DOGMAR ANTONIO DE SOUZA JUNIOR

# OTIMIZAÇÃO PELO MÉTODO DOS ALGORITMOS GENÉTICOS E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS TUBULARES METÁLICAS ESPACIAIS COM BARRAS CRUZADAS PARA COBERTURAS

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2005

DOGMAR ANTONIO DE SOUZA JUNIOR

# OTIMIZAÇÃO PELO MÉTODO DOS ALGORITMOS GENÉTICOS E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS TUBULARES METÁLICAS ESPACIAIS COM BARRAS CRUZADAS PARA COBERTURAS

**Tese** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações.

Orientador: Prof. Dr Francisco A. Romero Gesualdo

**UBERLÂNDIA - MG**

**2005**

**DOGMAR ANTONIO DE SOUZA JUNIOR**

# OTIMIZAÇÃO PELO MÉTODO DOS ALGORITMOS GENÉTICOS E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS TUBULARES METÁLICAS ESPACIAIS COM BARRAS CRUZADAS PARA COBERTURAS

Tese **APROVADA** pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Uberlândia.

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações.

Banca Examinadora:

_____
Prof. Dr Francisco A. Romero Gesualdo – UFU – Orientador

_____
Prof. Dr Cleudmar Amaral de Araújo

_____
Profa. Dra Sezimária de Fátima P. Saramago

_____
Prof. Dr Renato Bertolino Junior

_____
Prof. Dr João Alberto Venegas Requena

**Uberlândia, 12 de dezembro de 2005**

À minha esposa Cláudia Regina Nogueira Souza, aos meus filhos Victor Hugo Nogueira Souza, Luis Felipe Nogueira Souza, Marcus Paulo Nogueira Souza e Ana Laura Nogueira Souza e a Deus cujo amor me impulsionou a mais uma vitória em minha vida.

# AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os meus amigos pela força e paciência, em especial a minha esposa Cláudia Regina Nogueira Souza pelo carinho e apoio dedicados durante todo esse período.

Ao meu orientador, Francisco Antonio Romero Gesualdo, pelas idéias e empenho em me auxiliar no que foi necessário para o desenvolvimento da minha tese.

Á Universidade Federal de Uberlândia que junto da Faculdade de Engenharia Mecânica forneceu o apoio necessário à realização deste trabalho, à CAPES pelo apoio financeiro necessário minha manutenção nos primeiros anos de trabalho.

Sobretudo, sou grato a minha família e a Deus que está sempre presente em minha vida.

SOUZA JR, D. A. **Otimização pelo Método dos Algoritmos Genéticos e Dimensionamento de Estruturas Tubulares Metálicas Espaciais com Barras Cruzadas para Coberturas**. 2005. 125 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## Resumo

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento mecânico global de estruturas tubulares metálicas espaciais com barras cruzadas usando o método dos algoritmos genéticos. Todas as avaliações foram feitas a partir do programa computacional OTR (OTimização de estruturas Reticuladas) desenvolvido especificamente para a otimização e dimensionamento de estruturas reticuladas. Para realizar as análises, foi definida como função objetivo, o consumo de tubos dos planos de cobertura. Durante a otimização, para o indivíduo melhor adaptado ao problema o programa computacional gera a malha geométrica, o carregamento da estrutura e, determina os deslocamentos e esforços nas barras. Em seguida, procede-se ao dimensionamento segundo os critérios da NBR8800 (ABNT, 1986). Dessa maneira, pode-se obter conclusões importantes acerca do comportamento mecânico global da estrutura a partir dos resultados obtidos da otimização. Foram avaliadas diversas estruturas com diferentes configurações para a malha geométrica e da relação comprimento/largura da área coberta, uso ou não de tirantes ligando os pilares de apoio e da quantidade e posição dos pilares de apoio. Por fim, fez-se um rápido estudo comparativo entre o modelo estrutural proposto e o modelo do tipo treliça. Os resultados obtidos mostraram que o programa OTR é uma ótima ferramenta para análise de estruturas reticuladas, podendo ser adaptado a diversos outros problemas. Conclui-se também que as estruturas tubulares metálicas com barras cruzadas para coberturas são competitivas do ponto de vista econômico.

*Palavras Chave: Otimização. Algoritmo Genético. Estruturas Metálicas. Perfil Tubular. Comportamento mecânico.*

SOUZA JR, D. A. **Optimization and Design of Three Dimensional Tubular Steel Covering Structure Formed by Crossed Members Using Genetic Algorithm**. 2005. 125 f. Dr Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

## Abstract

The goal of this work is to evaluate the global mechanical behavior for three dimensional structure formed by circular hollow sections. The structure is represented by crossed tubular members. All the evaluations had been made by a computational program OTR developed specifically to optimize the structure. For carrying out the analyses, it was defined as objective function, the consumption of tubes of the covered plans. During the optimization, for the individual better adapted to the problem, the software generates the geometric mesh, loads on the structure e determines the displacements e the member forces. After that, all these parameters are checked according to the Brazilian code from the NBR8800 (ABNT, 1986). In this way, it can be gotten important conclusions concerning to the global mechanical behavior of the structure from the results of the optimization. Several structures with different configurations was evaluated, varying the geometric mesh, the relation length/width of the covered area, use or not of steel tie rod connecting supports and either the amount and location of supports along the length. Finally, a comparative study between the structural model considered e the model of the plane truss was done. The results had shown that software OTR is an excellent tool for analysis of reticulated structures, and easily can be adapted to different problems. It is also concluded that the tubular steel structures with crossed members for roofs are competitive in terms of economic if compared to the other structural systems.

*Keywords: Optimization, Genetic Algorithm, Steel Structures, Hollow Structural Sections. Mechanic Behavior.*

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1.1 - Vista geral do tipo de estrutura a ser estudada ..... 4
Figura 2.1 - Pirâmide em aço e vidro em Wurzburgo, Alemanha (MEYER, 2001)..... 6
Figura 2.2 - Fase final da montagem de um domo em estrutura metálica tubular (MEYER, 2001) ..... 7
Figura 2.3 - Grua no Porto de Tubarão - ES (MEYER, 2001)..... 8
Figura 2.4 - Detalhamento da estrutura de cobertura e suas constantes e variáveis de projeto ..... 10
Figura 3.1 - Descrição gráfica dos elementos genéticos ..... 17
Figura 3.2 - Exemplo de seleção pelo método da roleta ..... 20
Figura 4.1 – Tela principal do programa computacional OTR..... 26
Figura 4.2 – Tela de entrada do peso próprio e da sobrecarga ..... 28
Figura 4.3 – Tela de entrada dos parâmetros necessários para a definição do carregamento devido à ação do vento..... 28
Figura 4.4 – Ilustração da tela “Abertura dominante em uma face”..... 29
Figura 4.5 - Ilustração do carregamento e dos esforços sobre uma barra ..... 30
Figura 4.6 - Fluxograma do algoritmo genético implementado ..... 35
Figura 5.1 - Função utilizada na avaliação da robustez à multimodalidade - Caso2 ..... 38
Figura 5.2 - Função utilizada na avaliação da robustez à multimodalidade - Caso 3 ..... 39
Figura 5.3 - Função objetivo versus Número de execuções para o caso 3..... 40
Figura 5.4 - Função utilizada na minimização (a) sem ruído; (b) com e sem ruído..... 41
Figura 5.5 - Gradiente da função otimizada ..... 42
Figura 5.6 - Determinação da posição de equilíbrio estático de um sistema de duas molas. 43
Figura 5.7 - Treliça plana formada por 3 barras ..... 45
Figura 5.8 – Tempo de execução versus Número de execuções para otimização useo o operador mutação restrita..... 49
Figura 5.9 - Tempo de execução versus Número de execuções para otimização sem usar o operador mutação restrita..... 50
Figura 5.10 – Função objetivo versus Número de execuções para otimização sem usar o operador mutação restrita..... 50

Figura 5.11 - Tempo de execução versus Número de execuções para otimização sem usar o operador mutação restrita – 200 gerações ..... 51
Figura 5.12 - Função objetivo versus Número de execuções para otimização sem usar o operador mutação restrita – 200 gerações ..... 51
Figura 6.1 - Ilustração da estrutura de cobertura com barras cruzadas. a) Caso 1; b) Caso 2; c) Caso 3; d) Caso 4; e) Caso 5 ..... 55
Figura 6.2 - Resultados obtidos para o aumento no consumo de aço do modelo 1 ..... 56
Figura 6.3 – Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1 ..... 57
Figura 6.4 – Esforço de flexão máximo em torno do eixo x atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1 ..... 57
Figura 6.5 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo y atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1 ..... 57
Figura 6.6 - Resultados obtidos para o aumento no consumo de aço do modelo 2 ..... 58
Figura 6.7 - Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 2 ..... 58
Figura 6.8 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo x atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 2 ..... 59
Figura 6.9 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo y atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 2 ..... 59
Figura 6.10 - Resultados obtidos para o aumento no consumo de aço do modelo 3 ..... 60
Figura 6.11 - Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 3 ..... 60
Figura 6.12 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo x atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 3 ..... 60
Figura 6.13 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo y atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 3 ..... 61
Figura 6.14 - Ilustração da estrutura de cobertura com barras cruzadas e com tirantes ..... 62
Figura 6.15 – Redução no consumo de tubos em função do diâmetro do tirante para o modelo 1 ..... 63
Figura 6.16 - Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1 ..... 63
Figura 6.17 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo x ($M_x$) atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1 ..... 63

Figura 6.18 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo y ($M_y$) atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1 ..... 64
Figura 6.19 - Redução no consumo de tubos em função do diâmetro do tirante para o modelo 2 ..... 65
Figura 6.20 - Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 2 ..... 65
Figura 6.21 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo x atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 2 ..... 65
Figura 6.22 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo y atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 2 ..... 66
Figura 6.23 - Redução no consumo de tubos em função do diâmetro do tirante para o modelo 3 ..... 67
Figura 6.24 - Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 3 ..... 68
Figura 6.25 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo x ($M_x$) atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 3 ..... 68
Figura 6.26 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo y ($M_y$) atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 3 ..... 68
Figura 6.27 - Resultados obtidos para o aumento no consumo de aço do modelo 1 ..... 70
Figura 6.28 - Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1 ..... 70
Figura 6.29 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo x atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1 ..... 71
Figura 6.30 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo y atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1 ..... 71
Figura 6.31 - Resultados obtidos para o aumento no consumo de aço do modelo 2 ..... 72
Figura 6.32 - Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 2 ..... 73
Figura 6.33 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo x atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 2 ..... 73
Figura 6.34 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo y atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 2 ..... 73
Figura 6.35 - Resultados obtidos para o aumento no consumo de aço do modelo 3 ..... 74
Figura 6.36 - Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 3 ..... 75

Figura 6.37 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo x atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 3 ..... 75
Figura 6.38 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo y atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 3 ..... 75
Figura 6.39 - Resultados obtidos para o deslocamento vertical máximo do modelo 1 ..... 77
Figura 6.40 - Resultados obtidos para o consumo de tubos do modelo 1..... 78
Figura 6.41 - Resultados obtidos para o deslocamento vertical máximo do modelo 2 ..... 79
Figura 6.42 - Resultados obtidos para o consumo de tubos do modelo 2..... 80
Figura 6.43 - Resultados obtidos para o deslocamento vertical máximo do modelo 3 ..... 81
Figura 6.44 - Resultados obtidos para o consumo de tubos do modelo 3..... 81
Figura 6.45 - Avaliação da viabilidade da estrutura em função do comprimento da área coberta ..... 84
Figura 6.46 - Avaliação da viabilidade da estrutura em função da largura da área coberta .. 87
Figura 6.47 - Resultados obtidos para o consumo de tubos da estrutura espacial com barras cruzadas com diferentes valores para a relação comprimento/largura da área coberta . 90
Figura 6.48 - Vista geral da estrutura do modelo 1 com numeração dos nós ..... 92
Figura 6.49 – Vista geral da estrutura do modelo 1 com barras numeradas..... 94
Figura 6.50 - Ilustração da distribuição de barras da estrutura com numeração dos nós..... 96
Figura 6.51 – Vista geral da estrutura do modelo 2 com barras numeradas..... 97
Figura 6.52 – Ilustração do modelo espacial com barras cruzadas otimizado do modelo 1 .. 99
Figura 6.53 – Mapa do esforço de flexão $M_x$ (N.m) nas barras da estrutura espacial com barras cruzadas ..... 99
Figura 6.54 – Mapa do esforço normal (N) nas barras da estrutura espacial com barras cruzadas..... 100
Figura 6.55 – Ilustração do modelo 1 tipo treliça otimizado ..... 101
Figura 6.56 – Mapa do esforço de flexão $M_x$ (N.m) nas barras da treliça do modelo 1 ..... 101
Figura 6.57 – Mapa do esforço normal (N) nas barras da treliça do modelo 1 ..... 101
Figura 6.58 - Ilustração do modelo espacial com barras cruzadas otimizado do modelo 2. 102
Figura 6.59 – Mapa do esforço de flexão $M_x$ (N.m) nas barras da estrutura espacial com barras cruzadas ..... 103
Figura 6.60 – Mapa do esforço normal (N) nas barras da estrutura espacial com barras cruzadas..... 103
Figura 6.61 - Ilustração do modelo 2 tipo treliça otimizado..... 104
Figura 6.62 - Mapa do esforço de flexão $M_x$ (N.m) nas barras da treliça do modelo 2 ..... 104

Figura 6.63 - Mapa do esforço normal (N) nas barras da treliça do modelo 2 ..... 105
Figura A.1 - Vista geral da estrutura espacial com barras cruzadas ..... 115
Figura A.2 – Vista frontal da cobertura do tipo treliça ..... 116
Figura A.3 – Vista superior da planta de cobertura ..... 116
Figura A.4 – Tela principal do programa computacional OTR ..... 117
Figura A.5 – Escolha para escolha do tipo da estrutura e do material a ser otimizada ..... 118
Figura A.6 – Tela para escolha das propriedades físicas da madeira ..... 118
Figura A.7 – Ilustração das telas de entrada, visualização e cadastro de tubos ..... 120
Figura A.8 – Tela de entrada do peso próprio e da sobrecarga ..... 120
Figura A.9 – Tela de entrada dos parâmetros necessários para a definição do carregamento devido à ação do vento ..... 120
Figura A.10 – Tela “Duas faces igualmente permeáveis” ..... 121
Figura A.11 – Tela “Abertura dominante em uma face” ..... 121
Figura A.12 – Tela “Proporção para abertura dominante na face de barlavento” ..... 122
Figura A.13 – Tela “Abertura dominante” para incidência de vento a 0° ..... 122
Figura A.14 - Tela “Abertura dominante” para incidência de vento a 90° ..... 123
Figura A.15 – Tela “Proporção para abertura dominante situada em zona de alta sucção” ... ..... 123
Figura A.16 – Tela “Operadores” ..... 124
Figura A.17 – Tela para otimização de funções matemáticas ..... 125

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Produção de aço bruto ..... 2
Tabela 3.1 – Função Aptidão e probabilidade de seleção ..... 19
Tabela 5.1 - Valores para os parâmetros de entrada do AG ..... 36
Tabela 5.2 - Resultados da minimização da função matemática (5.1) ..... 37
Tabela 5.3 - Resultados dos testes de otimização empregeo o método BFGS e os AGs ..... 38
Tabela 5.4 - Resultados obtidos para o Caso 3 ..... 40
Tabela 5.5 - Resultados obtidos dos testes de otimização - sem ruído ..... 41
Tabela 5.6 - Resultados obtidos dos testes de otimização - com ruído ..... 42
Tabela 5.7 - Resultados obtidos da minimização da função energia (PE) ..... 43
Tabela 5.8 - Resultados obtidos da minimização da função ..... 44
Tabela 5.9 - Resultados obtidos da minimização do volume da treliça ..... 46
Tabela 5.10 - Resultados obtidos da minimização do volume da treliça ..... 47
Tabela 5.11 - Parâmetros geométricos e propriedades mecânicas dos materiais que compõem as estruturas ..... 48
Tabela 5.12 - Valores usados para definir o carregamento da estrutura ..... 48
Tabela 5.13 - Valores para os parâmetros do AG ..... 48
Tabela 5.14 - Resumo dos parâmetros otimizados da estrutura ..... 49
Tabela 6.1 - Parâmetros geométricos e propriedades mecânicas dos materiais que compõem as estruturas ..... 53
Tabela 6.2 - Valores usados para definir o carregamento da estrutura ..... 53
Tabela 6.3 - Valores para os parâmetros do AG ..... 54
Tabela 6.4 - Vão coberto *x* Número máximo de módulos em cada direção ..... 54
Tabela 6.5 - Resultados obtidos na otimização do modelo 1 ..... 56
Tabela 6.6 - Resultados obtidos na otimização do modelo 2 ..... 58
Tabela 6.7 - Resultados obtidos na otimização do modelo 3 ..... 59
Tabela 6.8 - Resultados obtidos para a otimização da estrutura de cobertura do modelo1 com diferentes valores para o diâmetro do tirante ..... 62
Tabela 6.9 - Resultados obtidos para a otimização da estrutura de cobertura do modelo 2 com diferentes valores para o diâmetro do tirante ..... 64

