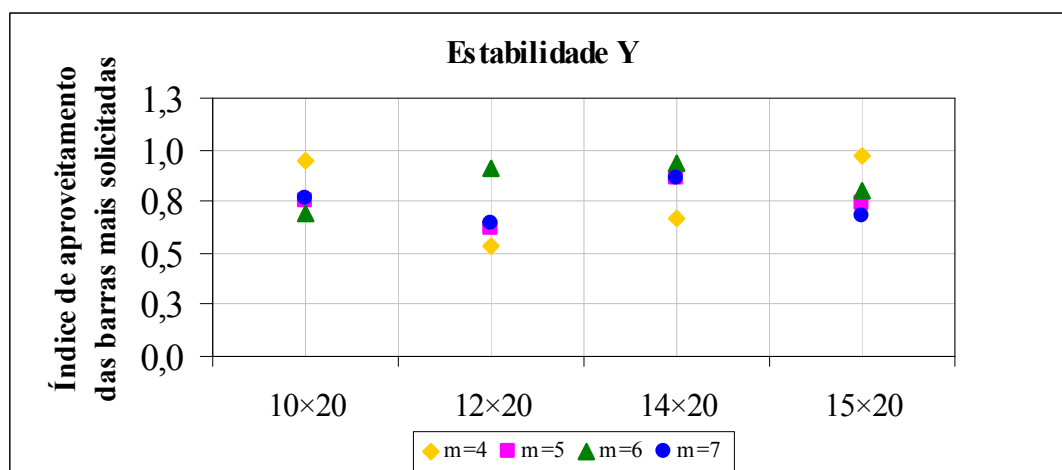


Figura 5-17 – Índice de aproveitamento – Estabilidade Y.

Devido o aumento do número de divisões na direção X da treliça Pratt, o máximo índice de aproveitamento das seções transversais, indicado para diferentes modelos ilustrados anteriormente, sofre variações significativas nos valores da resistência e das estabilidades em X e Y, como resultado do dimensionamento das estruturas otimizadas encontradas no programa computacional OTP. Contudo, todos os valores obtidos satisfazem os critérios da ABNT NBR 7190:97. Semelhante ao visto para a treliça Howe, os maiores índices de aproveitamento estão, em geral, associados à estabilidade em torno do eixo Y (menor inércia).

5.2.5 Trelça Belga – verificação dos resultados do aumento do volume de madeira

Nesta seção será realizada a análise da trelça do tipo Belga. Esta estrutura tem uma configuração geométrica diferenciada das estruturas de trelça usualmente empregada para cobertura. Contudo, de acordo com a literatura este modelo estrutural apresenta um comportamento estrutural mais vantajado se comparado com as trelças já vistas nas Seções anteriores, o que justifica seu estudo neste trabalho.

As Tabelas 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21 mostram os resultados obtidos para as variáveis de projeto e para a função objetivo (volume de madeira) pelo programa de otimização OTP.

- *Aumento do volume de madeira (%) para número de módulos na direção X ($m = 4$)*

Tabela 5-12 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Belga

Modelos de trelças (m)	10×20	12×20	14×20	15×20
Inclinação da cobertura (°)	27	23	7	10
Largura da seção transversal (mm)	50	50	80	80
Altura da seção transversal (mm)	70	150	200	200
Deslocamento da estrutura (cm)	0,74	0,70	4,00	2,44
Volume de madeira (m ³)	0,1410	0,3424	0,6407	0,7077

- *Aumento do volume de madeira (%) para número de módulos na direção X ($m = 5$)*

Tabela 5-13 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Belga

Modelos de trelças (m)	10×20	12×20	14×20	15×20
Inclinação da cobertura (°)	25	23	6	8
Largura da seção transversal (mm)	50	50	80	80
Altura da seção transversal (mm)	70	110	200	200
Deslocamento da estrutura (cm)	0,87	0,95	4,80	3,97
Volume de madeira (m ³)	0,1468	0,2662	0,6569	0,7191

- *Aumento do volume de madeira (%) para número de módulos na direção X ($m = 6$)*

Tabela 5-14 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Belga

Modelos de trelças (m)	10×20	12×20	14×20	15×20
Inclinação da cobertura (°)	27	21	6	6
Largura da seção transversal (mm)	50	50	80	80
Altura da seção transversal (mm)	50	110	200	200
Deslocamento da estrutura (cm)	1,08	1,15	5,37	5,84
Volume de madeira (m ³)	0,1238	0,2805	0,6685	0,7413

- *Aumento do volume de madeira (%) para número de módulos na direção X ($m = 7$)*

Tabela 5-15 – Resultados obtidos na otimização da Trelça Belga

Modelos de trelças (m)	10×20	12×20	14×20	15×20
Inclinação da cobertura (°)	23	21	6	7
Largura da seção transversal (mm)	50	50	80	80
Altura da seção transversal (mm)	50	110	200	200
Deslocamento da estrutura (cm)	1,52	1,22	5,39	4,64
Volume de madeira (m ³)	0,1220	0,3003	0,6903	0,7737

Os valores encontrados para a trelça tipo Belga apresentados nas Tabelas 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21 mostram que independentemente das dimensões atribuídas para a largura da cobertura, as dimensões da seção transversal e o número de divisões na direção X influenciam significativamente na otimização do volume de madeira. Como exemplo, o modelo 10 m × 20 m, para $m=4$, a melhor estrutura gerada numa iteração de 100 gerações para uma população de 50 indivíduos forneceu uma seção transversal de 50 mm × 70 mm, enquanto que para $m=7$ a seção transversal ótima é de 50 mm × 50 mm. Sendo para esse caso a melhor estrutura $m=7$, pois possui uma seção transversal menor, contudo um volume de madeira maior pois aumentou-se o número de barras na estrutura final.

As Figuras 5.18 até 5.21 mostram a distribuição em porcentagem do aumento do volume de madeira dos modelos analisados para coberturas de comprimento fixo igual a 20 m. A estrutura de referência tem número de módulos na direção X igual a 4.

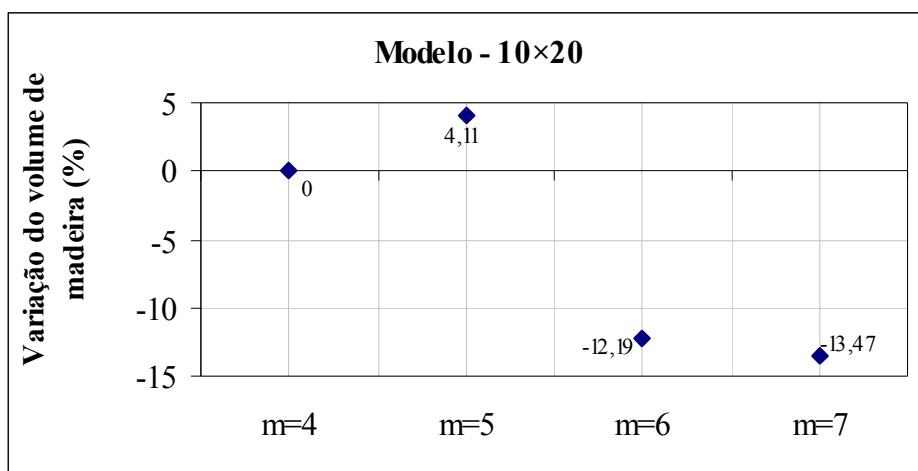


Figura 5-18 – Aumento do volume de madeira (%) – Modelo 10×20.

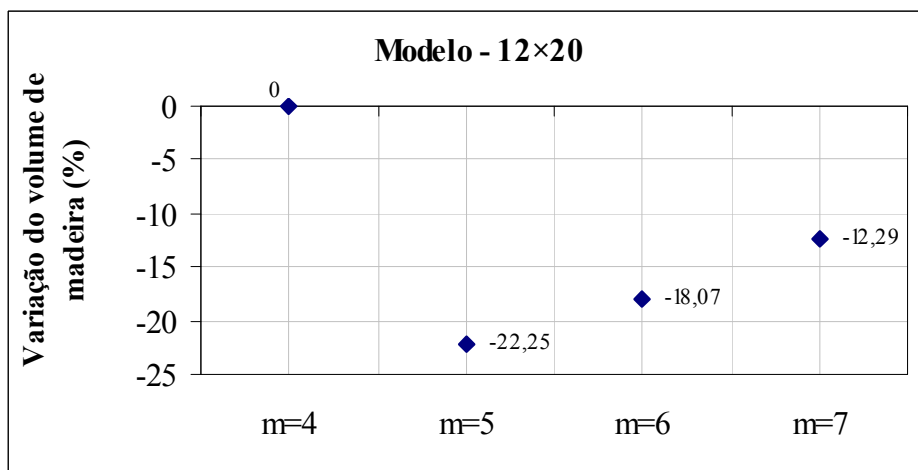


Figura 5-19 – Aumento do volume de madeira (%) – Modelo 12×20.

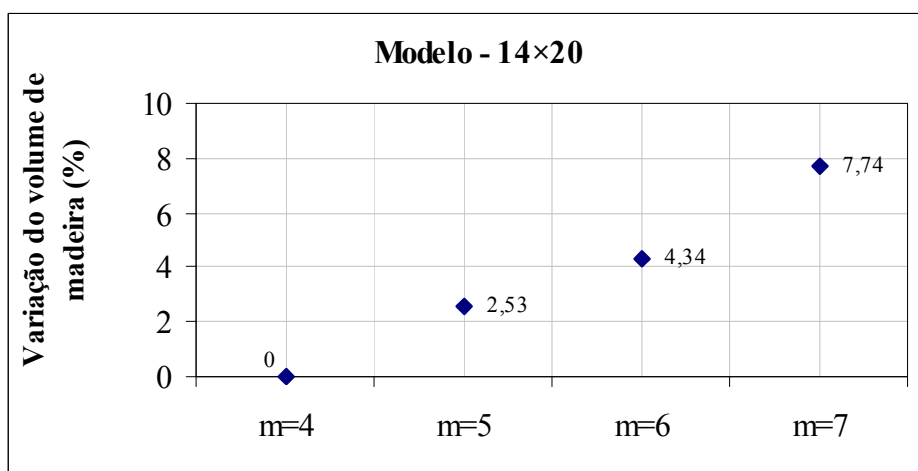


Figura 5-20 – Aumento do volume de madeira (%) – Modelo 14×20.

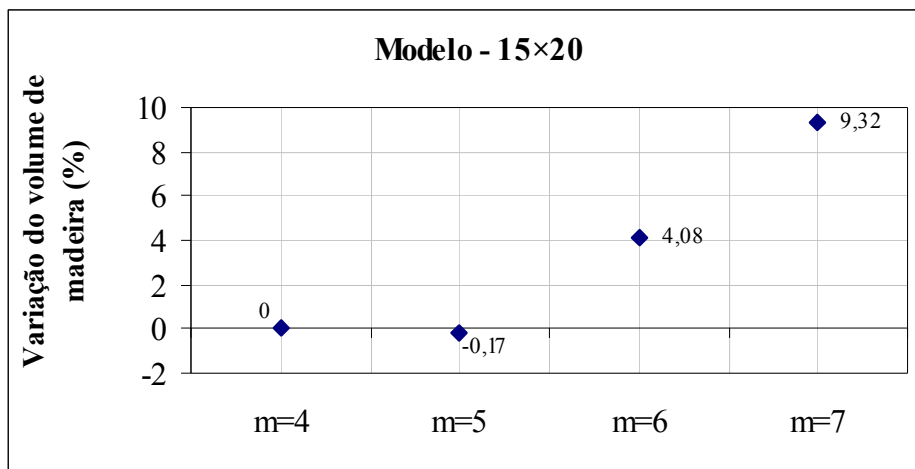


Figura 5-21 – Aumento do volume de madeira (%) – Modelo 15x20.