Tabela 6.10 - Resultados obtidos para a otimização da estrutura de cobertura do modelo 3 com diferentes valores para o diâmetro do tirante ..... 67
Tabela 6.11 – Resumo dos resultados obtidos para os parâmetros otimizados do modelo 1 ..... 69
Tabela 6.12 – Esforços máximos nos pilares de apoio do modelo 1 ..... 70
Tabela 6.13 – Resumo dos resultados obtidos para os parâmetros otimizados do modelo 2 ..... 72
Tabela 6.14 – Esforços máximos nos pilares de apoio do modelo 2 ..... 72
Tabela 6.15 – Resumo dos resultados obtidos para os parâmetros otimizados do modelo 3 ..... 74
Tabela 6.16 – Esforços máximos nos pilares de apoio do modelo 3 ..... 74
Tabela 6.17 - Resultados obtidos do deslocamento máximo da estrutura e do consumo de tubos do modelo 1 ..... 77
Tabela 6.18 - Parâmetros otimizados da estrutura de cobertura do modelo 1 ..... 77
Tabela 6.19 - Resultados obtidos do deslocamento máximo da estrutura e do consumo de tubos do modelo 2 ..... 79
Tabela 6.20 - Parâmetros otimizados da estrutura de cobertura do modelo 2 ..... 79
Tabela 6.21 - Resultados obtidos do deslocamento máximo da estrutura e do consumo de tubos do modelo 3 ..... 80
Tabela 6.22 - Parâmetros otimizados da estrutura de cobertura do modelo 3 ..... 81
Tabela 6.23 - Resultados obtidos para a otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas em função do comprimento da área coberta - Modelo 1 (largura=10m) ..... 83
Tabela 6.24 - Resultados obtidos para a otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas em função do comprimento da área coberta - Modelo 2 (largura = 15m) ..... 83
Tabela 6.25 - Resultados obtidos para a otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas em função do comprimento da área coberta - Modelo 3 (largura = 20m) ..... 84
Tabela 6.26 - Resultados obtidos para a otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas em função da largura da área coberta - Modelo 1. ..... 85
Tabela 6.27 - Resultados obtidos para a otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas em função da largura da área coberta - Modelo 2 ..... 86
Tabela 6.28 - Resultados obtidos para a otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas em função da largura do vão - Modelo 3 ..... 86
Tabela 6.29 - Resultados obtidos na otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas com relação comprimento/largura igual a 1.0 ..... 88

Tabela 6.30 - Resultados obtidos na otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas com relação comprimento/largura igual a 1.2 ..... 88
Tabela 6.31 - Resultados obtidos na otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas com relação comprimento/largura igual a 1.4 ..... 89
Tabela 6.32 - Resultados obtidos na otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas com relação comprimento/largura igual a 1.6 ..... 89
Tabela 6.33 - Resultados obtidos na otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas com relação comprimento/largura igual a 1.8 ..... 90
Tabela 6.34 - Resumo dos parâmetros otimizados do modelo 1 ..... 93
Tabela 6.35 - Deslocamentos verticais máximos para o modelo 1 ..... 93
Tabela 6.36 - Esforços máximos atuantes nas barras que compõem os planos de cobertura do modelo 1 ..... 93
Tabela 6.37 – Esforços máximos nos pilares de apoio do modelo 1 ..... 93
Tabela 6.38 - Resumo dos parâmetros otimizados do modelo 2 ..... 95
Tabela 6.39 - Deslocamentos máximos para o modelo 2 ..... 95
Tabela 6.40 - Esforços máximos atuantes nas barras que compõem os planos de cobertura do modelo 2 ..... 96
Tabela 6.41 – Esforços máximos nos pilares de apoio do modelo 2 ..... 97
Tabela 6.42 - Resumo dos parâmetros otimizados para a estrutura espacial com barras cruzadas do modelo 1 ..... 98
Tabela 6.43 - Resumo dos parâmetros otimizados para a estrutura do tipo treliça ..... 100
Tabela 6.44 - Resumo dos parâmetros otimizados para a estrutura espacial com barras cruzadas do modelo 2 ..... 102
Tabela 6.45 - Resumo dos parâmetros otimizados para a estrutura do tipo treliça ..... 104

## LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---|---|
| A | Identificação do perfil tubular computacionalmente |
| a | Índice de aptidão |
| AGs | Algoritmos genéticos |
| C | Comprimento da cobertura |
| $C_{mx}$ | Coeficiente, corresponde a flexão em torno do eixo x |
| $C_{my}$ | Coeficiente, corresponde a flexão em torno do eixo y |
| D | Diâmetro do tubo |
| d | Parâmetro que define o operador recombinação intermediária |
| E | Módulo de elasticidade |
| e | Espessura do tubo |
| $f$ | Função custo de cada indivíduo |
| $F$ | Função custo total da população |
| $f_y$ | Limite de escoamento do aço |
| G | Módulo de elasticidade transversal |
| h | Altura da cobertura |
| I | Indivíduo |
| $l'$ | Projeção do comprimento da barra no plano xOz |
| $l$ | Comprimento da barra no plano de cobertura (distância entre dois nós consecutivos) |
| $l_{máx}$ | Comprimento máximo da barra padrão definido pelo usuário |
| L | Largura da cobertura |
| m | Número de módulos na direção x |
| M | Momento fletor |
| $M_{dx}$ | Momento fletor de cálculo em torno da direção x |
| $M_{dy}$ | Momento fletor de cálculo em torno da direção y |
| $M_x$ | Momento fletor em torno da direção x |
| $M_y$ | Momento fletor em torno da direção y |
| $M_t$ | Momento torçor |
| n | Número de módulos na direção z |
| N | Esforço normal |
| $N_d$ | Esforço normal de cálculo |

| | |
|---|---|
| $N_{ex}$ | Carga de flambagem elástica por flexão em torno do eixo x |
| $N_{ey}$ | Carga de flambagem elástica por flexão em torno do eixo y |
| | |
| Nvar | Valor da variável gerado após o método da mutação |
| OTR | Programa computacional de Otimização de Estruturas Reticuladas |
| P | Probabilidade de seleção acumulada |
| p | Probabilidade de seleção |
| $p_i$ | Probabilidade de seleção do indivíduo i |
| $p_m$ | Taxa de mutação |
| pop | População |
| pp | Peso próprio da cobertura |
| $p_r$ | Taxa de recombinação discreta |
| q | Probabilidade de seleção acumulada de um indivíduo |
| Q | Quantidade de tubos usada na cobertura |
| r | Número aleatório entre 0 e 1 |
| S | Somatório dos índices de aptidão |
| $S_1$ | Fator topográfico |
| $S_2$ | Fator associado à edificação e seu entorno |
| $S_3$ | Fator estatístico |
| $var_I$ | Limite inferior da variável a ser mutada |
| V | Esforço cortante |
| W | Carregamento devido à ação do vento |
| x | variável de projeto |
| $\Delta var$ | Diferença entre o limite superior e inferior da variável |
| | |
| $\alpha$ | Ângulo entre as barras que formam o plano de cobertura |
| $\beta$ | Fator de escala (número aleatório entre –d e 1+d) |
| $\theta$ | Ângulo de inclinação da cobertura |
| $\phi$ | Coeficiente de resistência |
| $\phi_b$ | Coeficiente de resistência ao momento fletor |
| $\phi_c$ | Coeficiente de resistência a compressão |

## SUMÁRIO

**CAPÍTULO 1 - Introdução ..... 1**

**CAPÍTULO 2 – Revisão Bibliográfica ..... 6**

2.1 Aplicação dos perfis tubulares ..... 6

2.2 Definição do problema de otimização ..... 9

***2.2.1*** *Variáveis de projeto ..... 11*

***2.2.1*** *Função objetivo ..... 11*

**CAPÍTULO 3 – Fundamentos dos Algoritmos Genéticos ..... 13**

3.1 Introdução ..... 13

3.2 Terminologia ..... 16

3.3 Descrição dos operadores usados no algoritmo genético ..... 17

***3.3.1*** *Seleção ..... 18*

***3.3.1.1*** *Seleção pelo método da roleta ..... 18*

***3.3.2*** *Recombinação ou cruzamento ..... 20*

***3.3.2.1*** *Recombinação discreta ..... 20*

***3.3.2.2*** *Recombinação intermediária ..... 21*

***3.3.3*** *Mutação ..... 22*

***3.3.3.1*** *Mutação uniforme ..... 22*

***3.3.3.2*** *Mutação restrita ..... 22*

***3.3.4*** *Elitismo ..... 23*

***3.3.5*** *Critério de Parada ..... 23*

**CAPÍTULO 4 – Algoritmo Genético Aplicado à Estrutura de Cobertura com Barras Cruzadas ..... 24**

4.1 Funcionamento do algoritmo genético ..... 24

**CAPÍTULO 5 – Estudo da Confiabilidade e da Eficiência do Programa Computacional OTR ..... 36**

5.1 Introdução ..... 36

5.2 Avaliação da confiabilidade do algoritmo genético implementado ..... 36

***5.2.1*** *Minimização de uma função matemática - Caso 1 ..... 37*

***5.2.2*** *Minimização de uma função matemática - Caso 2 ..... 37*

***5.2.3*** *Minimização de uma função matemática - Caso 3 ..... 39*

***5.2.4*** *Minimização de uma função matemática - Caso 4* ..... *40*
***5.2.5*** *Minimização da energia de um sistema de 2 molas* ..... *42*
***5.2.6*** *Minimização de uma função matemática com restrição* ..... *44*
***5.2.7*** *Minimização do volume de uma treliça* ..... *45*
5.3 Análise da influência do operador mutação restrita no desempenho do algoritmo genético ..... 47
**CAPÍTULO 6 - Análise da Eficiência Global do Modelo Estrutural para Cobertura com Barras Cruzadas ..... 52**
6.1 Introdução ..... 52
6.2 Avaliação da influência das barras de contorno e de cumeeira no comportamento mecânico da estrutura ..... 54
6.3 Avaliação da Influência do Tirante no Desempenho Mecânico Global da Estrutura ..... 61
6.4 Avaliação da Influência do Ângulo de Inclinação da Cobertura no Comportamento Mecânico Global da Estrutura ..... 76
***6.4.1*** *Modelo 1* ..... *76*
***6.4.2*** *Modelo 2* ..... *78*
***6.4.3*** *Modelo 3* ..... *80*
6.5 Avaliação da viabilidade da estrutura em função dos comprimentos de vãos ..... 82
***6.5.1*** *Introdução* ..... *82*
***6.5.2*** *Caso 1 - Largura fixa* ..... *82*
***6.5.3*** *Caso 2 - Comprimento fixo* ..... *85*
6.6 Avaliação da relação comprimento/largura no comportamento mecânico da estrutura de cobertura com barras cruzadas ..... 87
6.7 Análise da influência do número de pilares no comportamento mecânico global de estruturas de cobertura com barras cruzadas ..... 91
***6.7.1*** *Modelo 1* ..... *91*
***6.7.2*** *Modelo 2* ..... *95*
6.8 Um Breve Comparativo entre Estruturas Espaciais Tubulares com Barras Cruzadas e Treliças de Duas Águas para Coberturas ..... 98
***6.8.1*** *Otimização do modelo 1* ..... *98*
***6.8.2*** *Otimização do modelo 2* ..... *102*

**CAPÍTULO 7 – Conclusões e Perspectivas Futuras ..... 106**
**CAPÍTULO 8 – Referências Bibliográficas ..... 109**
**APÊNDICE – Descrição e Funcionamento do Programa Computacional OTR .....115**

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

O grau de desenvolvimento de um país está ligado diretamente à quantidade de produtos industrializados existentes. No entanto, de acordo com o levantamento feito por Lima (2001) o Brasil possui, em relação ao mercado da construção civil, uma série de problemas em sua cadeia produtiva. Dentre eles se destacam:

- Baixa industrialização;
- Limites à obtenção de economia de escala e ganhos de produtividade;
- Heterogeneidade de produtos com diferenciados níveis de capacitação tecnológica e tamanho das empresas;
- Baixa integração dos elos (Cliente - Projetista - Fabricantes - Construtoras);
- Índices insuficientes de conformidade;
- Baixa produtividade da mão-de-obra combineo falta de qualificação, falta de segurança e desperdício.

Além destes problemas, o uso de aço estrutural no Brasil ainda é pequeno se comparado com o volume utilizado nos Estados Unidos, Japão e países da Europa (SANTOS, 2001; HUALLEM, 2001). Segundo Huallem (2001), enquanto no Brasil o consumo per capita está em torno de 3 quilos (considere o Brasil com 169 milhões de habitantes, segundo dados mais recentes do IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), nas nações mais desenvolvidas o consumo é da ordem de 30 quilos per capita.

Não existem ainda estatísticas confiáveis e sistemáticas sobre o uso no Brasil de aço estrutural na construção civil. Contudo, os estudos já efetuados no exterior são bastante positivos, demonstrando um consistente crescimento da utilização de estruturas metálicas. A Tabela 1.1 mostra a evolução da produção de aço desde 1970, no Brasil e no mundo:

Tabela 1.1 - Produção de aço bruto

| Produção de Aço Bruto ($x10^6$ ton) | 1970 | 1980 | 1990 | 1998 | 1999 | 2000 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Mundial (A) | 595.4 | 715.6 | 770.5 | 777.5 | 778.45 | 847.4 |
| América Latina (B) | 13.2 | 28.9 | 38.2 | 51.4 | 51 | 56.1 |
| Brasil (C) | 5.4 | 15.3 | 20.6 | 25.8 | 25.0 | 27.9 |
| C/A | 0.9% | 2.1% | 2.7% | 3.3% | 3.2% | 3.3% |
| C/B | 40.95 | 52.9% | 53.9% | 50.1% | 49.1% | 49.7% |
| Posição do Brasil | 18ª | 10ª | 9ª | 8ª | 8ª | 8ª |

Fonte: IISI/ILAFA/IBS

Diante deste quadro, há muito por fazer no Brasil para serem alcançados os índices dos países desenvolvidos. No entanto, nota-se uma resposta positiva de diversas empresas instaladas no Brasil que estão investindo em centros de pesquisa, entidades de classe e suas plantas de produção, buscando tecnologia de ponta e processos construtivos modernos e alternativos.

Uma alternativa construtiva que está ganhando espaço no mercado são as estruturas tubulares. Elas são formadas por perfis de seção transversal fechada oca, o que representa uma vantagem estrutural em relação aos perfis metálicos tradicionais. Apesar do custo mais elevado, se usado de forma racional em sistemas estruturais que utilizem o máximo de sua capacidade resistente, os perfis tubulares tornam-se competitivos.

Devido à sua geometria, o uso de perfis tubulares na construção de estruturas metálicas traz diversas vantagens, tais como:

- Grande resistência à torção;
- Os tubos redondos apresentam a mesma segurança à flambagem em todas as direções e nos retangulares a variação é pequena;
- Ótima resistência à flexão;
- No caso de pilares, a possibilidade de enchimento com concreto aumenta a resistência mecânica e evita flambagens locais;
- Resistência favorável a correntes de vento e de água, pela ausência de entranhas, quinas e pontos de obstrução;
- Estética favorável, especialmente nas ligações diretas sem chapas adicionais, produzindo um visual mais leve e agradável.

Especialmente a utilização de tubos circulares, produz interessante efeito arquitetônico, pois a seção transversal circular não tem quinas expostas e não tem pontos agudos. Sua forma é harmônica e tem menor área de exposição. A inexistência de quinas favorece a proteção à corrosão e evita o acúmulo de sujeira, sendo altamente recomendada para ambientes onde a limpeza é importante, tais como indústrias de alimentos e farmacêuticas (SOUZA JR; GESUALDO, 2004).

No entanto, apesar de todas estas vantagens, o tema “estruturas tubulares”, quando considerado como uma sub-área dentro das estruturas metálicas, é ainda recente. As publicações com o formato de livro convencional contendo um desenvolvimento sequencial são raras. Dentre elas têm-se os trabalhos de Packer e Handerson (1997), Meyer (2002) e de Jármais e Farkas (1996). Mesmo assim, a última publicação citada é uma coletânea de seis artigos escritos por diferentes autores.

Os eventos científicos abordando o tema passaram a existir somente a partir da segunda metade da década de 70. Desde então, significativo material bibliográfico na forma de artigos científicos passou a ser publicado.

As diversas pesquisas internacionais feitas para desenvolver o uso estrutural dos tubos levaram às normas específicas para o uso destes perfis. Nestes estudos foi proveitosa à experiência acumulada em construções de plataformas de prospecção de petróleo em águas profundas, Meyer (2002). O dimensionamento de elementos estruturais tubulares, em geral, apresenta pouca diferença em relação ao dos perfis tradicionais. Entretanto, no caso das ligações, apesar das diversas pesquisas na área (FILIPKOWSKI; KRYSZTOFORSKI, 1993; CHIEW et al., 1998; VEGTE; WARDENIER,1998; MALITE et al., 1998), ainda não foi possível obter uma formulação geral para o seu cálculo, o que só pode ser conseguido com uma série de parâmetros para os diferentes tipos de nós e de ações.

Dentro deste contexto, o objetivo geral deste trabalho é a elaboração de um programa computacional baseado no método dos algoritmos genéticos para minimizar o consumo de aço de estruturas espaciais com barras cruzadas para coberturas (Fig. 1.1) formadas por perfis tubulares de seção circular oca. E avaliar o comportamento mecânico deste tipo de estrutura em função dos parâmetros geométricos que a define. Isto implica na disponibilização de um programa computacional confiável, aberto para futuras aplicações em outras situações. Além disto, ter-se-á o conhecimento de um sistema estrutural diferenciado, não convencional, dentro de uma perspectiva atual que é a busca de inovações em função de novas ferramentas. Há que se destacar que o uso de sistemas treliçados convencionais significa uma repetição consagrada – sem nenhum demérito ao mesmo–, mas que está baseado em procedimentos de uma época em que calcular um

sistema treliçado como pórtico significava um esforço relevante do calculista. Assim, a avaliação do tipo de estrutura proposto é a busca de inovações quanto à concepção estrutural.

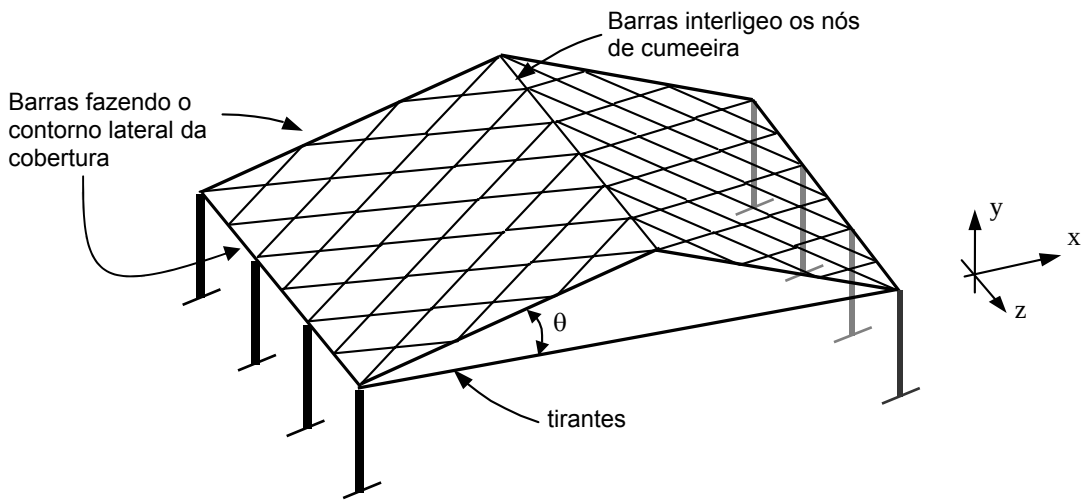



Figura 1.1 - Vista geral do tipo de estrutura a ser estudada

A idéia de se estudar estruturas deste tipo surgiu a partir dos bons resultados obtidos em pesquisa anterior aplicada à madeira, onde foi avaliada a estrutura do tipo lamelar de eixo cilíndrico, Ferreira (1999). A eficiência da estrutura é bastante grande. O modelo de cobertura com barras cruzadas formado por dois planos (duas águas), além da simplicidade, apresenta a vantagem da distribuição homogênea e tridimensional, proporcionando uma maior interação entre os elementos resistentes. Associando estas vantagens às apresentadas pelos elementos tubulares metálicos de baixo peso, acredita-se obter um ótimo sistema estrutural para pequenos e médios vãos, que pode ser produzido em escala industrial, devido às suas características gerais.

Este trabalho é constituído por sete capítulos, organizados da seguinte maneira:

O capítulo I contém a introdução geral do trabalho.

O capítulo II apresenta uma revisão bibliográfica sobre o uso de perfis tubulares, bem como, define-se o modelo estrutural a ser otimizado.

No capítulo III apresenta-se uma introdução geral sobre os métodos de otimização e os fundamentos dos Algoritmos Genéticos (AGs). São detalhados os operadores genéticos implementados no programa computacional OTR (SOUZA JR; GESUALDO, 2005a).

O capítulo IV ilustra a aplicação do algoritmo genético na otimização de uma estrutura de cobertura com barras cruzadas formada por perfis tubulares.

No capítulo V é avaliada a confiabilidade e eficiência do programa computacional OTR (SOUZA JR; GESUALDO, 2005b). Para tanto, foram otimizadas diversas funções matemáticas e problemas de engenharia com soluções conhecidas na literatura.

O capítulo VI é feita uma análise do comportamento global da estrutura de cobertura com barras cruzadas através dos resultados obtidos da otimização de três modelos utilizando o programa computacional OTR.

Por fim, no capítulo VII são apresentadas as principais conclusões e a proposta de continuidade do trabalho.

# CAPÍTULO 2

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aplicação dos perfis tubulares

Neste trabalho, entender-se-á por tubos, os perfis fechados de seção transversal circular, quadrada ou retangular com espessura constante, ou seja, elementos ocos de comprimento bem maior que a sua seção transversal.

Para designar a forma da seção transversal, serão usadas abreviações dos termos em inglês conforme tendência internacional.

- CHS seção circular (Circular Hollow Section)
- RHS seção retangular (Retangular Hollow Section)
- QHS seção quadrada (Quadratic Hollow Section)

A utilização dos tubos estruturais como elementos de construção abrange as mais variadas áreas da engenharia e arquitetura. A Figura 2.1 ilustra o uso de perfis tubulares como pilares expostos em paredes envidraçadas, bem como o entrelaçamento entre perfis na região inclinada da cobertura, aproximando-se ao caso estudado neste trabalho.

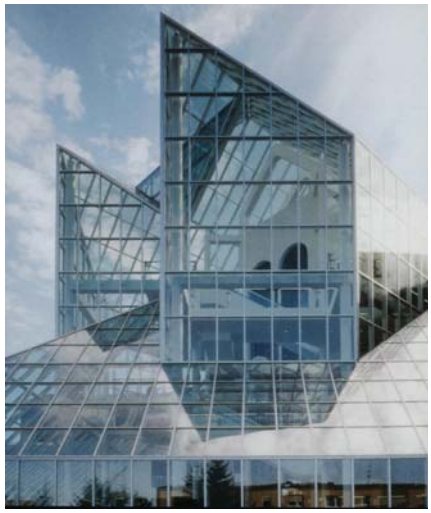


Figura 2.1 - Pirâmide em aço e vidro em Wurzburgo, Alemanha (MEYER, 2001)

A Figura 2.2 mostra o emprego dos perfis tubulares na construção de uma cobertura em forma de cúpula.

Figura 2.2 - Fase final da montagem de um domo em estrutura metálica tubular (MEYER, 2001)

Os perfis tubulares ainda são usados na construção de veículos rodoviários e ferroviários, como chassis e carroçarias de caminhões, ônibus, reboques, vagões de trem, caminhões-tanque, vagões de bonde, plataformas de assistência móveis, instalações de lavagem mecânica, plataformas hidráulicas, chassis de locomotivas, instalações offshore (MENEZES; GALGOUL, 2002) e na indústria naval, torres de perfuração (CARVALHO; PINHO; BATTISTA, 2002), heliportos em plataformas, torres de radares para navios e de linhas de transmissão (GABRIELLI; NEVES, 2004). Além de outras aplicações também são utilizados como travessas e dispositivos para aparelhos e maquinarias agrícolas, na construção ou movimentação de cargas como estruturas de gruas (Fig. 2.3). Como se percebe, os perfis tubulares admitem o seu emprego como elemento estrutural nas mais diversas aplicações.

No Brasil, a construção metálica, neste início de século, se apresenta com arranjos estruturais arrojados e sofisticados, utilizada nos mais diversos ambientes, abrangendo desde a moradia popular até aeroportos, shoppings, hospitais e edifícios comerciais diversos, ainda que os números sejam relativamente pequenos.

É cada vez maior a exigência do mercado por sistemas construtivos industrializados cujas soluções técnicas sejam adequadas ao rápido crescimento computacional disponível, visando a substituição da improvisação pela tecnologia, a ampliação das opções construtivas com o uso de aços de maior resistência, a diminuição do desperdício e do custo de produção.

Figura 2.3 - Grua no Porto de Tubarão - ES (MEYER, 2001)

No sentido de promover a industrialização e automação dos processos construtivos utilizando perfis metálicos, a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (FEC – UNICAMP) em convênio com a empresa Vallourec e Mannesmann do Brasil desenvolveu, de acordo com a norma brasileira NBR8800 (ABNT, 1986), um programa computacional denominado “AutoMETAL – V e M do Brasil – UNICAMP”. Este programa tem a tarefa de ajudar a disseminar a tecnologia do uso de estruturas de aço constituídas de perfis tubulares, automatizando todo o processo de um projeto de treliça plana (REQUENA et al., 2001; SOUZA; BRANCO; REQUENA, 2004). Pulilo Filho; Aguiar; Arcaro (2002) desenvolveram outro programa computacional, este para projetar treliças espaciais metálicas.

É dentro desta realidade que se deve buscar arranjos estruturais cada vez mais eficientes. Vale destacar que o uso da forma geométrica é um grande recurso para se conseguir estruturas mais leves, simples e funcionais. Considera-se que os arranjos tridimensionais são capazes de gerar uma distribuição de tensões mais homogênea ao longo de todo o vão coberto. Com o uso de sistemas estruturais espaciais consegue-se uma aproximação mais realista em termos de concepção estrutural, uma vez que toda estrutura na sua forma real é tridimensional.

## 2.2 Definição do problema de otimização

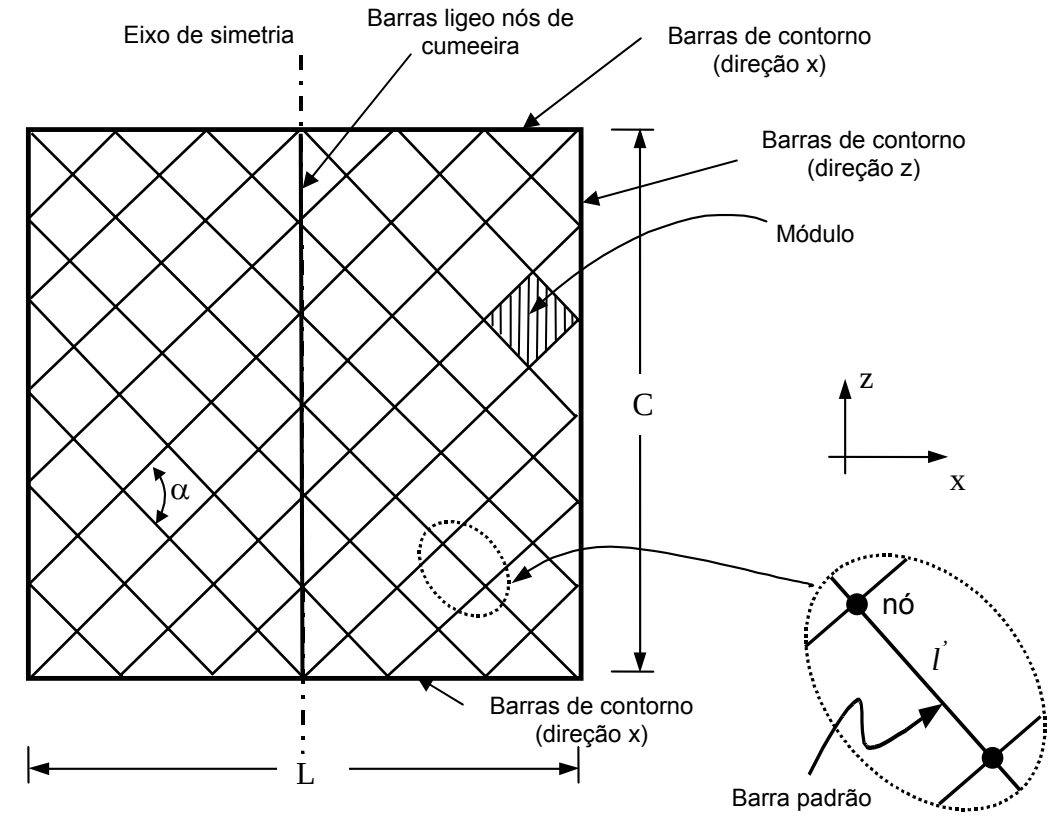
O sistema estrutural em apreço (Fig. 1.1) concilia o aproveitamento da forma geométrica da estrutura com a forma geométrica das seções transversais das barras, lembrando que as seções transversais tubulares apresentam ótimo aproveitamento da posição dos seus elementos resistentes em termos de estabilidade e flexão, que estão sempre distantes do centro de gravidade da seção transversal. Além disso, a homogeneização da distribuição das barras parece ser um fator bastante interessante.

O desempenho de uma estrutura é fortemente influenciado pela sua geometria. A análise da malha estrutural com o mínimo de simplificações permite utilizar o modelo na sua máxima capacidade resistente. Em se tratando de estruturas tridimensionais, a quantidade de nós e elementos é muito grande, o que dificulta muito o cálculo dos esforços e deslocamentos. Contudo, em virtude do rápido crescimento computacional e da elaboração de programas computacionais específicos para a geração e o cálculo de esforços e deslocamentos em estruturas, tem-se conseguido projetar modelos estruturais tridimensionais com grande eficiência.

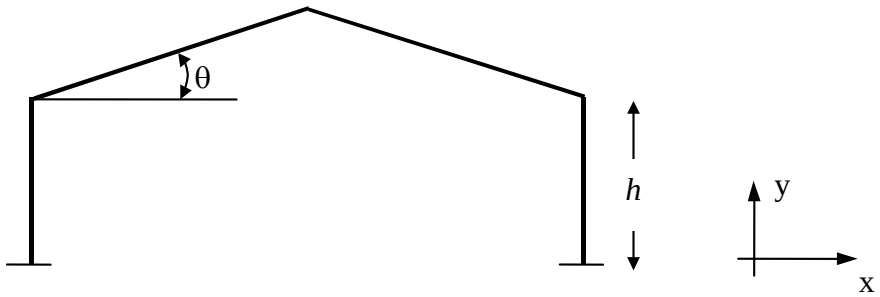
O modelo estrutural com barras cruzadas para cobertura é formado por uma malha reticulada tridimensional em dois planos que apresenta em geral uma grande quantidade de nós e barras na sua geração, Figs. 1.1 e 2.4. Para facilitar esta etapa do cálculo foi desenvolvido na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (GESUALDO, 2002) um programa computacional para geração de dados, cálculo e análise de estruturas reticuladas. Considerando a disponibilidade do código deste programa, considerou-se apropriado adaptá-los ao programa computacional de otimização desenvolvido neste trabalho, tornando o programa computacional OTR mais eficiente e ágil.