Dentre os casos analisados para a treliça Belga, o que apresentou a redução no volume de madeira mais significativa foi o modelo 14 m × 20 m, onde para um m = 5 o valor do volume de madeira encontrado pela Equação 5.1 foi de 44,79 % em relação ao modelo 10 m × 20 m. Por outro lado, para o modelo de 15 m × 20 m a seção transversal otimizada foi a mesma para todos os casos analisados, logo o consumo de madeira aumentou diretamente com o aumento do número de módulos na direção X, consequência do aumento do número de barras para formar a estrutura.

5.2.6 Verificação dos resultados do índice de aproveitamento das barras mais solicitadas fornecida pela iteração de n gerações – Treliça Belga

Os valores dos índices de aproveitamento estabelecidos nos cálculos para a resistência e estabilidades nas direções X e Y para essa forma de treliça são mostrados nas Figuras 5.22 a 5.24. Esses índices atendem às exigências dos cálculos de dimensionamento estrutural garantindo assim a segurança da estrutura.

- *Resistência*

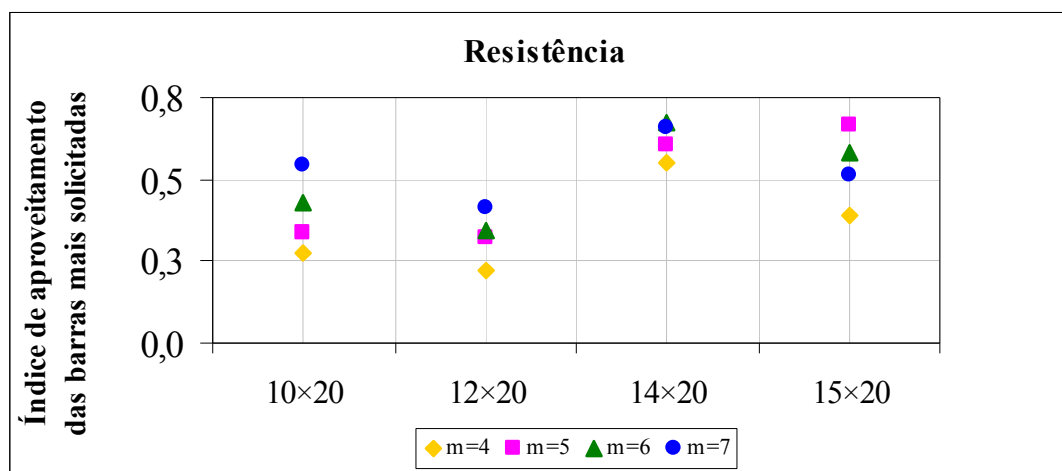


Figura 5-22 – Índice de aproveitamento – Resistência

- *Estabilidade X*

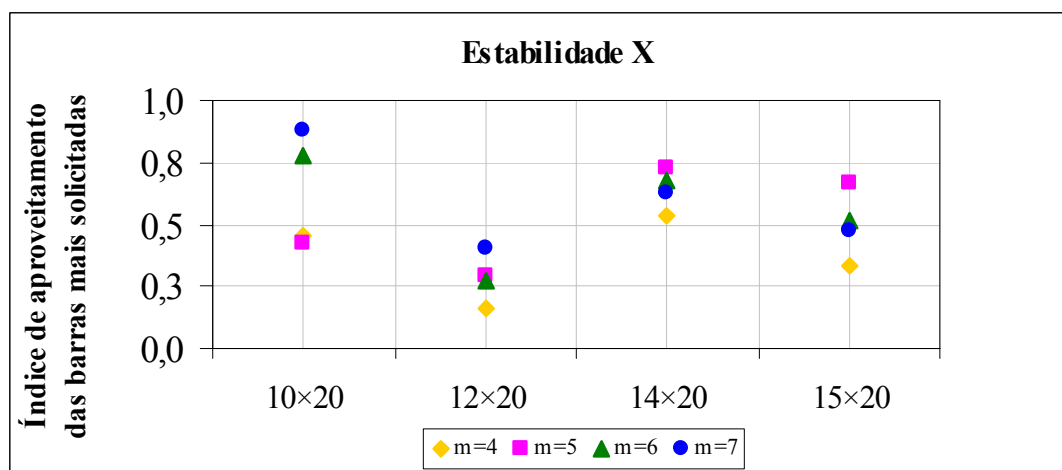


Figura 5-23 – Índice de aproveitamento – Estabilidade X

- *Estabilidade Y*

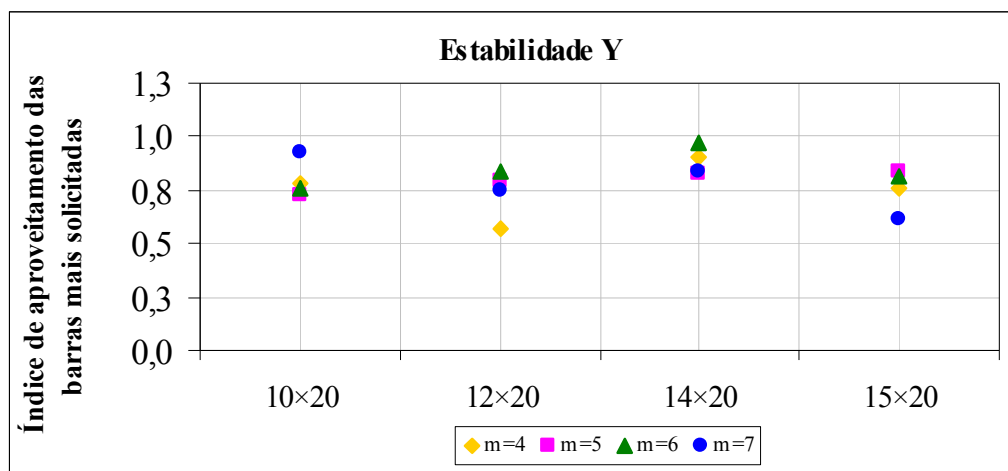


Figura 5-24 – Índice de aproveitamento – Estabilidade Y

Pela inexistência de diagonais neste tipo de treliça, os valores da resistência e estabilidades X e Y para as divisões dos números de módulos na direção X, $m = 4, 5, 6$ e 7 , se distribuíram de forma mais homogênea se comparados com os resultados obtidos para as treliças do tipo Howe e Pratt. Novamente, a estabilidade Y apresenta valores muito próximos de 1, isso ocorre por ser esta a estabilidade mais crítica, eixo de menor inércia.

5.3 VERIFICAÇÃO DO CONSUMO DE MADEIRA E ÍNDICE DE APROVEITAMENTO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DAS ESTRUTURAS COM DEFINIÇÕES PARA POSIÇÕES DAS TERÇAS

Com o intuito de comparar e conferir resultados que forneça a estrutura com uma configuração geométrica ótima, ou seja, com dimensões de seções transversais adequadas para que o consumo e o volume de madeira permitam ter custos menores e, dimensionamentos que atendam com segurança as restrições e exigências determinadas por norma, foram avaliados os modelos já apresentados na Seção 5.2. Nesta seção, serão avaliadas estruturas com a posição das terças definidas pelo usuário, usando o programa de otimização OTP.

Conforme o procedimento feito na Seção 5.2, foram analisados três tipos de treliças para quatro modelos cuja largura da área coberta da estrutura foi variada e o comprimento se manteve fixado.

As dimensões usadas para os modelos são:

- Modelo 1: 10 × 20 m;
- Modelo 2: 12 × 20 m;
- Modelo 3: 14 × 20 m;
- Modelo 4: 15 × 20 m.

As posições das terças foram fixadas. Os valores utilizados para o posicionamento das terças nas estruturas são mostrados na Tabela 5-16. Foi determinada ainda uma população inicial de 50 indivíduos gerados aleatoriamente, seção transversal escolhida por meio do banco de dados, madeira dicotiledônea da classe C60.

Tabela 5-16 – Posição no eixo x das terças definidas pelo usuário

10×20	10	130	250	370	490	510	630	750	870	990						
12×20	10	120	240	360	480	590	610	720	840	960	1080	1190				
14×20	10	110	230	350	470	580	690	710	820	930	1050	1170	1290	1390		
15×20	10	100	220	340	460	570	680	740	760	820	930	1040	1160	1280	1400	1490

5.3.1 Verificação dos resultados do aumento do volume de madeira para as três formas de treliça

Os resultados dessas análises dos volumes de madeira para cada tipo de treliça estão mostrados nas Tabelas 5.17 a 5.19.

- *Modelo 10 m × 20 m*

Tabela 5-17 – Resultados da otimização de estruturas – Treliça Howe

Modelo de Treliça	Treliça Howe			
Dimensões (m)	m=4	m=5	m=6	m=7
Inclinação cobertura (°)	16	21	19	22
Largura seção transversal (mm)	50	50	50	50
Altura seção transversal (mm)	110	110	70	70
Deslocamento estrutura (cm)	1,44	0,87	1,17	1,66
Volume de madeira (m³)	0,1714	0,1905	0,1408	0,1414

Tabela 5-18 – Resultados da otimização de estruturas – Treliça Pratt

Modelo de Treliça	Treliça Pratt			
Dimensões (m)	m=4	m=5	m=6	m=7
Inclinação cobertura (°)	22	21	23	25
Largura seção transversal (mm)	50	50	50	50
Altura seção transversal (mm)	110	110	70	50
Deslocamento estrutura (cm)	0,81	0,88	1,18	1,43
Volume de madeira (m³)	0,1966	0,2023	0,1507	0,1199

Tabela 5-19 – Resultados da otimização de estruturas – Treliça Belga

Modelo de Treliça	Treliça Belga			
Dimensões (m)	m=4	m=5	m=6	m=7
Inclinação cobertura (°)	20	22	19	21
Largura seção transversal (mm)	50	50	50	50
Altura seção transversal (mm)	110	70	70	70
Deslocamento estrutura. (cm)	0,91	1,04	1,28	1,37
Volume de madeira (m³)	0,1975	0,1419	0,1460	0,1569

A Figura 5-25 ilustra o gráfico da distribuição do volume de madeira para os três tipos de treliças analisados para o modelo 10 m × 20 m para as verificações de m=4.