De acordo com pesquisa realizada por Souza Jr e Gesualdo (1998) para o sistema estrutural com barras cruzadas em madeira, admitindo ligações semi-rígidas, este modelo estrutural tem seu desempenho limitado principalmente, no estado limite de utilização, ou seja, o deslocamento é o fator limitante para a estrutura.

Sendo assim, para enrijecer a estrutura é possível inserir barras ligando os nós da cumeeira e os nós da extremidade da estrutura fazendo o seu contorno. Ou ainda, introduzir tirantes ligando os pilares de apoio da estrutura. Com isso, melhora-se a distribuição dos esforços entre as barras e diminuem-se os deslocamentos dos nós da estrutura.




a) Vista superior da estrutura




b) Vista frontal da estrutura

Figura 2.4 - Detalhamento da estrutura de cobertura

onde:

C: comprimento da cobertura; L: largura da cobertura; *h*: altura dos pilares; $\theta$ - ângulo de inclinação da cobertura; $\alpha$ - ângulo entre as barras que formam um módulo; $l'$ : projeção do comprimento da barra no plano xOz; $l$ : comprimento da barra no plano de cobertura (comprimento inclinado).

### *2.2.1 Variáveis de projeto*

A função objetivo que deverá ser minimizada depende das constantes de projeto: comprimento da cobertura (C), largura da cobertura (L), altura dos pilares (h), das propriedades geométricas e mecânicas dos materiais (tirantes e pilares) e, das seguintes variáveis:

m - número de módulos na direção x (como a estrutura é simétrica, “m” só pode assumir valor par);
n - número de módulos na direção z;
$\theta$ - ângulo de inclinação da cobertura;
A - perfil tubular disponível no mercado.

### *2.2.2 Função objetivo*

A função objetivo a ser minimizada neste problema é o consumo de tubos. As Equações (2.1) e (2.2) definem os parâmetros necessários para o cálculo da função objetivo.

***Ângulo entre as barras cruzadas***

$$\alpha = 2.arctg\left(\frac{C.m}{L.n}\right) \tag{2.1}$$

***Comprimento da barra padrão***

$$l = \frac{L}{2.m.cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)cos\,\theta} \tag{2.2}$$

***Função objetivo - consumo de tubos***

Na Equação (2.3), a primeira parcela refere-se à quantidade de tubos necessária para a execução dos dois planos da cobertura. A segunda parcela indica a quantidade de tubos usados na periferia da estrutura fazendo o seu contorno, e por fim, a última parcela refere-se

aos tubos necessários para ligar os nós da cumeeira. A 2ª e a 3ª parcela pode ou não existir, a critério do usuário.

$$f = \left[ 4.m.n.l + 2\left( C + \frac{L}{cos\,\theta} \right) + C \right] \rho \qquad (2.3)$$

Onde: $\rho$ é densidade linear do tubo em kg/m.

Definida as dimensões da cobertura e o comprimento máximo admitido para a barra que forma os módulos (distância entre dois nós), existem diversas possibilidades de combinação das variáveis para formar a malha geométrica, o que implicará em diferentes valores para o consumo de tubos.

Selecionar os parâmetros adequados que minimizem o consumo de tubos da estrutura é uma tarefa árdua, porém muito importante para um mercado cada vez mais exigente. A solução deste problema será obtida utilizando-se a metodologia dos AGs apresentada no próximo capítulo.

# CAPÍTULO 3

## FUNDAMENTOS DOS ALGORITMOS GENÉTICOS

### 3.1 Introdução

Otimizar é projetar o sistema com mais eficiência e menor 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 busca. A otimização visa determinar a melhor correlação entre as variáveis de projeto sem a necessidade de testar todas as possibilidades, portanto sem onerar o processo. Neste sentido, a otimização vem sendo aplicada nos diversos campos da engenharia, tais como, em projetos de sistemas e componentes, planejamento e análise de operação, forma e controle de sistemas dinâmicos e na análise de estruturas.

Dessa maneira, para cada problema define-se as variáveis de projeto e uma função objetivo que deverá ser otimizada, ou seja, maximizada ou minimizada, num contexto em que podem existir restrições.

Esta busca deve atender a uma característica muito importante para qualquer método de otimização: o equilíbrio entre eficiência e eficácia de forma a garantir não só a correta solução do problema, mas também a generalidade do processo (SOUZA; MENDES NETO, 2001). Neste caso, um processo é dito eficiente, quando ele atinge o seu objetivo com menor esforço computacional possível. A eficácia da busca pelo ótimo visa à generalidade do método, isto é, não há necessidade de particularização ou alteração do processo de otimização para a resolução dos mais diversos problemas, à custa de adaptações impostas ao processo de otimização inicialmente idealizado. Procura-se, portanto, um procedimento geral e flexível de otimização. Um processo com estas características é dito robusto.

Os procedimentos matemáticos de otimização começaram a ser desenvolvidos em meados do século XIX por Cauchy. Mas foi no último século com o advento dos computadores que se iniciaram o desenvolvimento de metodologias numéricas. Atualmente, com o aumento da capacidade dos computadores digitais o uso de algoritmos de otimização vêm crescendo rapidamente.

Ferramentas computacionais de análise numérica e dinâmica de estruturas, usando técnicas numéricas (elementos finitos, elementos de contorno, etc) contribuíram muito para o avanço dos métodos de otimização. Devido ao grande número de incógnitas que estas

ferramentas trabalham não é possível contentar-se apenas com a análise através de processos de "tentativa e erro". Para diminuir o esforço computacional nos procedimentos de programas computacionais de elementos finitos, os códigos comerciais foram equipados com otimizadores, conforme se verifica hoje em dia nos programas comerciais de grande performance como o NASTRAN, ANSYS e GENESIS (BRAGA, 1998).

Como se percebe, a otimização é uma das ferramentas mais importantes da atualidade, empregada na resolução dos mais variados problemas nas diversas áreas da engenharia. Silva e Rade (1999), por exemplo, aplicaram o método do gradiente conjugado na identificação de parâmetros de elementos de suporte a partir de forças externas aplicadas a estrutura. Steffen Jr e Assis (1999) utilizaram métodos híbridos de otimização para identificação de parâmetros de rotores flexíveis. Alves et al. (2001) otimizaram estruturas reticuladas submetidas a uma carga dinâmica. Neves e Santos (2001) utilizam técnicas de otimização para determinar o dimensionamento ótimo das armaduras em lajes. Barbosa et al. (2001) otimizou o consumo energético na movimentação de fluidos entre reservatórios.

O método dos AGs foi utilizado por Silva (1999) na solução de problemas de identificação em elastodinâmica. Larson e Zimmerman (1993), Friswell; Penny; Lindfield(1995) aplicaram os AGs em alguns problemas de ajuste de modelos. Souza e Mendes (2001) empregaram os AGs no dimensionamento de seções transversais retangulares de concreto armado. O método dos AGs foi aplicado por Lima e Vellasco (2004) para calibrar a rigidez pós-limite de ligações viga-coluna. Souza, Caligiana e Chimisso (2001) utilizaram o método dos AGs associado a lógica nebulosa (Fuzzy Logic) na otimização de cabos para ancoragem.

De modo geral, os métodos de otimização experimentam, em maior ou menor grau, dificuldades relacionadas a não convergência e à existência de mínimos locais da função custo. Como vantagens no uso de procedimentos de otimização podem ser citados os seguintes aspectos:

- Diminuição do tempo dedicado ao projeto;
- Possibilidade de tratamento simultâneo de uma grande quantidade de variáveis e restrições de difícil visualização gráfica ou tabular;
- Possibilidade de obtenção de algo melhor (mesmo que não seja o mínimo global);
- Redução de custo em relação aos modelos experimentais.

E como desvantagens no uso da otimização podem ser consideradas algumas dificuldades para a sua aplicação, tais como:

- Aumento do tempo computacional;
- As funções envolvidas são descontínuas (ou gradientes descontínuos) ou de lenta convergência;
- Presença de muitos mínimos locais (mínimo global raramente é obtido);
- Programas de análise não adequados;

Para vencer as desvantagens no uso da otimização foram desenvolvidos diversos métodos de busca. A escolha de um ou outro método de busca deve estar estritamente relacionada com o problema a ser minimizado.

Os métodos de otimização podem ser classificados de acordo com sua formulação, ou seja, da forma como abordam os problemas. Neste sentido, de acordo com Goldberg (1989), tem-se a seguinte classificação:

- Baseados em cálculo
- Enumerativos
- Aleatórios

Os métodos baseados em cálculo são ainda classificados em dois subgrupos: métodos diretos e indiretos. Nos métodos diretos a busca pelo valor ótimo da função objetivo é feita trabalhando diretamente com as restrições. Os métodos mais utilizados são: Método das Direções Viáveis, Método do Gradiente Generalizado e Método de Programação Linear Seqüencial. Por outro lado, os métodos indiretos lidam com as restrições indiretamente, através de funções de penalização, onde ambas as funções, objetivo e restrições, são não lineares. Neste grupo encontra-se o Método da Função Penalidade Exterior, Método da Função Penalidade Interior e o Método de Multiplicador de Lagrange Aumentado.

Nos métodos enumerativos a busca pelo valor ótimo inicia-se em vários pontos do espaço de busca. Em cada iteração determina-se o valor da função objetivo em cada ponto, comparam-se estes valores com suas restrições e com os valores anteriores, podendo desta forma verificar se houve uma melhora ou não no processo. De acordo com Goldberg (1989) o grande problema é que o espaço de busca nos problemas de engenharia é geralmente muito grande, tornando o tempo computacional necessário altíssimo.

Enfim, os métodos de busca aleatórios tradicionais, inicialmente tiveram aplicação bastante limitada devido ao alto custo computacional exigidos em problemas com muitas variáveis de projeto. Contudo, durante as últimas décadas, surgiram diferentes técnicas relacionadas aos algoritmos evolucionários, ou seja, métodos de busca estocásticos que

imitam a evolução biológica natural. Dentre eles encontra-se o método dos Algoritmos Genéticos (AGs) desenvolvido por John Holle.

Diferente de outros métodos que partem de um ponto do espaço de busca para encontrar a solução ótima, os AGs operam num conjunto de soluções aplicando o princípio da sobrevivência dos indivíduos mais aptos para produzir uma solução cada vez melhor. Dessa forma, geração após geração, um novo conjunto de indivíduos é criado pelo processo de seleção dos indivíduos progenitores, de acordo com o nível de aptidão associado ao problema. A procriação é feita entre os progenitores através de operadores extraídos da genética natural. Este processo leva à evolução de indivíduos que se adaptam melhor ao problema, tal como na adaptação natural. Os AGs modelam os processos naturais, através de operadores básicos tais como seleção, cruzamento, mutação, etc (GOLDBERG, 1989; LAPA et al., 2001; BORGES e BARBOSA, 2001).

O uso dos AGs não garante uma solução ótima, mas na maioria das vezes encontra-se uma solução quase ótima que satisfaz os critérios de parada do método. Além disto, são aplicados numa grande variedade de problemas, pois não impõem limitações que são encontradas, na maioria das vezes, nos métodos de busca diretos e indiretos (Castilho et al, 2001). Suas principais vantagens são:

- Trabalham sobre um conjunto de pontos do espaço de busca em vez de um único ponto;
- Podem trabalhar sobre a codificação dos parâmetros, em vez de trabalhar sobre os próprios parâmetros;
- Não exigem a continuidade e a diferenciabilidade da função objetivo;
- São fáceis de serem implementados;
- São flexíveis para otimizar múltiplas funções com objetivos conflitantes;
- Usam regras probabilísticas de transição;
- São facilmente hibridizados com outras técnicas heurísticas.

Devido às suas características, os AGs demonstram ser muito mais robustos que os métodos tradicionais, sendo este o principal motivo do crescente emprego destes algoritmos no estudo de problemas de engenharia.

Dentro da realidade da construção metálica no Brasil, é extremamente importante a otimização de sistemas estruturais com o objetivo de buscar economia de material e padronização dos processos construtivos, gerando qualidade e eficiência para a construção civil. Neste sentido, para uma real economia no projeto da estrutura, deve-se buscar a eficiência do conjunto de parâmetros, tais como, a melhor correlação entre as variáveis

associadas à geometria, a distribuição uniforme de tensões e o essencial conhecimento das características gerais das ligações.

## 3.2 Terminologia

Como os AGs utilizam a mesma terminologia da genética natural, é conveniente que se faça um breve estudo deste assunto.

Todo organismo vivo é constituído de células, que por sua vez são constituídas de cromossomos. Cada cromossomo pode ser dividido em genes - blocos funcionais de DNA (Ácido Desoxirribonucleico) e servem de modelo para a construção de todo o organismo.

Nos AGs a população é composta por um número fixo de indivíduos (*cromossomos*), e cada elemento do cromossomo é equivalente a um *gene*. Cada gene pode assumir um valor qualquer (binário, decimal, etc) representando uma variável do problema. Numa cadeia binária, cada elemento de um gene é denominado *alelo* e pode assumir os valores 0 ou 1. A posição de um gene num cromossomo, ou seja, dentro de uma seqüência, corresponde a um *locus gênico*. A Figura 3.1 ilustra o exposto anteriormente.

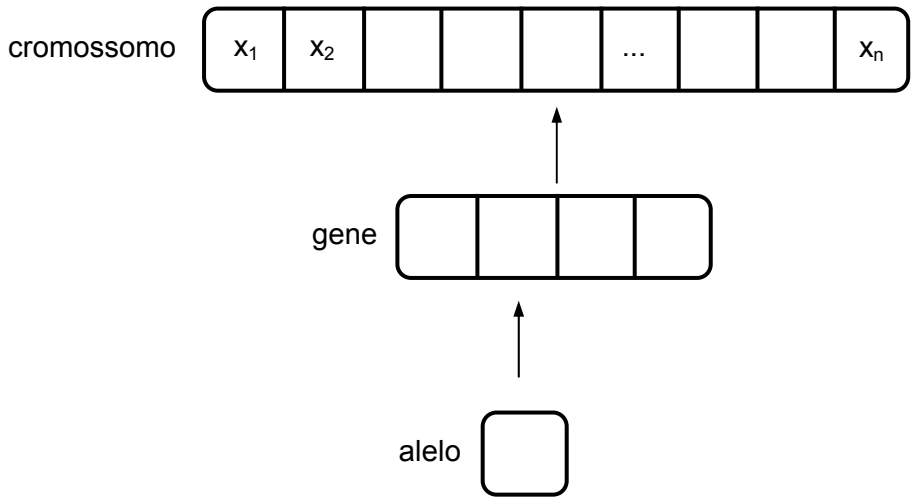



Figura 3.1 - Descrição gráfica dos elementos genéticos

## 3.3 Descrição dos operadores usados nos algoritmos genéticos

Os operadores genéticos aplicados nos indivíduos já existentes têm o objetivo de reproduzir novos indivíduos, mantendo a diversidade da população. Permitindo que o algoritmo explore outras regiões do espaço de busca.

Estes são procedimentos computacionais simples que transformam a população ao longo das iterações em busca da solução ótima do problema. Semelhante ao que acontece na evolução natural através dos mecanismos de adaptação e sobrevivência. A seguir serão abordados os operadores genéticos usados na elaboração do programa computacional de otimização.

### ***3.3.1*** *Seleção*

O objetivo do operador seleção é escolher aleatoriamente quais os indivíduos que passarão para a próxima geração e serão usados na recombinação (ou cruzamento) e na mutação. Este operador leva em consideração o índice de aptidão do indivíduo ao problema. Dessa forma, os indivíduos mais aptos permanecem na população, e seus descendentes têm índices de adaptação cada vez maiores, enquanto que os indivíduos menos aptos tendem a desaparecer.

O método de seleção a ser usado depende do problema a ser otimizado. Quanto mais rigoroso for o método de seleção mais rapidamente os indivíduos com maior índice de adaptação tomarão a população, reduzindo a diversidade necessária para a evolução dos indivíduos. Por outro lado, um método pouco rigoroso torna o processo de evolução muito lento (GOLDBERG, 1989; SILVA, 1999; BRAGA, 1998; HOLLE, 1975).

O índice de aptidão está associado à probabilidade de reprodução de um indivíduo. Este índice depende do valor da função objetivo para cada indivíduo que compõe a população. A seguir são apresentados alguns métodos de seleção.

#### ***3.3.1.1*** *Seleção pelo método da roleta*

O algoritmo mais simples para seleção é o método da roleta, como é verificado nos procedimentos que serão apresentados a seguir.

A cada indivíduo é associado um número que representa a sua probabilidade de passar para a próxima geração. A probabilidade de cada indivíduo depende do índice de aptidão, que é determinado através da função objetivo (Eq. 2.3) calculada para todos os indivíduos. O cálculo da probabilidade de cada indivíduo é feito de forma que a soma de todas as probabilidades seja igual a 1 (ou seja, 100%), como pode ser observado nas Eqs. 3.1 e 3.2.

$$a_i = \frac{F}{f_i} \text{ (índice de aptidão)} \tag{3.1}$$

onde: $F = \sum_{i=1}^{n} f(I_i)$

A probabilidade de seleção de cada indivíduo é definida como sendo proporcional ao seu índice de aptidão. Neste caso é dada pela Eq. (3.2).

$$p_i = \frac{a_i}{S} \text{ (probabilidade)} \tag{3.2}$$

onde: $S = \sum_{i=1}^{n} a(I_i)$

A Tabela 3.1 ilustra o valor da função objetivo, do índice de aptidão e suas respectivas probabilidades para uma população de oito indivíduos. Nela percebe-se que o indivíduo melhor adaptado é o indivíduo $I_1$ e o menos adaptado é o indivíduo $I_6$.

Tabela 3.1 – Função Aptidão e probabilidade de seleção

| | $I_1$ | $I_2$ | $I_3$ | $I_4$ | $I_5$ | $I_6$ | $I_7$ | $I_8$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Função objetivo (Custo) | 0.26 | 0.28 | 0.35 | 0.44 | 0.66 | 0.82 | 0.34 | 0.58 |
| Índice de Aptidão (a) | 3.85 | 3.57 | 2.86 | 2.27 | 1.52 | 1.22 | 2.94 | 1.72 |
| Probabilidade de seleção (p) | 0.19 | 0.18 | 0.14 | 0.11 | 0.08 | 0.06 | 0.15 | 0.09 |
| Probabilidade acumulada (P) | 0.19 | 0.37 | 0.51 | 0.62 | 0.70 | 0.76 | 0.91 | 1.00 |

Em seguida são selecionados os indivíduos que irão contribuir para a próxima geração. Para isso, é gerada uma seqüência de números aleatórios (r) compreendidos entre 0 e 1, igual à quantidade de indivíduos que compõem a população. Para cada número r é selecionado o indivíduo "$I_i$" que satisfaz a condição $P_{i-1} < r \leq P_i$. Esta técnica é análoga à rotação de uma roleta, com fatias proporcionais às probabilidades acumuladas.

Considerando, por exemplo, a sequência de números aleatórios uniformemente distribuídos (entre 0 e 1):

$r_1 = 0.77$; $r_2 = 0.53$; $r_3 = 0.95$; $r_4 = 0.21$;

$r_5 = 0.03$; $r_6 = 0.18$; $r_7 = 0.27$; $r_8 = 0.87$.

Após o processo são selecionados os indivíduos $I_1$ (2 cópias), o indivíduo $I_2$ (2 cópias), $I_4$ (1 cópia), o indivíduo $I_7$ (2 cópias) e o indivíduo $I_8$ (1 cópia). A Figura 3.2 mostra o resultado do processo de seleção dos indivíduos da Tab. 3.1.

Vale ressaltar que os indivíduos com maior índice de aptidão possuem uma probabilidade maior de serem selecionados mais de uma vez, enquanto que outros indivíduos poderão morrer.

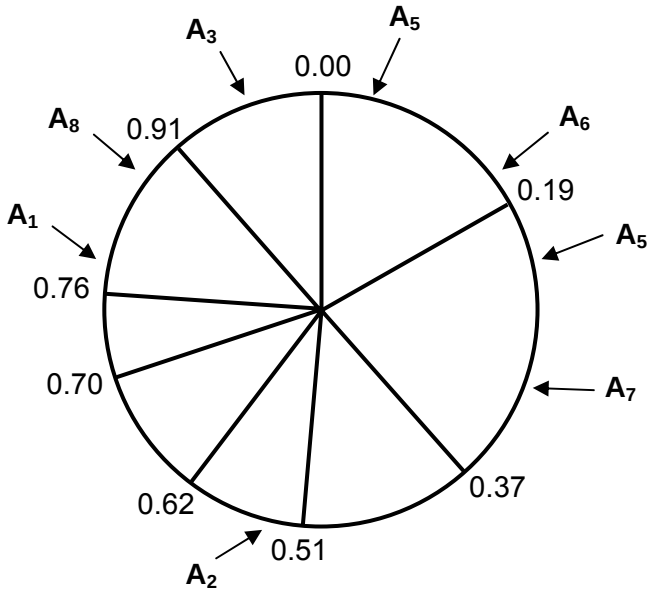



Figura 3.2 - Exemplo de seleção pelo método da roleta

Além deste método, existem outros métodos de seleção como por exemplo, Seleção por Grau (BAKER, 1985) e Seleção por Torneio (GOLDBERG e DEB, 1991).

### ***3.3.2*** *Recombinação ou cruzamento*

A recombinação ou cruzamento é o processo pelo qual a combinação de partes de dois cromossomos gera um novo descendente. Em geral, este é o processo predominante que garante a diversidade da população.

A sua ocorrência é controlada pela taxa de recombinação $p_c$. Uma alta taxa permite uma exploração maior do espaço de busca e reduz as chances de convergência para um ótimo local. Entretanto, se essa taxa for muito alta pode resultar na perda de tempo

computacional devido à exploração de regiões não promissoras dentro do espaço de busca (CASTILHO; DEBS; NICOLETTI, 2001).

O termo recombinação é utilizado quando os parâmetros não são codificados e o termo cruzamento quando os valores dos parâmetros são trabalhados em codificação binária. Os indivíduos escolhidos para a recombinação são chamados de progenitores, enquanto que os resultantes são denominados de descendência.

#### ***3.3.2.1*** *Recombinação discreta*

Na recombinação discreta troca-se os valores dos parâmetros entre dois indivíduos. Consideremos o exemplo abaixo, onde cada indivíduo é formado por quatro parâmetros.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **$A_1$** | 10 | 3 | 8 | 25 |
| **$A_2$** | 23 | 10 | 1 | 47 |

Cada parâmetro do novo indivíduo é escolhido aleatoriamente com igual probabilidade. Por exemplo:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Amostra 1** | 1 | 2 | 2 | 1 |
| **Amostra 2** | 1 | 1 | 2 | 2 |

Dessa forma os novos indivíduos são:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **$A'_1$** | 10 | 10 | 1 | 25 |
| **$A'_2$** | 10 | 3 | 1 | 47 |

#### ***3.3.2.2*** *Recombinação intermediária*

Na recombinação intermediária os descendentes são escolhidos próximos dos valores dos indivíduos selecionados (SILVA, 1999). A regra utilizada é:

$$I' = I_1 + \beta.(I_2 - I_1) \qquad (3.3)$$

onde $\beta$ é um fator de escala escolhido aleatoriamente no intervalo [-d, 1+d] e “d” é um parâmetro definido pelo usuário. A recombinação é dita intermediária se d=0 e extendida se d > 0.

### *3.3.3 Mutação*

A mutação é obtida pela alteração aleatória de um gen de um locus específico de um cromossomo (também escolhido aleatoriamente da população de filhos formada). Deve-se ressaltar que o locus mutacionado deve receber apenas um dos genes alelos previamente estipulado para sua posição. O processo é controlado por um parâmetro fixo $p_m$, probabilidade de mutação, 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.

De acordo com a literatura existem vários métodos de mutação, entre eles estão: mutação uniforme, mutação não-uniforme, mutação multi-não-uniforme, mutação de contorno e a mutação binária (SILVA, 1999).

#### *3.3.3.1 Mutação uniforme*

Na mutação uniforme uma das variáveis do indivíduo é alterada, baseada numa probabilidade de distribuição uniforme. O parâmetro na cadeia do indivíduo que sofrerá mutação é escolhido aleatoriamente. O novo valor para o parâmetro ($n_{var}$) é gerado pela relação dada na Eq. (3.4).

$$n_{var} = var_I + r \,.\, \Delta var \tag{3.4}$$

Sendo: $var_I$ : limite inferior do parâmetro a sofrer mutação; $\Delta var$ : diferença entre o limite inferior e o limite superior do parâmetro, e $r$ : valor aleatório entre 0 e 1.

No algoritmo genético implementado o valor da variável $n_{var}$ é gerado aleatoriamente dentro do intervalo de domínio do respectivo parâmetro. Suprime-se assim, a operação matemática da Eq. (3.4).

#### *3.3.3.2 Mutação restrita*

Além da mutação uniforme, foi implementado no programa computacional OTR o operador mutação restrita. O objetivo de desenvolver este novo operador, foi de encontrar mais rapidamente a solução ótima em torno do indivíduo melhor adaptado ao problema. Este operador consiste em selecionar o indivíduo melhor adaptado ($I_i$) à função objetivo até a geração presente, e criar "$n_v$+1" indivíduos (onde "$n_v$" é o número de variáveis) através do método da mutação uniforme a partir do indivíduo $I_i$. Entretanto, a mutação ocorre num intervalo restrito em torno do valor ótimo de cada variável do indivíduo $I_i$. Sendo assim, têm-se:

- Para $1 \leq j \leq n_v$, somente a variável j do indivíduo $I_i$ sofre mutação;
- Para $j = n_v+1$, todas as variáveis do indivíduo $I_i$ sofrem mutação.

Os novos indivíduos gerados pelo operador mutação restrita passam então a fazer parte da população. Acredita-se que este operador será importante no refinamento da solução ótima.

### *3.3.4 Elitismo*

De uma geração para outra, pode ocorrer que indivíduos melhor adaptados não sejam selecionados. O elitismo é um operador genético que garante uma porção dos indivíduos melhor adaptados na próxima geração. Neste trabalho garantiu-se apenas a presença do indivíduo melhor adaptado nas gerações futuras.

### *3.3.5 Critério de Parada*

Como critério de parada para os algoritmos genéticos utiliza-se, normalmente, o número máximo de gerações, o tempo limite de processamento ou o critério da estagnação, ou seja, quando não se observa melhoria da população depois de várias gerações consecutivas. No algoritmo implementado foram utilizados os critérios da estagnação e da máxima geração.

# CAPÍTULO 4

## ALGORITMO GENÉTICO APLICADO À ESTRUTURA DE COBERTURA COM BARRAS CRUZADAS

### 4.1 Funcionamento do algoritmo genético

A representação de um problema de otimização consiste, inicialmente, na identificação das constantes de projeto, das variáveis e seus domínios e, na definição da função objetivo. O uso do método dos AGs permite representar as variáveis por números reais ou decodificá-las na representação binária. Geralmente a representação binária é utilizada para problemas com variáveis discretas e a forma real para problemas com variáveis contínuas (CASTILHO; DEBS; NICOLETTI, 2001). Uma razão para se trabalhar com números reais é a diminuição do tempo computacional, pois o passo de decodificação é suprimido desta etapa. Entretanto, este assunto é complexo e não se tem uma conclusão unânime sobre o mesmo entre os estudiosos. Apesar das variáveis do problema em estudo serem discretas foi escolhida a forma real para sua representação, facilitando a implementação do código do programa computacional. Neste trabalho, decidiu-se trabalhar com as variáveis de projeto, m, n, $\theta$ e A, em representação real (inteira, uma vez que elas assumirão apenas valores inteiros).

Definidas as variáveis de projeto, o segundo passo é criar o espaço de busca, ou seja, os possíveis valores que as variáveis poderão assumir. Para esta etapa, o programa computacional OTR exige que o usuário forneça os seguintes valores: número máximo de módulos na direção $x$ ($m_{máx}$), número máximo de módulos na direção $z$ ($n_{máx}$), ângulos de inclinação mínimo e máximo ($\theta_{mín}$ e $\theta_{máx}$). Para a quarta variável (A), o programa computacional OTR possui um banco de dados com 60 seções transversais de perfis tubulares cadastrados, com suas propriedades físicas e geométricas necessárias ao dimensionamento.

Por motivos construtivos, devido ao tamanho da telha a ser utilizada na cobertura, é conveniente que seja fornecido ao programa o comprimento máximo para a barra (distância entre dois nós consecutivos). Essa restrição ao comprimento máximo para a barra padrão evita que o algoritmo perca tempo em regiões do espaço de busca inviáveis. Além disso, os

menores valores que as variáveis *m* e *n* poderão assumir é a parte inteira obtida das Eqs. (4.1) e (4.2).

$$m_{min} = \frac{L}{2.l_{máx}} \tag{4.1}$$

$$n_{min} = \frac{C}{2.l_{máx}} \tag{4.2}$$

onde $l_{máx}$ é o comprimento máximo da barra padrão definido pelo usuário.

A Figura 4.1 apresenta a tela principal do programa computacional OTR. Para uma visão global do funcionamento do programa OTR apresenta-se o seguinte exemplo:

- Comprimento da cobertura: C = 800cm;
- Largura da cobertura = 400cm;
- Altura dos pilares: h = 200cm.

Não serão consideradas barras ligeo os nós da cumeeira, barras de contorno e tirantes. Adotar-se-á, para o comprimento máximo da barra $l_{máx}$ = 200cm.