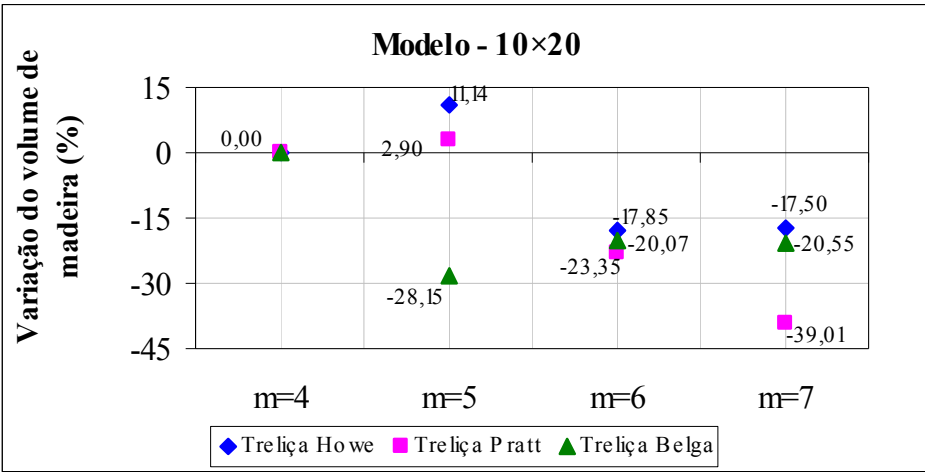


Figura 5-25 – Variação do volume de madeira (%) – Modelo 10×20

- *Modelo 12 m × 20 m*

Tabela 5-20 – Resultados da otimização de estruturas – Treliça Howe

Modelo de Treliça	Treliça Howe			
Dimensões (m)	m=4	m=5	m=6	m=7
Inclinação cobertura (°)	10	18	16	17
Largura seção transversal (mm)	80	50	50	50
Altura seção transversal (mm)	200	150	150	150
Deslocamento estrutura (cm)	1,76	1,25	1,36	1,39
Volume. madeira (m ³)	0,5443	0,3155	0,3288	0,3323

Tabela 5-21 – Resultados da otimização de estruturas – Treliça Pratt

Modelo de Treliça	Treliça Pratt			
Dimensões (m)	m=4	m=5	m=6	m=7
Inclinação cobertura (°)	24	20	20	17
Largura seção transversal (mm)	50	50	50	50
Altura seção transversal (mm)	150	150	110	150
Deslocamento estrutura (cm)	0,75	1,03	1,30	1,38
Volume de madeira (m ³)	0,3360	0,3186	0,2779	0,3452

Tabela 5-22 – Resultados da otimização de estruturas – Treliça Belga

Modelo de Treliça	Treliça Belga			
Dimensões (m)	m=4	m=5	m=6	m=7
Inclinação cobertura. (°)	23	21	18	22
Largura seção transversal (mm)	50	50	50	50
Altura seção transversal (mm)	150	150	110	110
Deslocamento estrutura. (cm)	0,80	0,92	1,70	1,09
Volume de madeira. (m ³)	0,3418	0,3564	0,2723	0,3031

A Figura 5-26 ilustra o gráfico da variação do volume de madeira para os três tipos de treliças do modelo de 12 m × 20 m.

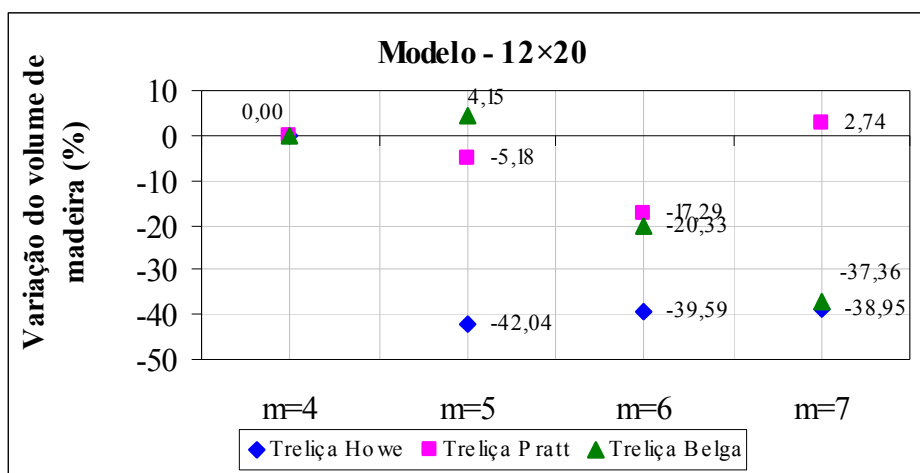


Figura 5-26 – Variação do volume de madeira (%) – Modelo 12x20

• *Modelo 14 m x 20 m*

Tabela 5-23 – Resultados da otimização de estruturas – Treliça Howe

Modelo de Treliça	Treliça Howe			
Dimensões (m)	m=4	m=5	m=6	m=7
Inclinação cobertura (°)	12	8	9	12
Largura seção transversal (mm)	80	80	80	80
Altura seção transversal (mm)	200	200	200	200
Deslocamento estrutura. (cm)	1,76	3,63	2,93	1,77
Volume de madeira (m³)	0,6486	0,6531	0,7066	0,7390

Tabela 5-24 – Resultados da otimização de estruturas – Treliça Pratt

Modelo de Treliça	Treliça Pratt			
Dimensões (m)	m=4	m=5	m=6	m=7
Inclinação cobertura (°)	18	11	8	10
Largura seção transversal (mm)	80	80	80	80
Altura seção transversal (mm)	200	200	200	200
Deslocamento estrutura (cm)	0,83	2,09	3,61	2,47
Volume de madeira (m³)	0,7066	0,6751	0,6874	0,7479

Tabela 5-25 – Resultados da otimização de estruturas – Treliça Belga

Modelo de Treliça	Treliça Belga			
Dimensões (m)	m=4	m=5	m=6	m=7
Inclinação cobertura (°)	7	8	7	6
Largura seção transversal (mm)	80	80	80	80
Altura seção transversal (mm)	200	200	200	200
Deslocamento estrutura (cm)	2,89	3,58	4,32	5,51
Volume de madeira (m³)	0,6536	0,6707	0,6897	0,7162

A Figura 5-27 ilustra o gráfico da distribuição do volume de madeira para os três tipos de trelças do modelo de 14 m × 20 m.

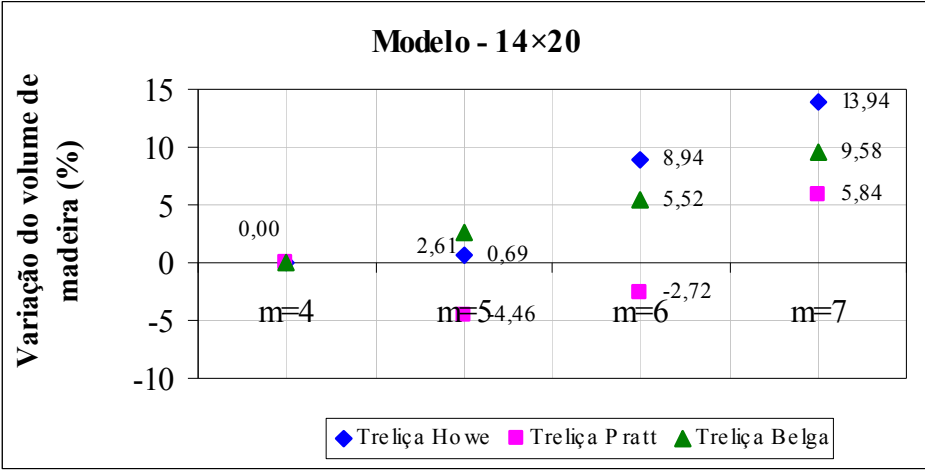


Figura 5-27 – Variação do volume de madeira (%) – Modelo 14×20

- Modelo 15 m × 20 m

Tabela 5-26 – Resultados da otimização de estruturas – Treliça Howe

Modelo de Treliça	Treliça Howe			
Dimensões (m)	m=4	m=5	m=6	m=7
Inclinação cobertura (°)	16	10	12	9
Largura seção transversal (mm)	80	80	80	80
Altura seção transversal (mm)	200	200	200	200
Deslocamento estrutura. (cm)	1,20	2,85	3,18	3,38
Volume de madeira (m³)	0,7205	0,7161	0,7780	0,7783

Tabela 5-27 – Resultados da otimização de estruturas – Treliça Pratt

Modelo de Treliça	Treliça Pratt			
Dimensões (m)	m=4	m=5	m=6	m=7
Inclinação cobertura (°)	19	9	8	10
Largura seção transversal (mm)	80	80	80	80
Altura seção transversal (mm)	200	200	200	200
Deslocamento estrutura. (cm)	1,12	3,45	4,17	2,91
Volume de madeira (m ³)	0,7872	0,7213	0,7425	0,8175

Tabela 5-28 – Resultados da otimização de estruturas – Treliça Belga

Modelo de Treliça	Treliça Belga			
Dimensões (m)	m=4	m=5	m=6	m=7
Inclinação cobertura (°)	9	9	8	7
Largura seção transversal (mm)	80	80	80	80
Altura seção transversal (mm)	200	200	200	200
Deslocamento estrutura. (cm)	3,39	3,37	4,20	5,06
Volume de madeira (m ³)	0,7076	0,7394	0,7407	0,7767

A Figura 5-28 ilustra o gráfico da variação do volume de madeira para os três tipos de treliças do modelo de 15 m×20 m.

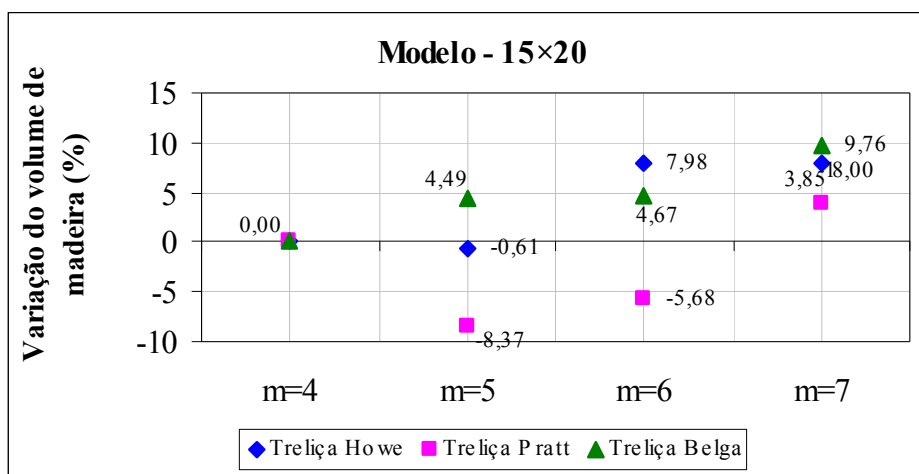


Figura 5-28 – Variação do volume de madeira (%) – Modelo 15×20

Como visto nas análises para os modelos de treliças onde não se tinha fixado a posição das terças, observou-se que o aumento do volume de madeira é diretamente proporcional ao aumento do número de divisões de m na direção X, quando não há diminuição nas dimensões da seção transversal. Não obstante, para os modelos de 14 m×20 m e 15 m×20 m, não houve redução nas dimensões da seção transversal em nenhum caso analisado.

5.3.2 Verificação dos índices de aproveitamento das barras mais solicitadas fornecida pela iteração de n gerações nas três formas de estrutura de treliça

Os cálculos de resistência e estabilidade nas direções X e Y dessas treliças seguem as mesmas especificações da ABNT NBR 7190:97, atendendo às exigências de cálculo garantindo a segurança da estrutura. Os valores apresentados nas Figuras 5.29 até 5.37 representam os máximos valores encontrados para as resistências e estabilidade para a barra mais solicitada em cada modelo de estrutura otimizada anteriormente.