Fornecendo ao AG os valores $m_{máx}$ = 12, $n_{máx}$ = 10, $\theta_{mín}$ = 5º e $\theta_{máx}$ = 15°, o algoritmo gera o seguinte espaço de busca.

| m | 6 | 8 | 10 | 12 |
|---|---|---|---|---|
| ponteiro | 1 | 2 | 3 | 4 |

| n | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ponteiro | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

| n | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ponteiro | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |

| A (D x e) | 40.34x1.1125 | 40.34x1.27 | ... | 2.67x0.318 |
|---|---|---|---|---|
| ponteiro | 1 | 2 | ... | 60 |

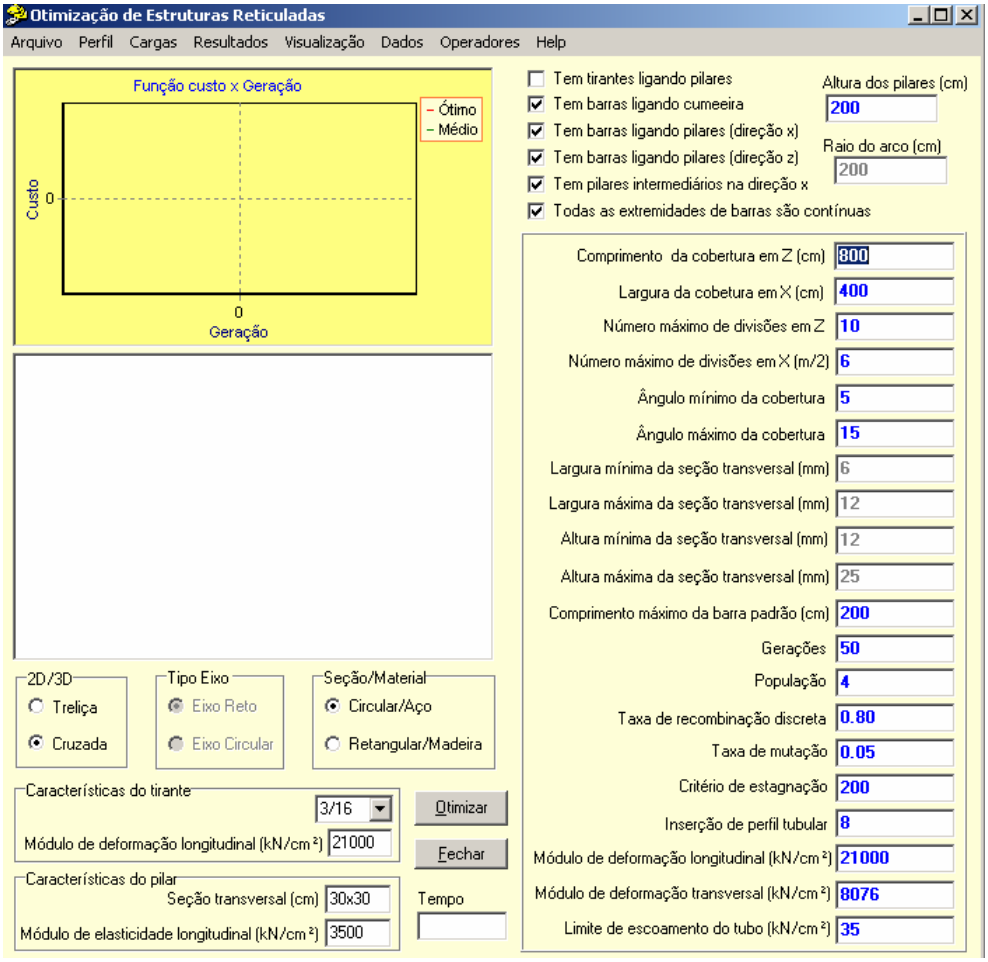



Figura 4.1 – Tela principal do programa computacional OTR

O quarto parâmetro (A) pode assumir qualquer valor de 1 até o número máximo de perfis tubulares cadastrados no banco de dados (60). Vale ressaltar que o usuário tem completo acesso a este banco de dados para fazer alterações, exclusões ou inserção de novos perfis tubulares.

Para simular o funcionamento do AG será usada uma população de 4 indivíduos. Os parâmetros são inicializados aleatoriamente.

| | $m$ | $n$ | $\theta$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|
| $I_1$ = | 6 | 5 | 14 | 54 |
| ponteiro | 1 | 2 | 3 | 4 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I_2$ = | 6 | 7 | 8 | 45 |
| ponteiro | 1 | 2 | 3 | 4 |

| $I_3$ = | 8 | 5 | 15 | 50 |
|---|---|---|---|---|
| ponteiro | 1 | 2 | 3 | 4 |

| $I_4$ = | 10 | 7 | 9 | 12 |
|---|---|---|---|---|
| ponteiro | 1 | 2 | 3 | 4 |

Portanto, para cada indivíduo da população os valores da função objetivo, dados pela Eq. (4.3) são:

$f(I_1)$ = 524.6

$f(I_2)$ = 1340.8

$f(I_3)$ = 750.8

$f(I_4)$ = 1439.7

A função avaliação é muito importante e está associada à função objetivo. Esta associa um valor numérico, conhecido como índice de adaptação (probabilidade) a cada indivíduo da população. Sempre que possível esta função deve ser de cálculo rápido, uma vez que ela deve ser avaliada para todos os indivíduos da população, o que tende a gerar um grande esforço computacional.

Considerando que se trata de um processo de minimização, o cálculo do índice de aptidão ($a$) foi feito usando a Eq. (3.1). Segue-se, então, que os valores da função custo total ($F$) e dos índices de aptidão $a_i$ valem:

$F = 4055.9$

$$a_1 = 7.73 \qquad a_2 = 3.02 \qquad a_3 = 5.40 \qquad a_4 = 2.82$$

As probabilidades de seleção foram determinadas através da Eq. (3.2). Portanto:

$S = 18.97$

$$p_1 = 0.407 \qquad p_2 = 0.159 \qquad p_3 = 0.285 \qquad p_4 = 0.149$$

Dentre os indivíduos gerados, o indivíduo $I_1$ possui o maior índice de adaptação, ou seja, possui o menor valor para a função objetivo. A partir dos seus parâmetros (m, n, $\theta$, A) =

(6, 5, 14, 54) é gerada a malha estrutural – definição geométrica. Esta malha é gerada automaticamente através do programa computacional GESTRUT desenvolvido na Faculdade de Engenharia Civil da UFU por Gesualdo (2005). O GESTRUT é um programa computacional geral para análise de estruturas reticuladas tridimensionais. Assim, para o propósito deste trabalho foi desenvolvida uma versão especial com adaptações para que a chamada ao programa e o seu processamento seja automático, sem intervenção do usuário. Nesta etapa são gerados: a posição dos nós, a incidência de barras, as seções transversais das barras e as condições de contorno (nós de apoio). Todos os dados gerados pelo Gestrut são armazenados em um arquivo texto que será interpretado pelo programa principal de otimização.

Em cada geração, definida a geometria da estrutura, o programa otimizador gera automaticamente o carregamento permanente e as forças devidas à ação do vento, através de rotina de cálculo implementada no programa. As Figuras 4.2 e 4.3 mostram as telas do programa OTR para definição do carregamento da estrutura.

Figura 4.2 – Tela de entrada do peso próprio e da sobrecarga

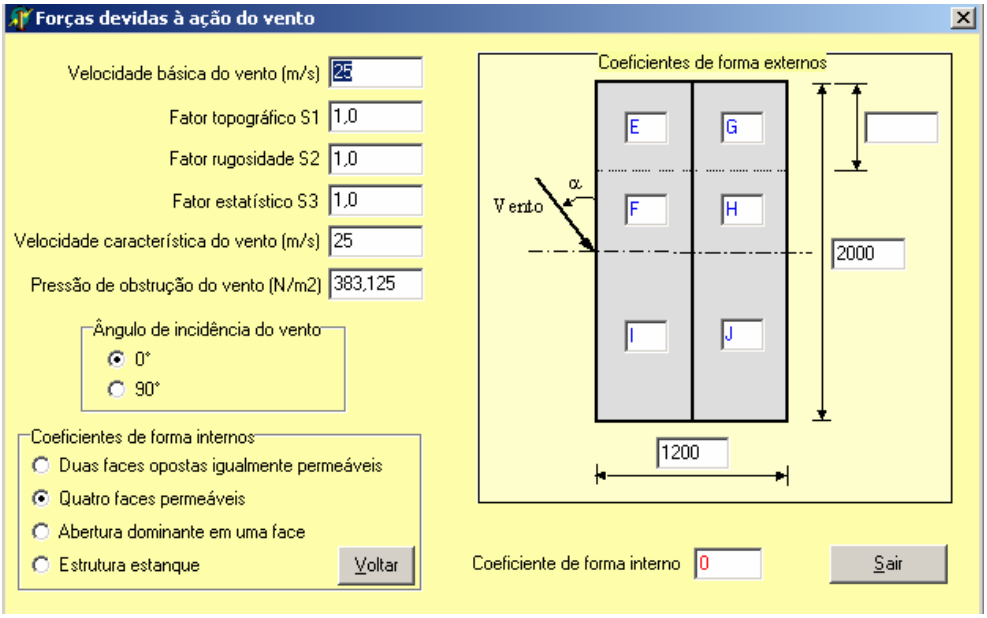



Figura 4.3 – Tela de entrada dos parâmetros necessários para a definição do carregamento devido à ação do vento

Para determinação dos coeficientes de forma internos o usuário deve escolher um dos quatro casos: duas faces opostas igualmente permeáveis, quatro faces permeáveis, abertura dominante em uma face ou estrutura estanque. Dependendo da escolha do usuário poderá ser aberta uma nova tela pedindo mais informações. Por exemplo, se o usuário escolher ”Abertura dominante em uma face” o programa abrirá a tela ilustrada na Fig. 4.4.

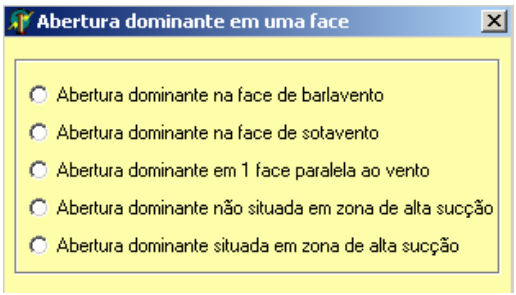



Figura 4.4 – Ilustração da tela “Abertura dominante em uma face

Feita a geração das solicitações, estas são acrescidas ao arquivo de dados geométricos para serem manipuladas pelo programa computacional GESTRUT, que lê o arquivo de dados completo da estrutura, calcula esforços e deslocamentos e retorna um outro arquivo que será interpretado pelo programa otimizador.

A partir destes resultados a estrutura é dimensionada segundo as recomendações da NBR8800 (ABNT, 1986), para que a estrutura seja verificada detalhadamente em termos de esforços e deslocamentos. Neste instante será conhecido se o sistema atende a todos os requisitos de norma, ou se deverá ser modificado.

A Figura 4.5 ilustra a configuração de esforços e carregamentos para uma barra – sistema local, à qual são indicados seis esforços (e deslocamentos) em cada extremidade. Vale ressaltar, como já dito, todos os carregamentos, mesmo que atuantes ao longo do comprimento das barras, foram aplicados na estrutura como forças concentradas sobre os nós das extremidade da barra.

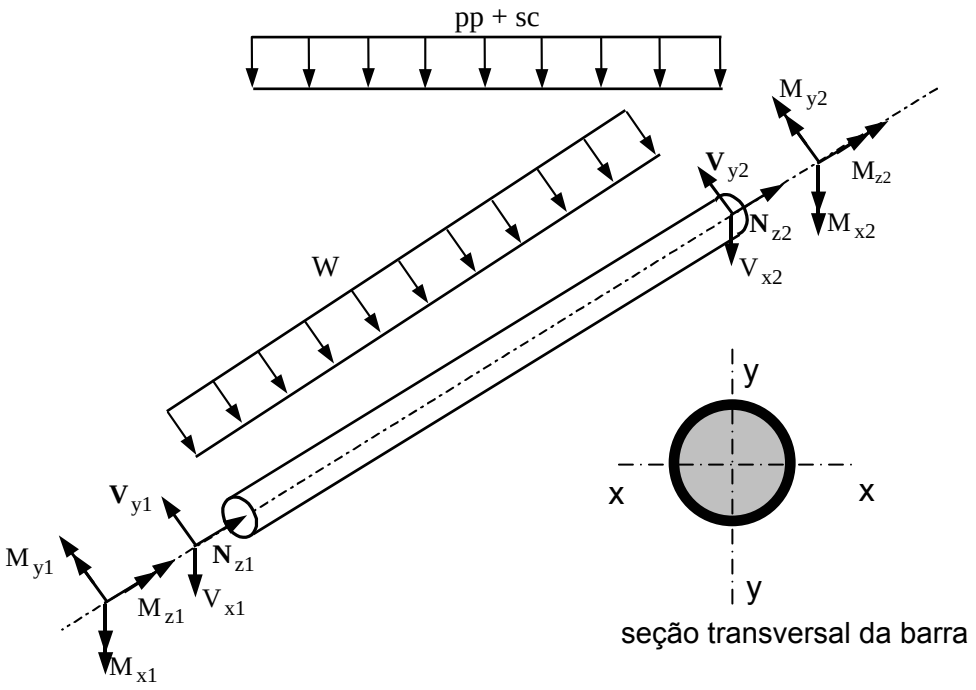



Figura 4.5 - Ilustração do carregamento e dos esforços sobre uma barra

Os parâmetros indicados na Fig. 4.5 correspondem a:

- pp - peso próprio
- sc - sobrecarga
- W - carregamento devido a ação do vento
- N - esforço normal
- V - esforço cortante
- M - momento fletor e de torção

O dimensionamento da estrutura é feito em duas etapas: na primeira é verificado o estado limite de utilização, ou seja, se o deslocamento vertical máximo da estrutura não ultrapassa o limite estabelecido pela norma (L/200). Neste momento, como indicado pela norma o carregamento da estrutura é devido somente a forças de sobrecarga. Atendido este critério, as forças atuantes sobre os nós da estrutura são recalculadas, agora considerando a atuação do peso próprio, sobrecarga e das forças devidas a atuação do vento. Nesta segunda etapa é verificado o estado limite último (Eqs. 4.3 e 4.4). Espera-se que pela configuração tridimensional e pela harmonia da geometria, os esforços se distribuam bem por todas as barras. O que torna difícil conhecer qual é a barra mais crítica, simplesmente pela análise da solicitação. Isto porque as barras são submetidas a esforços de flexão e axiais. Logo, a combinação crítica somente é conhecida com a verificação das condições de

segurança indicadas pela norma. Sendo assim, decidiu-se implementar no programa OTR o dimensionamento de todas as barras a flexo-tração (Eq. 4.3) ou flexo-compressão (Eqs. 4.3 e 4.4), produzindo um aumento do tempo de processamento.

$$\frac{N_d}{\phi N_n} + \frac{M_{dx}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{dy}}{\phi_b M_{ny}} \leq 1{,}0 \tag{4.3}$$

$$\frac{N_d}{\phi_c . N_n} + \frac{C_{mx} . M_{dx}}{\left(1 - \frac{N_d}{0.73 N_{ex}}\right) . \phi_b . M_{nx}} + \frac{C_{my} . M_{dy}}{\left(1 - \frac{N_d}{0.73 N_{ey}}\right) . \phi_b M_{ny}} \leq 1{,}0 \tag{4.4}$$

Durante o dimensionamento da estrutura em qualquer uma das etapas, poderão ocorrer duas situações. A estrutura está dimensionada para os parâmetros de $I_1$ e segue-se o processo de otimização normalmente. Ou, a estrutura não atende os critérios de dimensionamento e aplica-se uma penalidade. Neste caso, como o indivíduo $I_1$ não representa uma solução viável para o problema, faz-se $a_1 = 0$ e recalculam-se os índices $a_i$ e as probabilidades $p_i$. Novamente, para o indivíduo mais apto, gera-se a malha estrutural, o carregamento, e faz-se o dimensionamento. Este processo é realizado até que se encontre um indivíduo que atenda todos os requisitos de dimensionamento. Caso nenhum indivíduo passe no dimensionamento, o processo é interrompido.

Após a avaliação dos indivíduos vem a seleção. Nesta fase os indivíduos mais aptos, ou seja, os que conduzem a maiores valores de probabilidade (p), tendem a ser selecionados para continuar a existir nas gerações futuras. Os que conduzem a menores valores de probabilidade tendem a desaparecer nas gerações futuras. Dentre os vários métodos de seleção, será usado o método da roleta.

Considerando que o indivíduo $I_1$ passe pelo dimensionamento, as probabilidades acumuladas são (para o exemplo anteriormente definido):

$$q_1 = p_1 = 0.47 \quad q_2 = q_1 + p_2 = 0.65 \quad q_3 = q_2 + p_3 = 0.98 \quad q_4 = q_3 + p_4 = 1.00$$

A seleção é feita a partir da escolha de quatro números aleatórios entre 0 e 1. Admite-se que estes números tenham sido 0.83; 0.05; 0.51 e 0.30.

O primeiro número é maior que $q_2$ indicando que o indivíduo $I_3$ foi escolhido. O segundo número é menor que $q_1$ indicando que o indivíduo $I_1$ foi escolhido. O terceiro número é maior que $q_1$ e menor que $q_2$ indicando que o indivíduo $I_2$ foi escolhido e, por fim, o

quarto número é menor que $q_1$ indicando que o indivíduo $I_1$ foi escolhido. Ao final os novos indivíduos serão:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I'_1 = I_3$ | 8 | 5 | 15 | 50 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I'_2 = I_1$ | 6 | 5 | 14 | 54 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I'_3 = I_2$ | 6 | 7 | 8 | 45 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I'_4 = I_1$ | 6 | 5 | 14 | 54 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

Fica claro que, nesta fase, os indivíduos com menores probabilidades são descartados. Neste exemplo o indivíduo ($I_4$) foi descartado.

Após a seleção, é feita a recombinação dos indivíduos. De forma simples, esta operação consiste em trocar material genético entre os indivíduos dois a dois. Considera-se que apenas os dois primeiros indivíduos ($I'_1$ e $I'_2$) sejam recombinados. Lembrando que esta escolha é aleatória.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I'_1 =$ | 8 | 5 | 15 | 50 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I'_2 =$ | 6 | 5 | 14 | 54 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

Adotando as amostras

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Amostra 1** | 1 | 2 | 2 | 1 |
| **Amostra 2** | 1 | 2 | 1 | 2 |

Os novos indivíduos serão:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I''_1$ = | 8 | 5 | 14 | 50 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I''_2$ = | 8 | 5 | 15 | 54 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

E a população atual será:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I''_1$ = | 8 | 5 | 14 | 50 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I''_2$ = | 8 | 5 | 15 | 54 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I''_3$ = | 6 | 7 | 8 | 45 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I''_4$ = | 6 | 5 | 14 | 54 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

O próximo passo é aplicar o operador mutação, que consiste em alterar o valor de alguns genes escolhidos dentre o conjunto de genes de toda a população. A probabilidade de mutação $p_m$ é um valor pequeno que indica a quantidade de genes que serão mudados. Admitindo $p_m$ = 0.05, tem-se que do total de 16 genes, um sofrerá mutação. Esta escolha é aleatória. Supondo que o gene escolhido tenha sido o da posição destacada abaixo:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I''_1$ = | 8 | 5 | 14 | 50 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I''_2$ = | 8 | 5 | 15 | 54 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I''_3$ = | 6 | 7 | 8 | 45 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I''_4$ = | 6 | 5 | 14 | 54 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

Para o parâmetro 3, o limite inferior é 5 e o limite superior é igual a 15. Gerando um número aleatório dentro deste intervalo, temos que o novo valor para o parâmetro é $n_{var}$ = 11. Após a mutação, a população será:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I'''_1$ = | 8 | 5 | 14 | 50 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I'''_2$ = | 8 | 5 | **11** | 54 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I'''_3$ = | 6 | 7 | 8 | 45 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I'''_4$ = | 6 | 5 | 14 | 54 |
| Posição | 1 | 2 | 3 | 4 |

Após o processo de mutação, aplica-se o método do elitismo. Neste momento, o melhor indivíduo (entre $I_1$, $I_2$, $I_3$ e $I_4$) é inserido na próxima geração. Esta última fase representa o fim de uma geração, ou iteração. Com estes novos indivíduos retorna-se ao cálculo da função objetivo, Eq. (4.3), e repete-se o processo. A Figura 4.6 mostra um esquema simplificado do funcionamento do algoritmo.

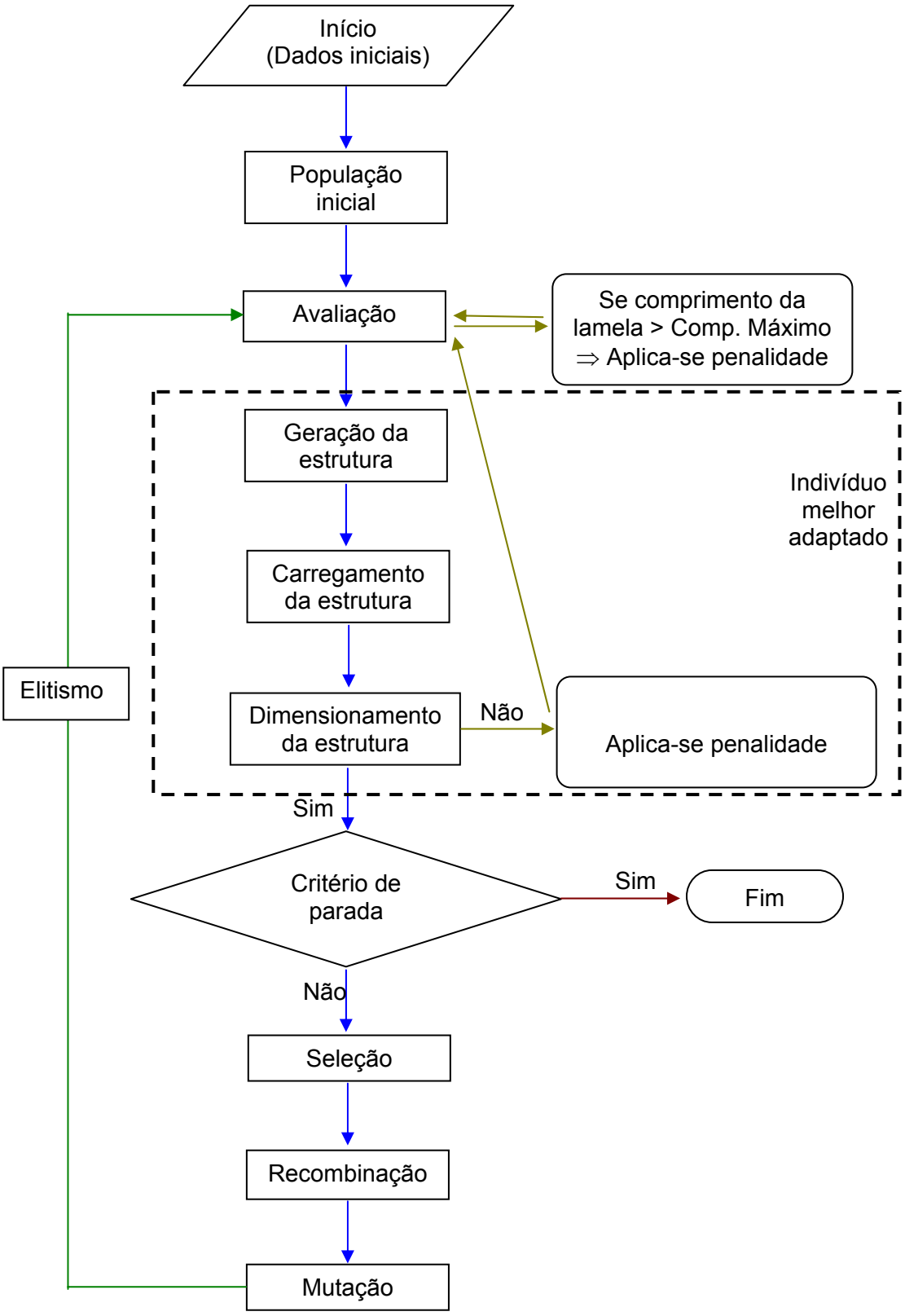



Figura 4.6 - Fluxograma do algoritmo genético implementado

# CAPÍTULO 5

## ESTUDO DA CONFIABILIDADE E DA EFICIÊNCIA DO PROGRAMA COMPUTACIONAL OTR

### 5.1 Introdução

A utilização de um novo programa computacional sempre requer que este seja submetido a diversos testes para avaliar sua confiabilidade. Outra característica importante num método de otimização é a sua eficiência, ou seja, a sua capacidade de encontrar o valor ótimo ou um valor próximo dele num tempo de processamento aceitável.

Além da eficiência, avaliou-se a robustez à multimodalidade e ao ruído do programa computacional OTR. Para tanto, foram avaliadas quatro funções matemáticas sem restrições e uma com restrição e, mais dois problemas de engenharia, descritos na literatura como clássicos, um sem restrição e o outro com restrição.

### 5.2 Avaliação da confiabilidade do algoritmo genético implementado

Para obtenção dos resultados apresentados neste capítulo, adotaram-se os valores para os dados de entrada dispostos na Tab. 5.1.

Tabela 5.1 - Valores para os parâmetros de entrada do AG

| | |
|---|---|
| Gerações | 5000 |
| População | 50 |
| Número de operadores | 5 |
| Taxa de Recombinação Discreta | 0.80 |
| Taxa de mutação | 0.05 |

Para a execução do programa computacional OTR utilizou-se um micro-computador 1.6 GHz e 256 Mb de memória RAM.

Em cada problema estudado serão apresentados a função objetivo e o domínio de cada variável. Em situações onde os dados de entrada não coincidem com os valores dispostos na Tab. 5.1, será feito um comentário explícito da modificação.

### ***5.2.1*** *Minimização de uma função matemática - Caso 1*

No primeiro caso deseja-se minimizar a função objetivo de duas variáveis:

$$f(x_1, x_2) = 10x_1^4 - 20x_1^2 x_2 + 10x_2^2 + x_1^2 - 2x_1 + 5 \tag{5.1}$$

Adotou-se o seguinte domínio para as variáveis:

$$\begin{cases} -2.00 \le x_1 \le 2.00 \\ -2.00 \le x_2 \le 2.00 \end{cases}$$

Tabela 5.2 - Resultados da minimização da função matemática (5.1)

| | **Teórico** | **Faria** | **OTR** |
|---|---|---|---|
| **f(x)** | 4 | 4.001 | 4.00000 |
| **x1** | 1 | 0.969 | 1.00058 |
| **x2** | 1 | 0.936 | 1.00119 |

A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos. O problema foi executado apenas uma vez, pois os resultados da primeira tentativa foram bastante satisfatórios. Foram necessárias 413 gerações e o tempo computacional gasto neste caso foi de apenas 2 segundos.

### ***5.2.2*** *Minimização de uma função matemática - Caso 2*

Para avaliar a robustez do algoritmo genético à multimodalidade estudou-se a minimização de duas funções matemáticas, caso 2 e 3.

$$F(x,y) = 3(x-1)^2 e^{\left(-x^2-(y+1)^2\right)} - 10\left(\frac{x}{5} - x^3 - y^5\right) e^{\left(-x^2-y^2\right)} - \frac{1}{3} e^{\left(-(x+1)^2-y^2\right)} \tag{5.2}$$

no domínio: $\begin{cases} -3 \le x \le 3 \\ -3 \le y \le 3 \end{cases}$

O mínimo global desta função neste intervalo é conhecido:

$$x_{min} = 0.2282 \qquad y_{min} = 1.6260 \qquad f_{min} = -6.55113$$

A Figura 5.1 ilustra o gráfico da função F(x,y).

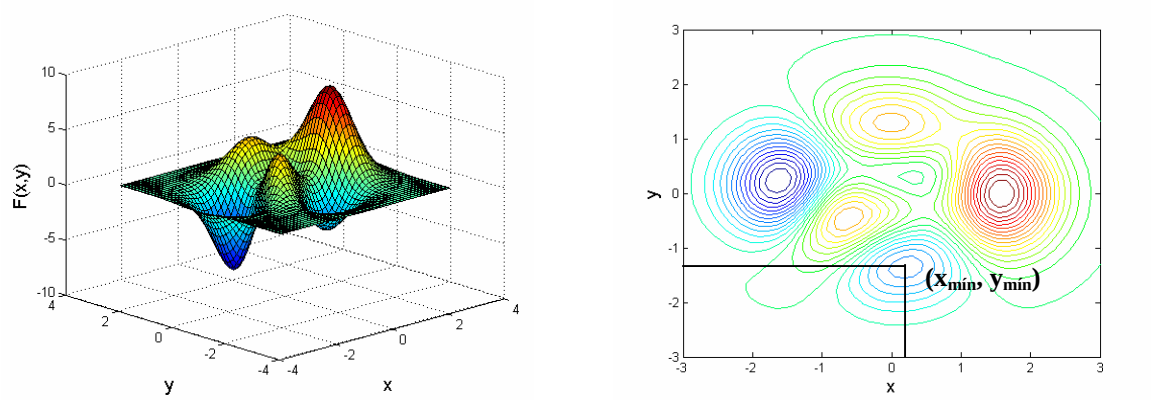



Figura 5.1 - Função utilizada na avaliação da robustez à multimodalidade - Caso2

A Tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos por Silva (1999) utilizando o método BFGS do otimizador do programa computacional MATLAB® e os resultados obtidos empregando os AGs (programa computacional OTR).

Tabela 5.3 - Resultados dos testes de otimização empregando o método BFGS e os AGs

| | Método BFGS (Silva, 1999) | | | | | Algoritmo genético (OTR) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $x_o$ | $y_o$ | $x_f$ | $y_f$ | F | pop | $x_f$ | $y_f$ | F |
| 1 | -2.0 | -2.0 | -3.0 | -3.0 | $6.67 \times 10^{-5}$ | 20 | 0.2281 | -1.6267 | -6.5511 |
| 2 | -1.4 | 0.4 | -1.32 | 0.3 | -2.8807 | 20 | 0.2271 | -1.6255 | -6.5511 |
| 3 | 0.2 | 1.7 | 3.0 | 3.0 | $4.10 \times 10^{-5}$ | 50 | 0.2283 | -1.625 | -6.5511 |
| 4 | 2.5 | 2.5 | 3.0 | 3.0 | $4.10 \times 10^{-5}$ | 50 | 0.2266 | -1.6302 | -6.5508 |
| 5 | -2.0 | 2.0 | 0.2282 | -1.6260 | -6.55113 | 100 | 0.2283 | -1.6264 | -6.5511 |
| 6 | 0.3 | 0.5 | 0.2282 | -1.6260 | -6.55113 | - | - | - | - |
| 7 | 2.5 | -2.0 | 0.2282 | -1.6260 | -6.55113 | - | - | - | - |

Foram executados cinco testes empregando o programa computacional OTR com diferentes números de indivíduos para a população. Os resultados descritos na Tab. 5.3 mostram que o sucesso dos métodos tradicionais na busca da solução ótima em funções multimodais é fortemente influenciado pelo ponto inicial ($x_o$) de busca fornecido pelo usuário. Já o programa computacional OTR encontrou a solução ótima em todos os testes realizados com um tempo computacional médio de 10 segundos, e sempre com menos de 600 gerações.

### ***5.2.3*** *Minimização de uma função matemática - Caso 3*

Seja a seguinte função matemática (HAUPT; HAUPT, 1998):

$$F(x,y) = xsen(4x) + 1.1y\,sin(2y) \tag{5.3}$$

o objetivo é minimizar esta função no domínio: $\begin{cases} 0 \le x \le 10 \\ 0 \le y \le 10 \end{cases}$

Pela Figura 5.2 observa-se que a função possui vários ótimos locais.

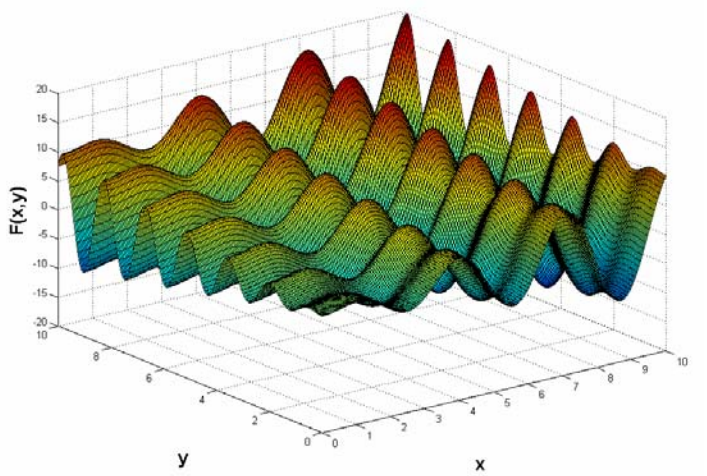



Figura 5.2 - Função utilizada na avaliação da robustez à multimodalidade - Caso 3

Para o caso 3, todas as execuções foram realizadas com 500 gerações. O tempo médio computacional foi de 14s. Os resultados obtidos com o programa computacional OTR são apresentados na Tab. 5.4 juntamente com os encontrados na literatura.

Tabela 5.4 - Resultados obtidos para o Caso 3

| | Haupt e Haupt (1998) | GAOT V | OTR |
|---|---|---|---|
| F(x, y) | -18.5 | -18.5547 | -18.55472 |
| x | - | 9.0390 | 9.03884 |
| y | - | 8.6682 | 8.66828 |

A Figura 5.3 ilustra os resultados obtidos para 100 execuções. A média obtida foi de -18.15559, com desvio padrão de 0.80734.