- *Resistência*

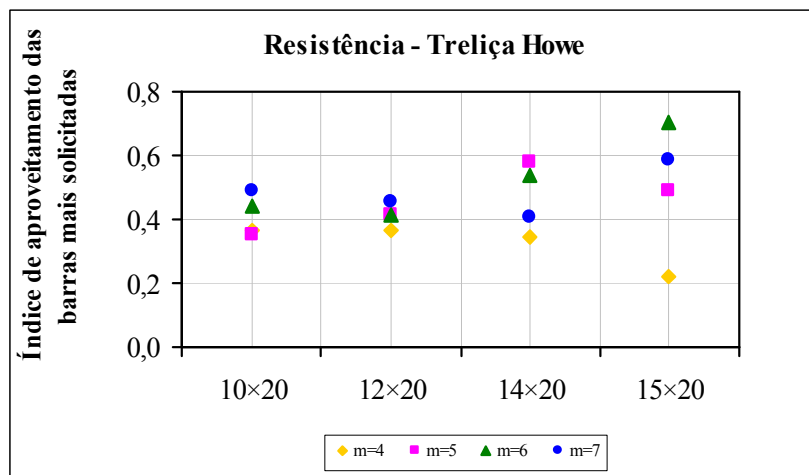


Figura 5-29 – Índice de aproveitamento da resistência – Treliza Howe

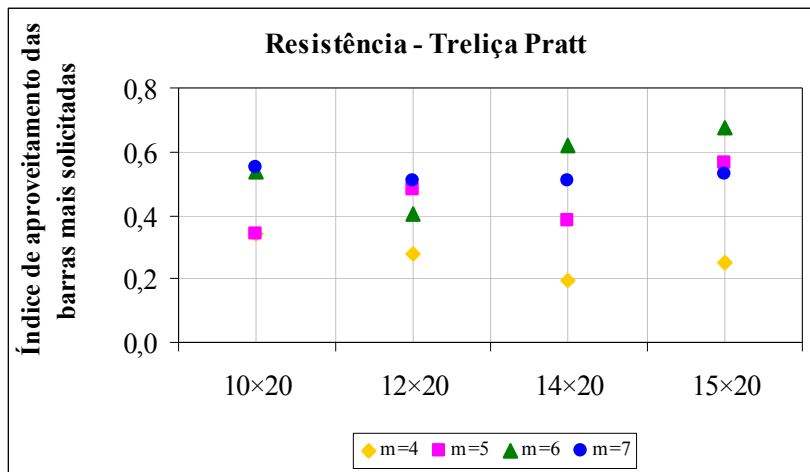


Figura 5-30 – Índice de aproveitamento da resistência – Trelça Pratt

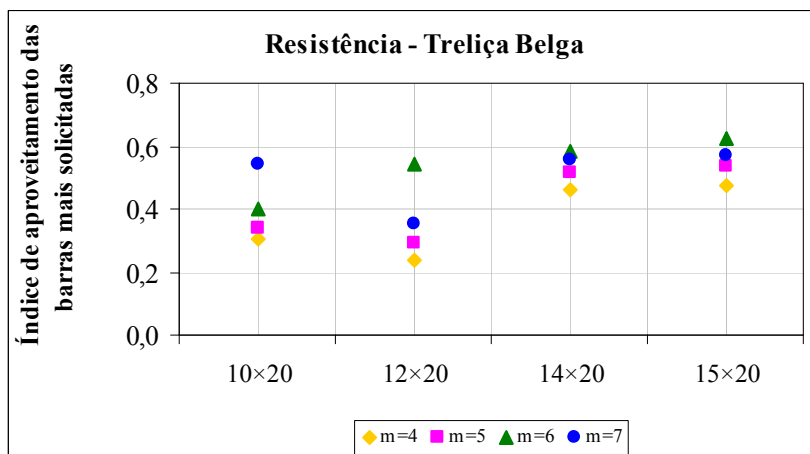


Figura 5-31 – Índice de aproveitamento da resistência – Trelça Belga

Pode-se observar a partir dos resultados encontrados para os três casos de trelças analisados que, em geral a trelça Belga apresentou os menores valores para o índice de resistência, o que está diretamente associado ao melhor comportamento estrutural deste modelo se comparado com os modelos do tipo Howe e Pratt. Contudo, a trelça Belga apresenta o maior consumo de madeira.

- *Estabilidade X*

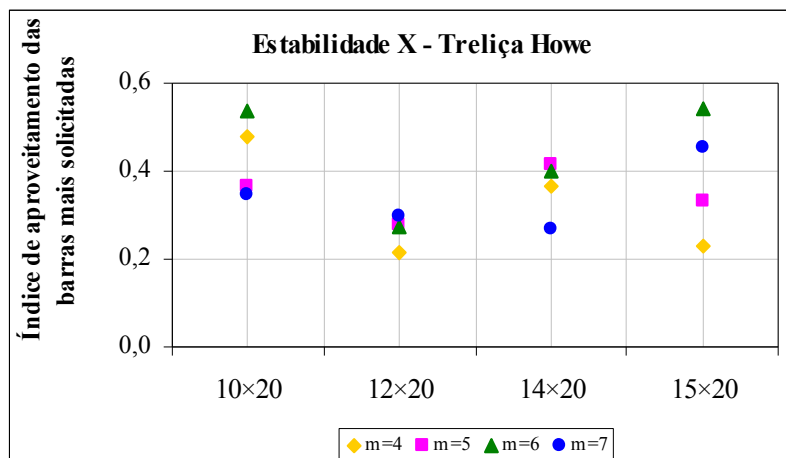


Figura 5-32 – Índice de aproveitamento da estabilidade X – Trelça Howe

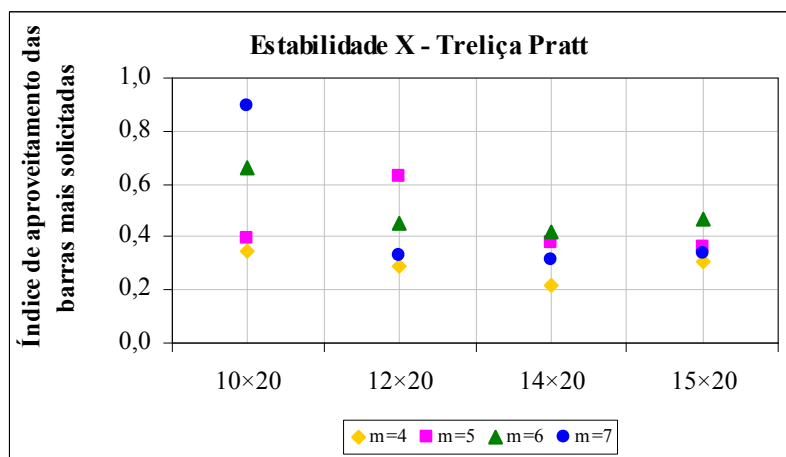


Figura 5-33 – Índice de aproveitamento da estabilidade X – Trelça Pratt

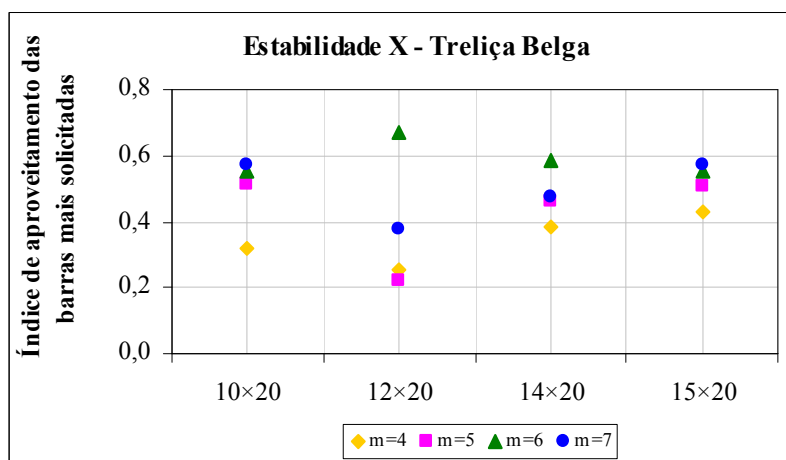


Figura 5-34 – Índice de aproveitamento da estabilidade X – Trelça Belga

- *Estabilidade Y*

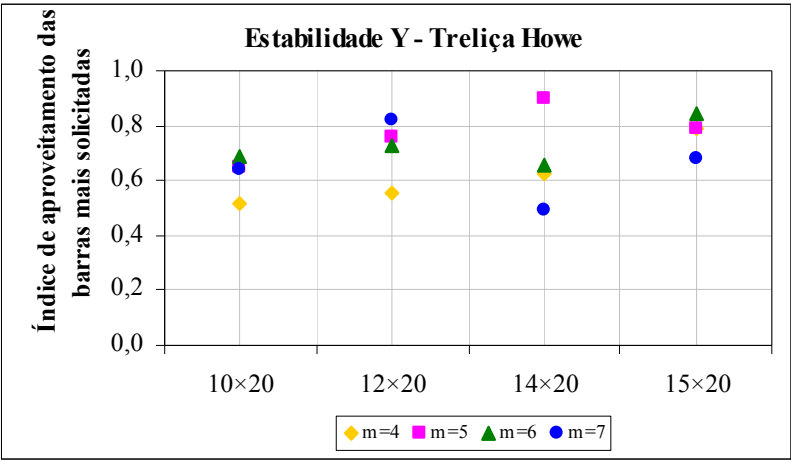


Figura 5-35 – Índice de aproveitamento da estabilidade Y – Trelça Howe

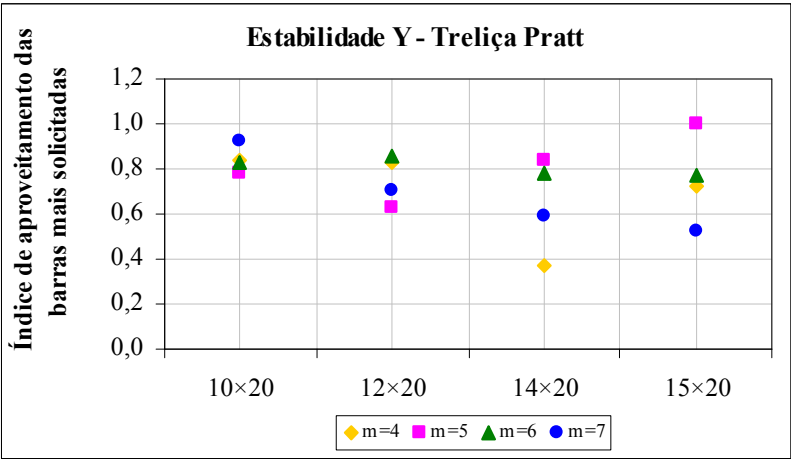


Figura 5-36 – Índice de aproveitamento da estabilidade Y – Trelça Pratt

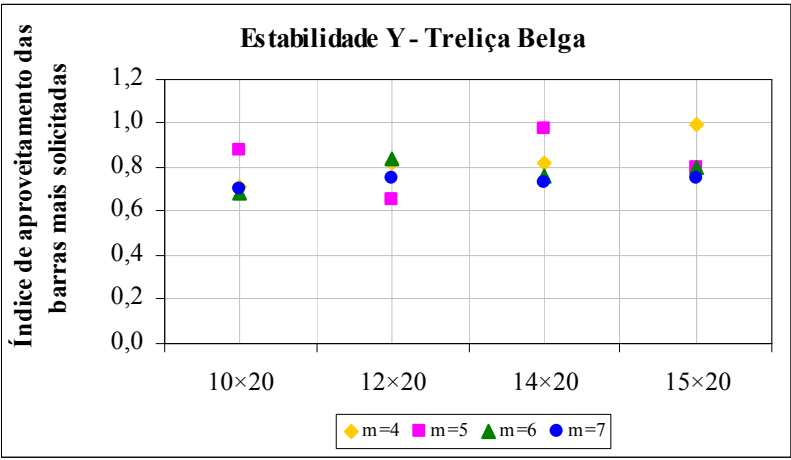


Figura 5-37 – Índice de aproveitamento da estabilidade Y – Trelça Belga

O índice de aproveitamento da seção transversal de cada treliça varia significativamente com o número de módulos m na direção X e com as dimensões da seção transversal para as estruturas analisadas. Nota-se também que devido ao eixo Y possuir a menor inércia, o índice de aproveitamento da estabilidade em torno de Y teve os valores mais próximos de 1, como era esperado.

5.4 COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS MODELOS ESTRUTURAIS ANALISADOS

Por meio das avaliações vistas nas Seções anteriores, será mostrada nesta Seção a comparação dos resultados entre os modelos estruturais estudados com o objetivo de identificar qual dos modelos estudados teve o melhor comportamento em função do custo.

As Tabelas 5.29 a 5.32 mostram os resultados obtidos nas análises dos modelos comparando os três modelos estruturais com o objetivo de identificar a estrutura com melhor desempenho estrutural e com o menor custo.

- *Modelo 10×20 m*

Tabela 5-29 – Volume de madeira (m^3) para o modelo **10×20**

	m=4	m=5	m=6	m=7
Treliça Howe	0,1660	0,1347	0,1407	0,1449
Treliça Pratt	0,1660	0,1478	0,156	0,1522
Treliça Belga	0,1410	0,1468	0,1238	0,122
Treliça Howe - terças definidas	0,1714	0,1905	0,1408	0,1414
Treliça Pratt - terças definidas	0,1966	0,2023	0,1507	0,1199
Treliça Belga - terças definidas	0,1975	0,1419	0,146	0,1569

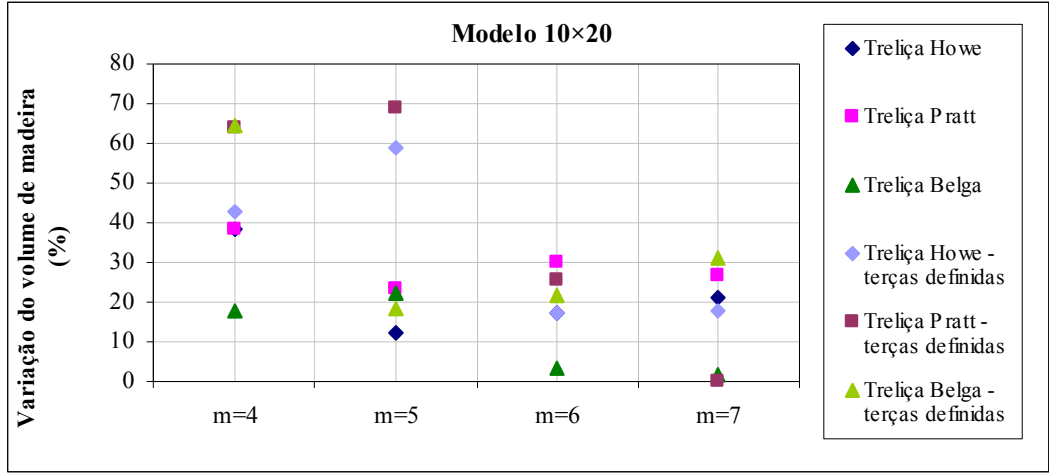


Figura 5-38 – Disposição do valor do volume no modelo 10×20

• Modelo 12×20 m

Tabela 5-30 – Volume de madeira (m³) para o modelo 12×20

	m=4	m=5	m=6	m=7
Treliça Howe	0,5635	0,3426	0,2659	0,331
Treliça Pratt	0,5493	0,2428	0,2599	0,3114
Treliça Belga	0,2898	0,2662	0,2805	0,3003
Treliça Howe - terças definidas	0,5443	0,3155	0,3288	0,3323
Treliça Pratt - terças definidas	0,3360	0,3186	0,2779	0,3452
Treliça Belga - terças definidas	0,3418	0,3564	0,2723	0,3031

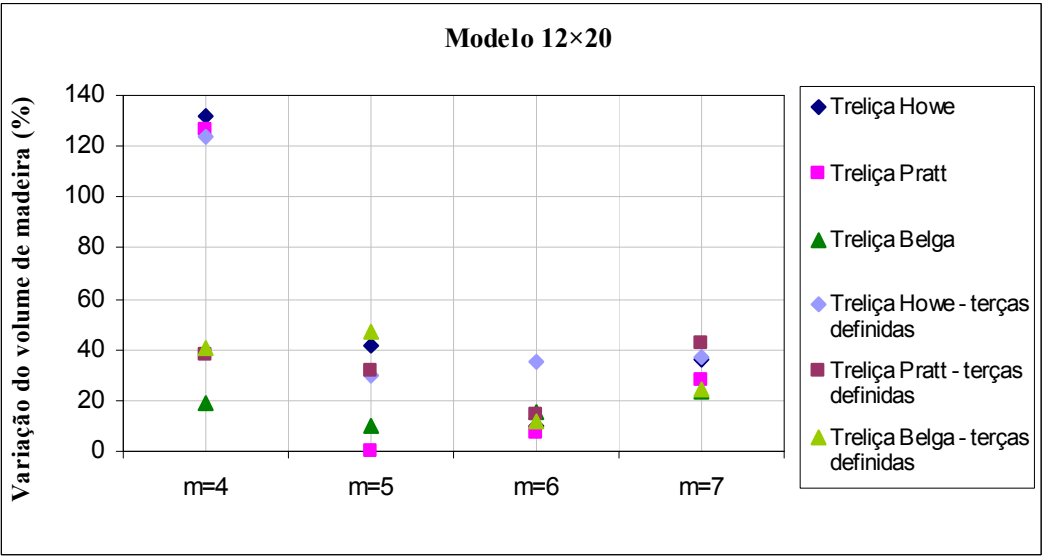


Figura 5-39 – Disposição do valor do volume no modelo 12×20

• *Modelo 14×20 m*

Tabela 5-31 – Volume de madeira (m³) para o modelo **14×20**

	m=4	m=5	m=6	m=7
Treliça Howe	0,6385	0,6536	0,6979	0,7205
Treliça Pratt	0,6607	0,6672	0,4189	0,4055
Treliça Belga	0,6407	0,6569	0,6685	0,6903
Treliça Howe - terças definidas	0,6486	0,6531	0,7066	0,7390
Treliça Pratt - terças definidas	0,7066	0,6751	0,6874	0,74791
Treliça Belga - terças definidas	0,6536	0,6707	0,6897	0,7162

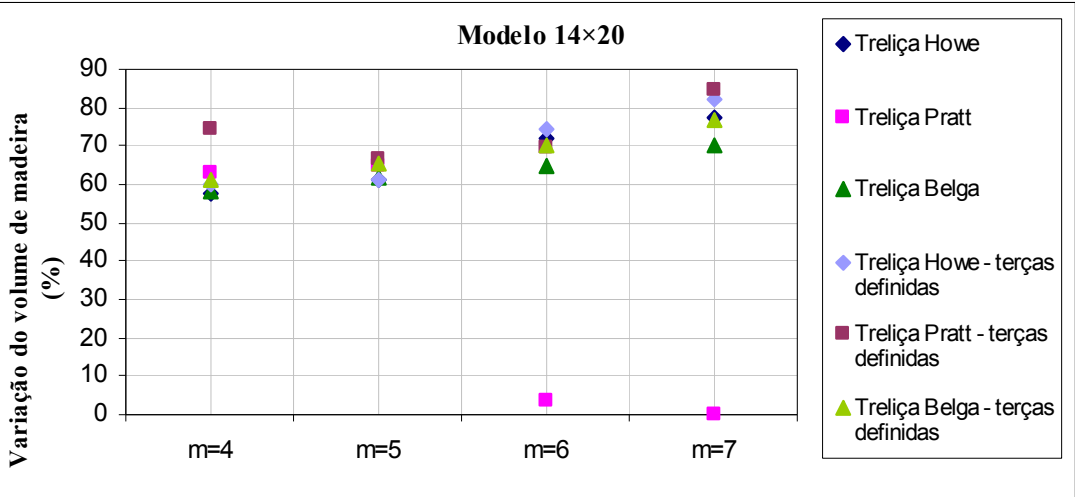


Figura 5-40 – Disposição do valor do volume no modelo **14×20**

• *Modelo 15×20 m*

Tabela 5-32 – Volume de madeira (m³) para o modelo **15×20**

	m=4	m=5	m=6	m=7
Treliça Howe	0,7235	0,7290	0,7247	0,7453
Treliça Pratt	0,7038	0,7326	0,7596	0,7911
Treliça Belga	0,7077	0,7065	0,7366	0,7737
Treliça Howe - terças definidas	0,7205	0,7161	0,7780	0,7783
Treliça Pratt - terças definidas	0,7872	0,7213	0,7425	0,8175
Treliça Belga - terças definidas	0,7076	0,7394	0,7407	0,7767

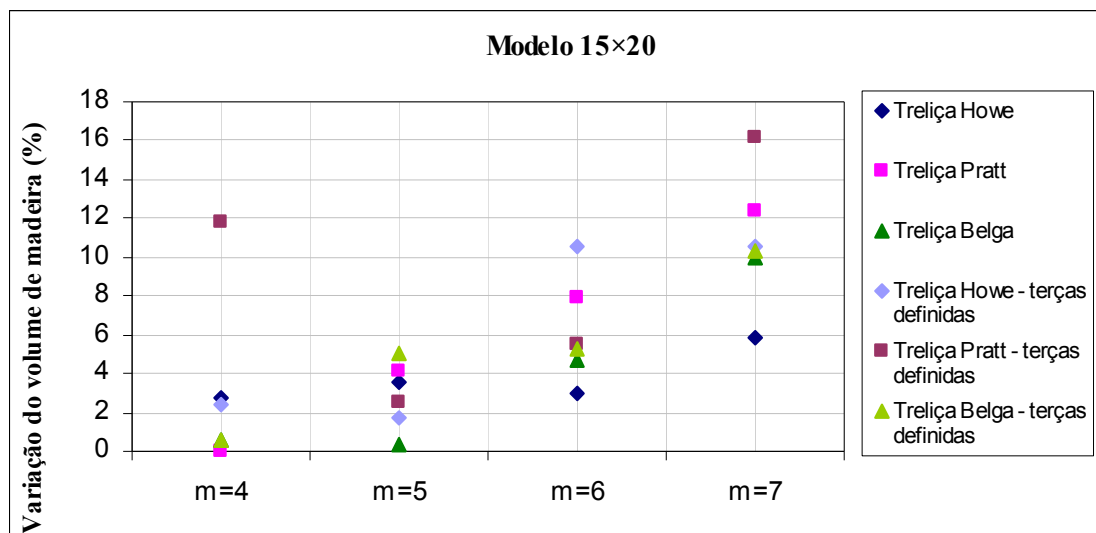


Figura 5-41 – Disposição do valor do volume no modelo 15x20

Observando o desempenho das estruturas, nota-se que em três modelos analisados a estrutura com menor consumo de madeira foi a treliça Pratt, sendo as terças impostas em um destes casos. Embora, tenha se procurado realizar um número considerável de avaliações, estes resultados não podem ser generalizados. Pode-se dizer que para esses casos o modelo estrutural que teve o melhor desempenho foi a treliça Pratt, em relação as outras estrutura analisadas.

5.4.1 Verificação dos resultados do deslocamento

Com o objetivo de comparar o deslocamento devido às dimensões em planta da estrutura e o número de módulos na direção X serão avaliados dois modelos, um para estruturas sem posições de terças definidas e o outro com essa definição. Esses exemplos foram obtidos após 100 gerações com 50 indivíduos. Selecionaram-se quatro modelos para esta análise, com o objetivo de apontar qual modelo possui menor consumo de madeira.

As Figuras 5.44 a 5.47 ilustram como as estruturas se deslocaram quando são aplicadas as forças e definidas as terças. Para facilitar a visualização foi utilizado a ferramenta de fator de ampliação de deslocamento fornecido pelo programa Gestrut, aumentando esse fator de 1 para 10.

- *Exemplo de deslocamento de estrutura quando as terças coincidem com os montantes*

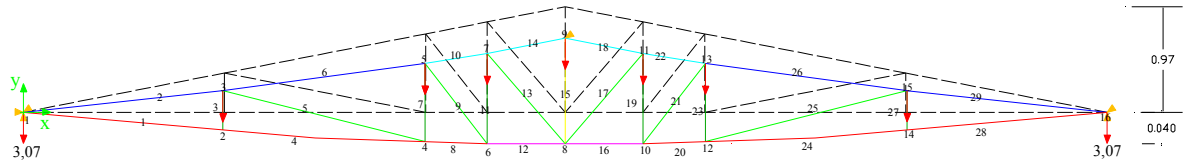


Figura 5-42 – Deslocamento da estrutura – $m=4$

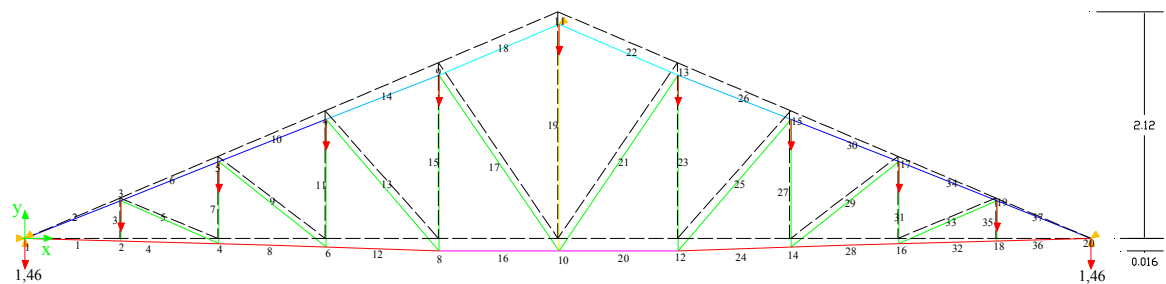


Figura 5-43 – Deslocamento da estrutura – $m=5$

- *Exemplo de deslocamento de estrutura com posição de terças definidas*

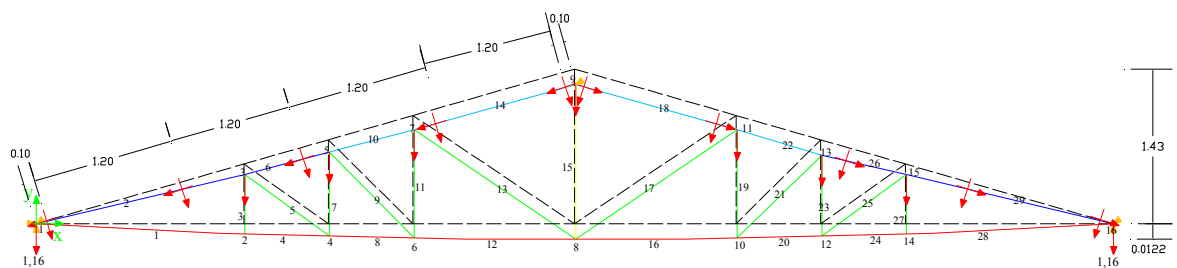


Figura 5-44 – Deslocamento da estrutura quando as terças são definidas – $m=4$

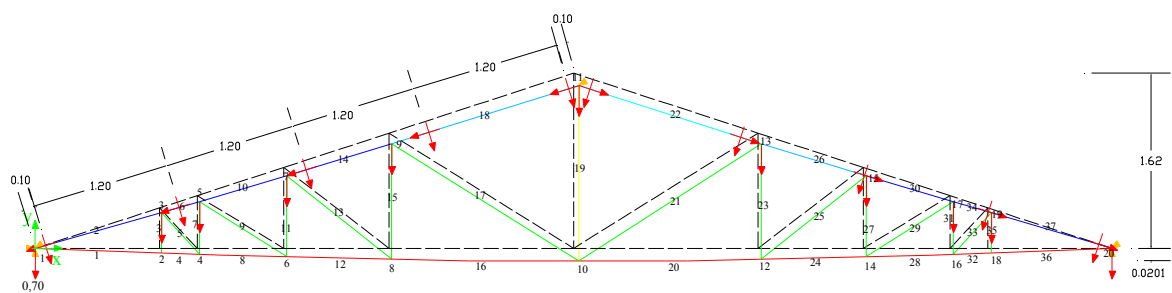


Figura 5-45 – Deslocamento da estrutura quando as terças são definidas – $m=5$

Como pode ser observado, os deslocamentos não variaram muito de uma estrutura para outra, o que modifica são os valores das forças aplicadas nos nós, e a distribuição da configuração das barras ao longo de toda a estrutura.

A Tabela 5-33 mostra os valores dos deslocamentos por barra em toda a estrutura.

Tabela 5-33 – Valores dos deslocamentos nodais (cm) – direção Y

Nº de nós	m=4	m=4 (terças definidas)	m=5	m=5 (terças definidas)
1	0,00000	0,00000	0,00000	0,0000
2	3,28112	1,61139	0,89278	0,73558
3	3,28160	1,61174	0,89312	0,73631
4	3,96811	1,88229	1,29091	0,86329
5	3,96555	1,87881	1,28887	0,86283
6	4,04243	1,99585	1,52344	1,05478
7	4,03643	1,98855	1,51631	1,05280
8	4,05748	2,01332	1,62807	1,20256
9	4,04076	1,99268	1,61259	1,19483
10	4,04243	2,00231	1,62621	1,22354
11	4,03643	1,99568	1,57098	1,19675
12	3,96811	1,88640	1,62807	1,20802
13	3,96555	1,88335	1,61259	1,20163
14	3,28112	1,61219	1,52344	1,05462
15	3,28160	1,61252	1,51631	1,05247
16	0,0000	0,0000	1,2909	0,86342
17			1,28887	0,86302
18			0,89278	0,73574
19			0,89312	0,73645
20			0,0000	0,00000

Observa-se que os resultados encontrados mostram que a estrutura que mais se deslocou foi a de m=4, onde as terças coincidiam com os montantes, sendo as barras de 6 a 11 as que mais sofreram deslocamentos.

Nota-se que a Figura 5-42 apresentou uma configuração diferenciada na distribuição das barras em relação às outras figuras apresentadas. Isto ocorre, devido ao fato de que a estrutura encontrada segue a melhor configuração sugerida pelo programa OTP, sem a preocupação com o arranjo que pode levar a problemas construtivos.

Os outros modelos estruturais apresentaram a mesma configuração e a mesma forma de deslocamento mudando somente os valores dos carregamentos aplicados e o espaçamento das terças quando as mesmas eram definidas.

5.5 AVALIAÇÃO E VERIFICAÇÃO DE CASO REAL DE TRELIÇA HOWE

Diante de um caso real de estrutura treliçada do tipo Howe, fez-se uma avaliação da melhor estrutura que poderia ser encontrada através do programa de otimização OTP, na busca da estrutura com o menor custo.

O modelo escolhido tem suas terças já definidas com o tamanho comercial das telhas. A Figura 5-46 ilustra as características definidas pela estrutura que possui 18 m de largura da área coberta por 20 m de comprimento, e com uma divisão de números de módulos na direção X de $m=6$.

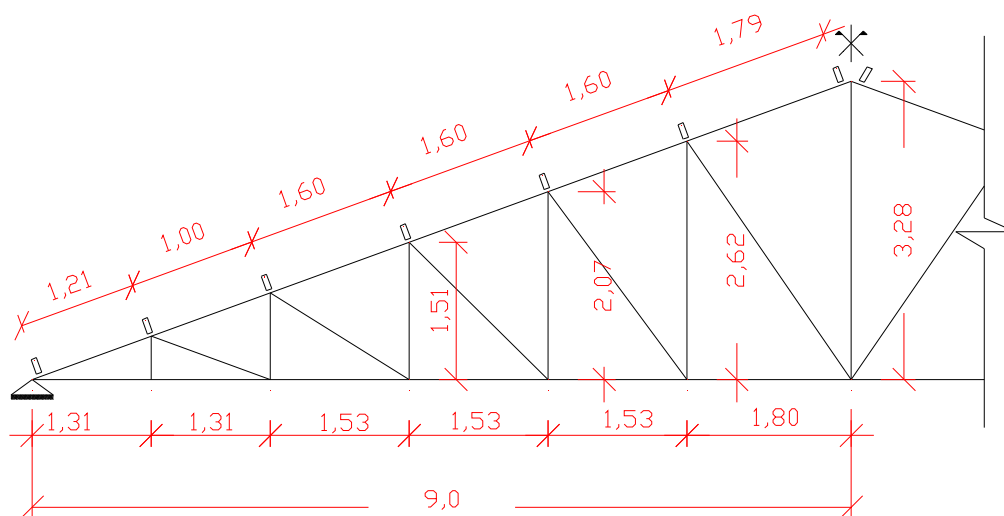


Figura 5-46 – Estrutura real analisada

Como mostrado na Figura 5-46, já estão determinados a posição das terças e o espaçamento entre os montantes, entretanto, será verificado se quando otimiza a mesma estrutura ela continua a apresentar a mesma configuração.

5.5.1 Verificação dos resultados

Os valores atribuídos para a posição das terças estão mostrados na Tabela 5-34, bem como os resultados encontrados no programa de otimização OTP, onde foram analisados estruturas com números de módulos variados, ou seja, $m=4$, $m=5$ e $m=7$.

Tabela 5-34 – Posição no eixo X das terças definidas na estrutura real.

18×20	10	131	231	391	551	711	890	910	1089	1249	1409	1569	1669	1790
--------------	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------

Definiram-se para todas as peças de madeira as seguintes características: madeira dicotiledônea C-60, geração da população de 50 indivíduos em uma interação de 100 gerações, taxa de recombinação 0,80, taxa de mutação 0,05 e critério de estagnação 50.

A Tabela 5-35 mostra os resultados encontrados na otimização da estrutura das análises feitas para o modelo definido. O cálculo do aumento do volume de madeira foi efetuado através da Equação 5.1, para $m=6$.

Tabela 5-35 – Resultados obtidos na otimização do modelo **18×20**

Número de módulos na direção X	m=4	m=5	m=6	m=7
Inclinação da cobertura (°)	17	14	15	19
Largura da seção transversal (mm)	80	80	80	80
Altura da seção transversal (mm)	200	200	200	200
Deslocamento da estrutura (cm)	2,58	2,26	2,01	1,69
Volume de madeira (m ³)	0,9243	0,9285	0,9406	1,091

A Figura 5-47 ilustra como se deu a variação do volume da estrutura otimizada em função do número de módulos na direção X igual a 6.

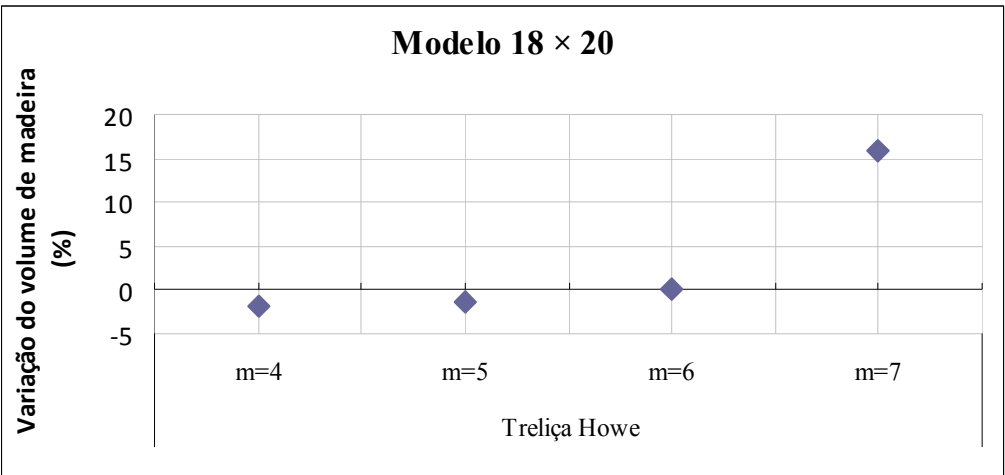


Figura 5-47 – Variação do volume de madeira.

As Figura 5-48 ilustram como se distribuiu a função custo durante as gerações a melhor estrutura para o modelo analisado.

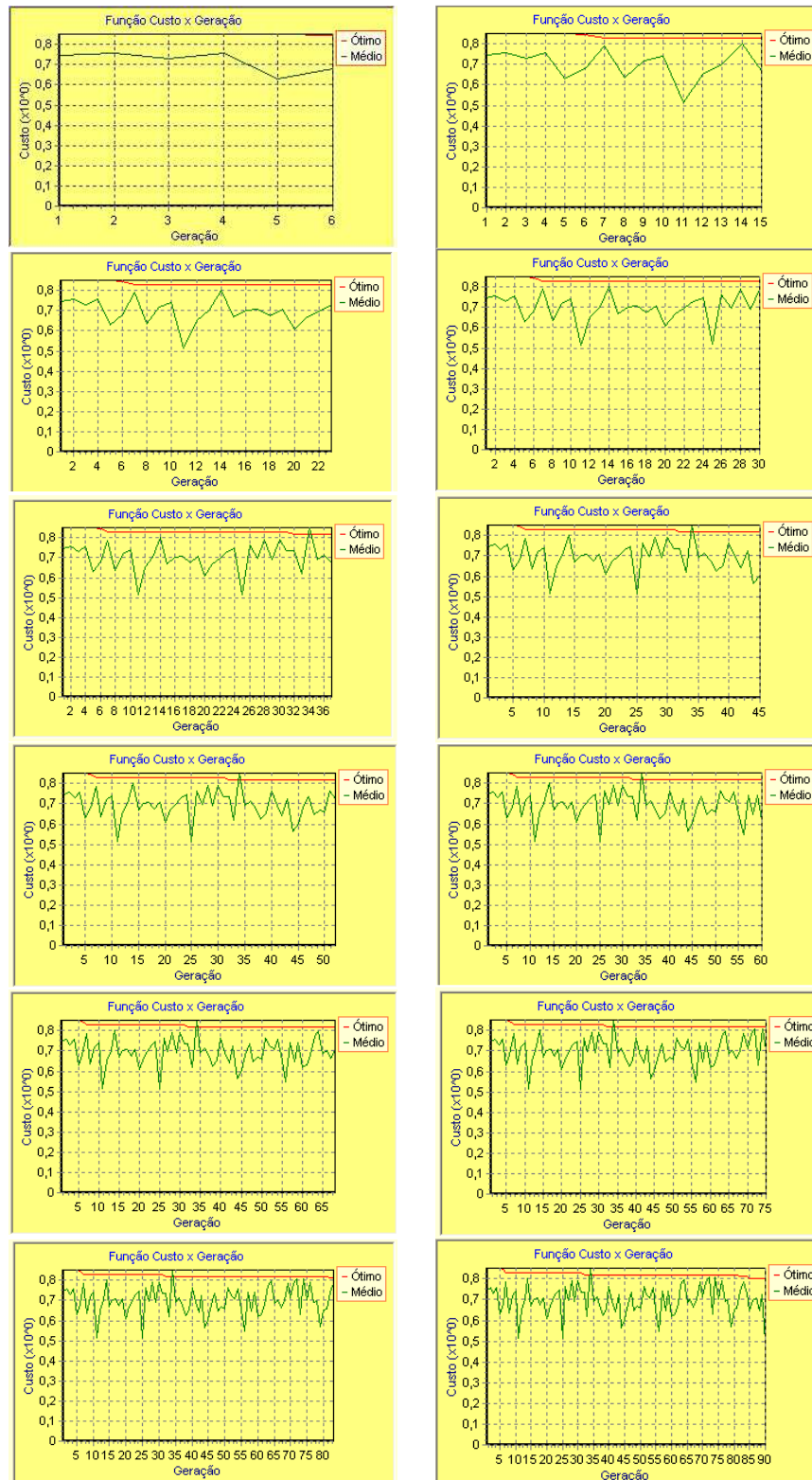


Figura 5-48 – Distribuição da função custo X geração

Para efeito de comparação de resultados foi analisado o aumento do volume para número de divisões menores e maiores que o valor atribuído. Dessa maneira, pode-se observar que o volume para $m=4$ e $m=5$ é baixo devido ao fato de terem menor número de peças de madeira a serem empregados na execução da estrutura. O contrário ocorre para $m=7$, mesmo que todas as estruturas apresentem o mesmo valor da seção transversal encontrada através do programa OTP.

A resistência e as estabilidades X e Y estão mostrados no gráfico da Figura 5-49.

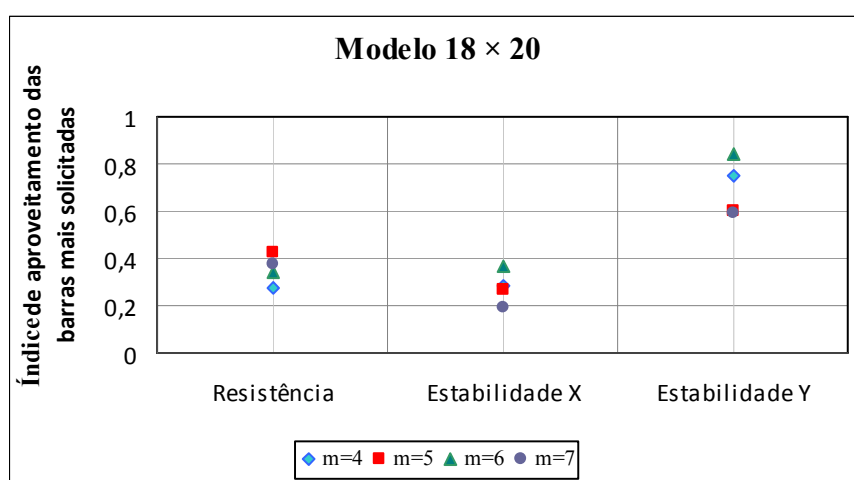


Figura 5-49 – Índice de aproveitamento da seção transversal

Observando-se o gráfico nota-se que a resistência e estabilidade em X possuem valores pequenos e são próximos variando entre 0,2 a 0,45. A estabilidade em Y é mais crítica por ter seu momento de inércia menor em relação ao eixo Y, embora estes valores estejam dentro dos limites, próximos a 1, ou seja, situação ótima.

A estrutura real analisada possui uma configuração geométrica bem distribuída com banzos superiores e inferiores de seção transversal 6 cm × 16 cm e 6 cm × 12 cm, respectivamente, montantes com peça duplas de 2(2,5 cm × 15 cm) e diagonais 6 cm × 16 cm e ângulo de inclinação 20°. As distâncias entre as terças e os montantes estão mostradas na Figura 5-46.

A Figura 5-50 ilustra a configuração encontrada pelo programa, representando a situação otimizada.

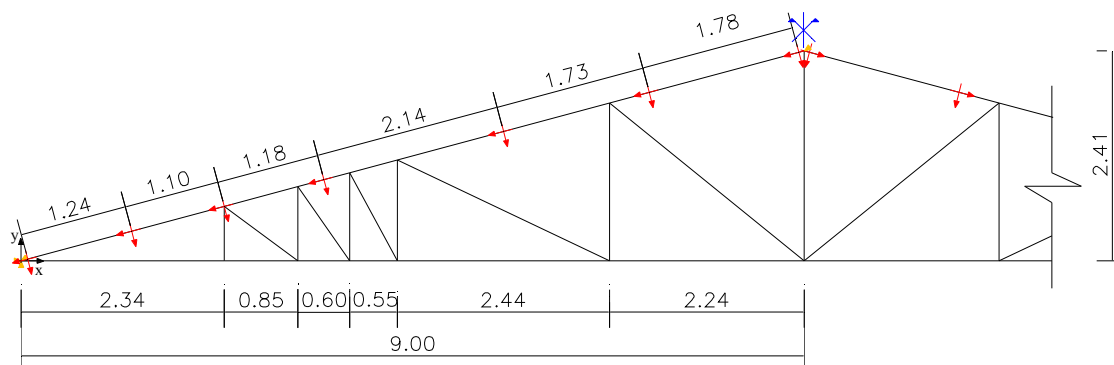


Figura 5-50 – Estrutura otimizada gerada pelo programa de otimização com $m=6$

Para o caso otimizado, as posições das terças foram definidas e as posições dos montantes ficaram livres. Nota-se uma concentração de montantes na região próxima ao apoio, denotando uma situação imprópria do ponto de vista construtivo e visual. Isto é consequência da imposição da fixação do número de tramos $m=6$. Certamente, que a estrutura não exige esse número de tramos, parecendo ser suficiente usar $m=4$ ao se transformar o agrupamento de três tramos em apenas um. É o que a Figura 5-51 mostra, revelando uma estrutura visualmente mais harmônica. Nesta configuração a inclinação é maior, passa de 15° ($m=6$) para 17° ($m=4$). No caso da estrutura real as posições das terças coincidem com as dos montantes.

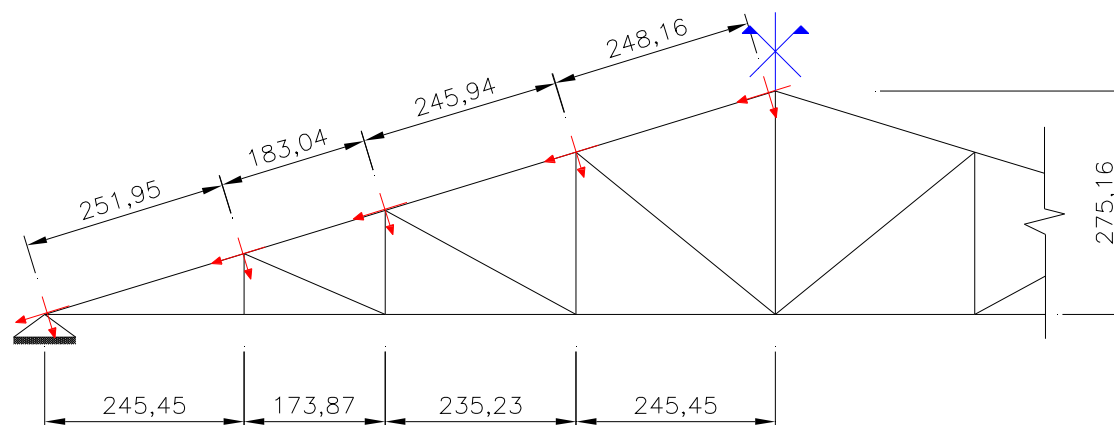


Figura 5-51 – Estrutura otimizada com $m=4$

A Tabela 5-36 compara os resultados entre os dois casos mostrando a diferença entre a estrutura real e a estrutura otimizada. Também pode ser observado que a estrutura com $m=4$ apresenta melhor comportamento em relação aos índices de aproveitamento e redução do consumo de madeira.

Tabela 5-36 – Comparação de resultados entre a estrutura real e otimizada.

	Resistência	Estabilidade X	Estabilidade Y	Volume de madeira (m ³)	Redução no volume de madeira (%)
Estrutura real	0,928	0,782	1,000	0,8216	-
Estrutura otimizada ($m = 6$)	0,345	0,369	0,845	0,7905	3,80
Estrutura otimizada ($m = 4$)	0,278	0,287	0,752	0,7590	7,60

Pela comparação apresentada na Tabela 5-36 percebe-se que a estrutura otimizada apresenta uma vantagem em relação à estrutura real admitindo valores inferiores no cálculo dos dimensionamentos, conseguindo obter um volume de madeira menor, usando para todas as peças a mesma seção transversal. Para a estrutura com número de módulos na direção X igual a 4, a redução no volume de madeira foi de 7,6 % comparado com a estrutura real. Embora a redução do volume seja inferior a 10 %, observa-se que a estrutura terá uma condição de serviço mais folgada em relação à resistência e estabilidades nas duas direções. Neste caso poderia ser avaliada a existência de contraventamento lateral na direção Y, para se conseguir baixar o índice de aproveitamento nesta direção (0,752), fazendo-o aproximar do encontrado para a resistência (0,278) e estabilidade em X (0,287). Este procedimento de igualar os índices de aproveitamento, na realidade, reverte-se numa redução da seção transversal, na tentativa de aproximá-la do valor unitário.

Outra questão que pode ser levantada refere-se ao fato do índice de aproveitamento ter atingido 0,752. Certamente o ponto ótimo não atingiu 1,000 tendo em vista que a seção transversal usada é comercial, ou seja, os valores das dimensões das seções transversais se alteram abruptamente, não permitindo atingir a situação ideal.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Para se ter um entendimento mais detalhado do trabalho realizado é feito neste capítulo uma revisão das principais conclusões encontradas nas análises efetuadas.

Foram estudados três casos de treliças planas do tipo duas águas aplicando o método dos AGs na otimização do menor volume de madeira a ser empregado nas estruturas. A avaliação foi feita para quatro modelos de configurações geométricas distintas e da relação comprimento/largura da área coberta.

A avaliação foi executada por meio do programa de otimização de estruturas planas OTP baseado no método dos AGs. Para análises complementares foi utilizado o programa computacional GESTRUT específico para a determinação de esforços, deslocamentos e, dimensionamento de estruturas.

Foi avaliado o comportamento mecânico das estruturas quando se define a posição das terças, definido pelo usuário em função das dimensões das telhas a serem empregadas, e quando não se define essas posições. Sabe-se, portanto, que ao definir a posição das terças os montantes não coincidem com as mesmas.

A função objetivo (volume de madeira) sofre influência significativa do número de módulos na direção X e das dimensões da seção transversal. Sendo assim, não é possível

definir, de maneira geral, o modelo de treliça indicado para qualquer situação. Pelo contrário, dadas as dimensões do vão coberto é necessário que se faça a otimização do sistema estrutural.

O índice de aproveitamento das seções transversais das treliças foi obtido por meio do programa de dimensionamento de estruturas GESTRUT, e como esperado, em todos os casos analisados, o parâmetro crítico no dimensionamento é a estabilidade em torno do eixo Y.

Os valores máximos das resistências, estabilidades X e Y de cada modelo analisado, distribuiu-se de maneira muito semelhante, sendo que em alguns casos esse valor aproximou-se do valor limite.

Verifica-se que impondo a posição das terças na estrutura, o consumo de madeira ótimo aumenta se comparado com o mesmo caso em que as posições das terças coincidem com os montantes.

Comparando os resultados analisados pode-se dizer que, definidas as dimensões da cobertura, a treliça Pratt apresentou menores valores para consumo de madeira comparado com os valores obtidos para as Treliças Howe e Belga. Isso ocorre somente para esses casos analisados.

Também foi feita uma comparação entre uma estrutura real e uma estrutura otimizada para avaliar o desempenho mecânico. Notou-se o esperado, ou seja, a estrutura otimizada apresentou valores menores de cálculo no dimensionamento da estrutura.

O programa computacional OTP é de fácil utilização, permitindo otimizar diversas estruturas com robustez e eficiência, além de possuir uma amigável interface com o usuário, pois requer do usuário pequena quantidade de dados. O emprego de técnicas de otimização, embora seja uma ferramenta bastante poderosa, não elimina a interferência do usuário. Somente ele tem discernimento quanto à lógica do problema real. Somente sua visão efetiva do problema permite tomar a decisão mais acertada em função das situações e opções apresentadas pelo programa computacional.

Como proposta para trabalhos futuros podem ser realizadas novas otimizações com diferentes casos de arranjos estruturais. Além disto, sugerir a implementação no programa computacional OTP de situações onde seja possível usar diferentes seções transversais entre banzos, montantes e diagonais.

Sem dúvida o uso de ferramentas de otimização é muito importante, especialmente para as situações onde a economia na montagem de uma estrutura produz significativa redução de custo no valor total da obra. É o caso de conjuntos habitacionais, granjas, ou onde sistemas individuais são repetidos diversas vezes.

REFERÊNCIAS

ADELI, H.; CHENG, N. T. Integrated genetic algorithms for optimization of space structure. **Journal of Aerospace Engineering**. ASCE, v. 6, n. 4, p. 315-328, Oct. 1993. Disponível em: < <http://scitation.aip.org/sto>>. Acesso em: 30 nov. 2006.

ADELI, H.; CHENG, N. T. Concurrent genetic algorithms for optimization of large structure. **Journal of Aerospace Engineering**. ASCE, v. 7, n. 3, p. 276-296, July, 1994. Disponível em: < <http://scitation.aip.org/sto>>. Acesso em: 30 nov. 2006.

ARGOLO, W. P. **Otimização de seções de concreto armado submetida à flexo-compressão reta utilizando algoritmo genético**. 2000. 141 f. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil)-COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

BASTOS, E. A. **Otimização de seções retangulares de concreto armado submetidas à flexo-compressão oblíqua utilizando algoritmos genéticos**. 2004. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil)-COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

CAMP, C. V.; BICHON, B. J. Design of space trusses using ant colony optimization. **Journal of Structure Engineering**. v. 130, n. 5, p. 741-751, May, 2004. Disponível em: < <http://scitation.aip.org/sto>>. Acesso em: 30 nov. 2006.

CASTILHO, V. C. **Otimização de componentes de concreto pré-moldado protendidos mediante algoritmos genéticos**. 2003. 238 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas)-Escola de Engenharia de São Carlos/USP, Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 2003.

CASTRO, R. E. **Otimização de estruturas com multi-objetivos via algoritmos genéticos pareto**. 2001. 193 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil)-COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

COHN, M. Z; LOUNIS, Z. Optimal design of structural concrete bridge systems. **Journal of Structure Engineering**. v. 120, n. 9, p 2653-2674, Sept. 1994. Disponível em: < <http://scitation.aip.org/sto>>. Acesso em: 30 nov. 2006.

CORTÊS, C. F. M. **Otimização de treliças planas**. 2002. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Unicamp, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

DORIGO, M. **Ant Colony Optimization**. Iridia. Université Libre de Bruxelles, Belgium. Revisado em nov. 2006. Disponível em: <http://www.aco-metaheuristic.org/RealAnts.html>. Acesso em: 15 nov. 2006.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning**. Reading, Massachusetts, U.S.A., Addison-Wesley Publishing, 1989. 412 p.

KOUMOUSIS, V.K.; GEORGIU, P. G. Genetic algorithms in discrete optimization of steel truss roofs. **Journal Computing in Civil and Engineering**. v. 8, n. 3, p. 309-325, July, 1994. Disponível em: < <http://scitation.aip.org/sto>>. Acesso em: 30 nov. 2006.

KOSKISTO, O. J.; ELLINGWOOD, B. R. Reliability-based optimization of plant precast concrete structures. **Journal of Structure Engineering**, ASCE, v.123, n.3, p.298-304, March, 1997. Disponível em: < <http://scitation.aip.org/sto>>. Acesso em: 30 nov. 2006.

LACERDA, E. G.M ; CARVALHO, A. C. P. L. F. Introdução ao algoritmos genéticos In: GALVÃO, C. O.; VALENÇA, M. J. S (org). **Sistemas inteligentes: aplicações a recursos**

hídricos e ciências ambientais. (Ed.). Universidade/UFRG/ABRH. Porto Alegre, 1999. p 99-150.

LEMONGE, A. C, C. **Aplicação de algoritmos genéticos em otimização Estrutural.** 1999. 218 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil)-COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

MAN, K. F.; TANG, K. S.; KWONG, S. **Genetic algorithms: concepts and designs.** London: Springer, 2001. 344 p.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms + data structures = evolution programs.** 2. ed. Berlin, Springer-Verlag, 1994. 340 p.

OLIVEIRA, B. P. **Otimização do projeto de pontes protendidas pré-moldadas pelo método dos algoritmos genéticos.** 2004. 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil)-COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

PINHEIRO, R. V. **Emprego da madeira do gênero *pinus* na construção de estruturas de cobertura.** 1996. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Escola de Engenharia de São Carlos/ USP, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

PIZZIRANI, F. **Otimização de estruturas utilizando algoritmo genético.** 2003. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Unicamp, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

RIGO, E. **Métodos de otimização aplicados à análise de estruturas.** 1999. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia das Estruturas)-Escola de Engenharia de São Carlos/USP, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

ROCCO LAHR, F. A. Aspectos históricos do emprego das estruturas de madeira para cobertura. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1., 1983, São Carlos. **Anais...** São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1983. p. 1-13.

SOUZA JR, D. A. Otimização pelo método dos algoritmos genéticos e dimensionamento de estruturas tubulares metálicas com barras cruzadas para coberturas. 2005. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.