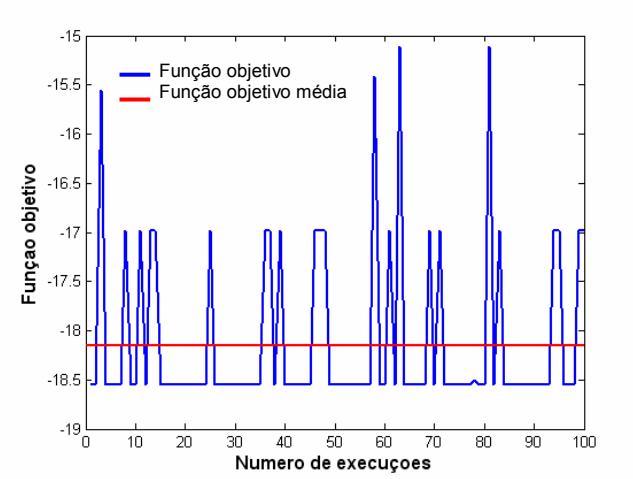



Figura 5.3 - Função objetivo versus Número de execuções para o caso 3

### ***5.2.4*** *Minimização de uma função matemática - Caso 4*

Para analisar a robustez ao ruído do programa computacional OTR foi minimizada a função:

$$f(x) = cos(x) + cos(2.5x) \tag{5.4}$$

no domínio:

$$0 \leq x \leq 2.6\pi$$

cujo mínimo é :

$x_{mín} = 3.6864$ e $f_{mín} = -1.8335$

A Tabela 5.5 apresenta os resultados obtidos para a função (5.4). Novamente, percebe-se que a eficiência do método BFGS depende da escolha do ponto inicial de busca. Sendo que das três tentativas obteve-se sucesso apenas em uma delas. O mesmo não acontece com o OTR que encontrou o ponto de mínimo em todos os casos na primeira tentativa com menos de 1s de tempo computacional e com no máximo 53 gerações.

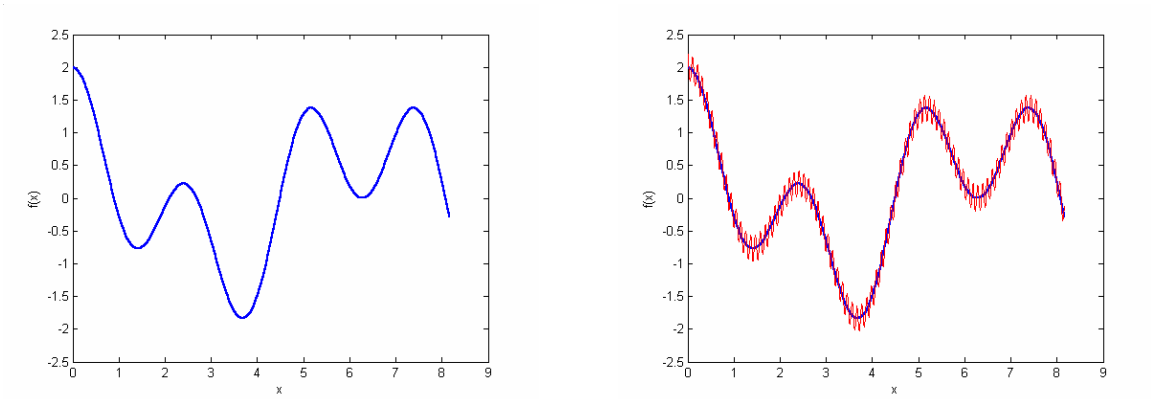
Tabela 5.5 - Resultados obtidos dos testes de otimização - sem ruído

| | Método BFGS (Silva, 1999) | | | OTR | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **$x_o$** | **$x_f$** | **f** | **pop** | **$x_f$** | **f** |
| 1 | 0.5 | 3.6864 | -1.8335 | 20 | 3.68657 | -1.83351 |
| 2 | 5.5 | 6.2832 | 0 | 40 | 3.68641 | -1.83351 |
| 3 | 8.0 | 8.1681 | -0.3089 | 50 | 3.68620 | -1.83351 |

Denomina-se função perturbadora, a toda função harmônica de alta freqüência e baixa amplitude, cujo objetivo é simular as incertezas contidas nos modelos experimentais. Seja a função perturbadora $\varepsilon(x) = 0.2\cos(60x)$, então a função objetivo contaminada com ruído é:

$$\tilde{f} = f(x) + \varepsilon(x) = \cos x + \cos(2.5x) + 0.2\cos(60x) \tag{5.5}$$

A Figura 5.4 ilustra os gráficos da função sem ruído e com ruído.




(a) (b)

Figura 5.4 - Função utilizada na minimização (a) sem ruído; (b) com e sem ruído

Tabela 5.6 - Resultados obtidos dos testes de otimização - com ruído

| | Método BFGS (Silva, 1999) | | | | OTR | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $x_o$ | $x_f$ | f | pop | $x_f$ | f |
| 1 | 0.5 | 0.4751 | 1.0683 | 20 | 3.71725 | -2.03015 |
| 2 | 5.5 | 5.5 | 0.888 | 40 | 3.71731 | -2.03015 |
| 3 | 8.0 | 8.1681 | -0.1089 | 50 | 3.71725 | -2.03015 |

Nota-se pelos resultados dispostos na Tab. 5.6 que o método tradicional não teve um bom desempenho com a presença de ruído. Isto acontece devido o método tradicional usar o gradiente da função objetivo, cujo efeito do ruído modifica fortemente o comportamento da função gradiente, como pode ser observado pela Fig. 5.5. Por outro lado, como os AGs utilizam somente o valor da função objetivo para guiar sua pesquisa, em todos os testes obteve-se ótimos resultados.

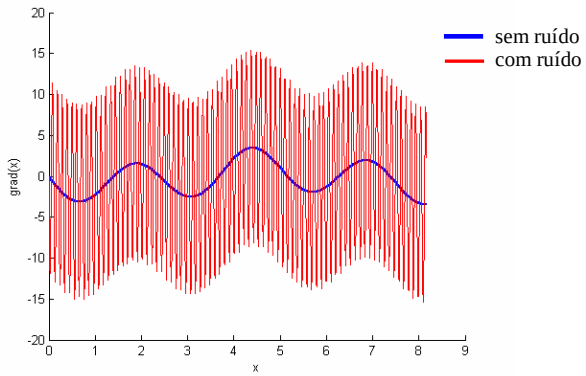



Figura 5.5 - Gradiente da função otimizada

### ***5.2.5*** *Minimização da energia de um sistema de 2 molas*

A Figura 5.6 ilustra um sistema mecânico formado por duas molas submetido a um conjunto de forças $P_1$ e $P_2$. O objetivo neste problema é determinar o ponto de equilíbrio do sistema minimizando a energia potencial (PE).

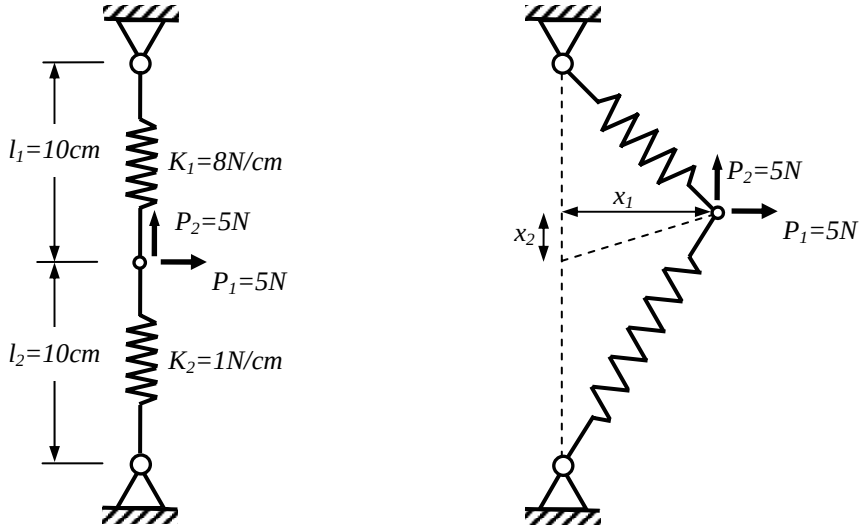



Figura 5.6 - Determinação da posição de equilíbrio estático de um sistema de duas molas

A energia potencial do sistema é dada pela Eq. (5.6):

$$PE = 0.5K_1\left[\sqrt{x_1^2 + (l_1 - x_2)^2} - l_1\right]^2 + 0.5K_2\left[\sqrt{x_1^2 + (l_2 + x_2)^2} - l_2\right]^2 - P_1x_1 - P_2x_2 \qquad (5.6)$$

O domínio das variáveis é:

$$\begin{cases} 6.00 \le x_1 \le 10.00 \\ 2.00 \le x_2 \le 6.00 \end{cases}$$

A Tabela 5.7 apresenta os resultados obtidos na primeira tentativa com um tempo computacional de 2s e 188 gerações.

Tabela 5.7 - Resultados obtidos da minimização da função energia (PE)

| | Teórico | Faria (1991) | OTR |
|---|---|---|---|
| PE | -41.81 | -41.81 | -41.80823 |
| $x_1$ | 8.63 | 8.62 | 8.63071 |
| $x_2$ | 4.53 | 4.52 | 4.52982 |

### ***5.2.6*** *Minimização de uma função matemática com restrição*

O objetivo deste problema é minimizar a função matemática de quatro variáveis ($x_1, x_2, x_3, x_4$):

$$F(x) = x_1^2 - 5x_1 + x_2^2 - 5x_2 + 2x_3^2 - 21x_3 + x_4^2 + 7x_4 + 50 \tag{5.7}$$

sujeita às seguintes restrições:

$$g_1(x) = x_1^2 - x_1 + 2x_2^2 + x_3^2 + 2x_4^2 - x_4 - 10 \leq 0$$

$$g_2(x) = x_1^2 + x_1 + x_2^2 - x_2 + x_3^2 + x_3 + x_4^2 - x_4 - 8 \leq 0$$

$$g_3(x) = 2x_1^2 + 2x_1 + x_2^2 - x_2 + x_3^2 - x_4 - 5 \leq 0$$

no domínio:

$$\begin{cases} 0.00 \leq x_1 \leq 2.10 \\ 0.50 \leq x_2 \leq 2.80 \\ 1.50 \leq x_3 \leq 3.90 \\ -2.10 \leq x_4 \leq 0.00 \end{cases}$$

A Tabela 5.8 mostra os resultados obtidos. Nota-se que o programa OTR obteve um ótimo resultado na primeira tentativa. Foram necessárias 5000 gerações e um tempo computacional de 50s. Os indivíduos que não atenderam qualquer uma das restrições durante a otimização foram descartados da população.

Tabela 5.8 - Resultados obtidos da minimização da função (5.7)

| | Casas (1998) | Faria (1991) | OTR |
|---|---|---|---|
| F(x) | 6.00 | 6.03 | 6.00285 |
| $x_1$ | 0.00 | 0.06 | 0.00000 |
| $x_2$ | 1.00 | 0.95 | 1.01441 |
| $x_3$ | 2.00 | 1.95 | 1.99605 |
| $x_4$ | -1.00 | -1.04 | -1.00110 |

### ***5.2.7*** *Minimização do volume de uma treliça*

A Figura 5.7 ilustra uma treliça plana simétrica formada por três barras solicitada por duas forças $P_1$ e $P_2$. O objetivo neste problema determinar as áreas $A_1$, $A_2$ e $A_3$ que minimizem o volume da estrutura e satisfaça as restrições de projeto. Impõe-se que $A_1 = A_3$. O volume da treliça é dado pela Eq. (5.8):

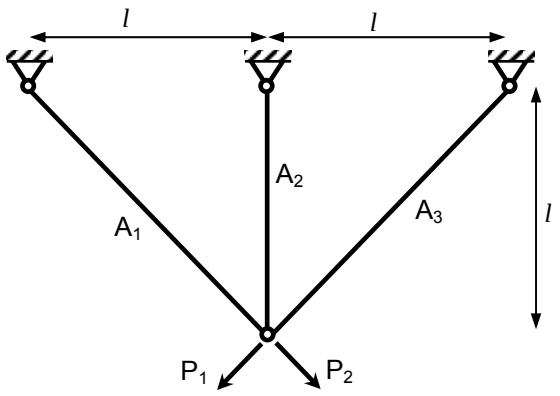



Figura 5.7 - Treliça plana formada por 3 barras

$$V = \rho l\left(2\sqrt{2}A_1 + A_2\right) \tag{5.8}$$

onde:

$\rho$ = densidade do material da estrutura = $2.768 \times 10^{-3}$ kg/m$^{3;}$

l = 25.4 cm;

$-10550 \leq \sigma_{ij} \leq 14060$ N/cm$^{2;}$

$P_1 = P_2 = 89 \times 10^3$ N;

Restrições:

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_a} - 1 \leq 0$$

$$g(1) = \frac{2A_1 + \sqrt{2}A_2}{2A_1\left(A_1 + \sqrt{2}A_2\right)} - 1 \leq 0$$

$$g(2) = \frac{1}{2\left(A_1 + \sqrt{2}A_2\right)} - 1 \leq 0$$

Ou seja:

$$\sigma_{11} = \frac{1}{2}\left[\frac{P_1}{A_1} + \frac{P_1}{A_1 + \sqrt{2}A_2}\right]$$

$$\sigma_{12} = \frac{1}{2}\left[\frac{P_2}{A_1 + \sqrt{2}A_2} - \frac{P_2}{A_1}\right]$$

$$\sigma_{21} = \frac{P_1}{A_1 + \sqrt{2}A_2}$$

$$\sigma_{22} = \frac{P_2}{A_1 + \sqrt{2}A_2}$$

$$\sigma_{31} = \frac{1}{2}\left[\frac{P_1}{A_1 + \sqrt{2}A_2} - \frac{P_1}{A_1}\right]$$

$$\sigma_{32} = \frac{1}{2}\left[\frac{P_2}{A_1} + \frac{P_2}{A_1 + \sqrt{2}A_2}\right]$$

A Tabela 5.9 apresenta os resultados obtidos para a minimização do volume da treliça no seguinte domínio:

$$\begin{cases} 0.01 \leq A_1 \leq 1000 \\ 0.01 \leq A_2 \leq 1000 \end{cases}$$

Tabela 5.9 - Resultados obtidos da minimização do volume da treliça

| | Braga (1998) | Faria (1991) | OTR |
|---|---|---|---|
| F(x) | 1.196 | 1.17 | 1.17471 |
| $A_1$ | 5.162 | 5.09 | 4.95875 |
| $A_2$ | 2.420 | 2.63 | 2.68280 |

O programa computacional OTR necessitou de 1355 gerações realizadas no tempo computacional de 10s para encontrar o ponto ótimo. Na tentativa de refinar ainda mais o

resultado fez-se uma nova tentativa com o domínio menor. Os resultados obtidos são mostrados na Tab. 5.10.

$$\begin{cases} 0.01 \leq A_1 \leq 10 \\ 0.01 \leq A_2 \leq 10 \end{cases}$$

Tabela 5.10 - Resultados obtidos da minimização do volume da treliça

| | OTR |
|---|---|
| F(x) | 1.17471 |
| $A_1$ | 4.93772 |
| $A_2$ | 2.74225 |

Mesmo com o domínio bem menor que na primeira tentativa, o programa OTR encontrou o mesmo valor ótimo para o volume da treliça. O tempo computacional gasto foi de 20s e o número de gerações de 1364.

Conclui-se que o programa computacional OTR teve um ótimo desempenho em todos os problemas analisados. Sendo capaz de encontrar o ponto ótimo de cada função em um tempo computacional aceitável. Além disso, apresentou robustez em problemas de multimodalidade ou na presença de ruído na função objetivo.

## 5.3 Análise da influência do operador mutação restrita no desempenho do algoritmo genético

Para reduzir o tempo computacional melhorando o desempenho do AG, implementou-se o operador mutação restrita com o objetivo de refinar o valor ótimo da função objetivo, numa região em torno dos valores ótimos das variáveis do indivíduo melhor adaptado ao problema até a geração atual.

A análise da influência do operador mutação restrita no desempenho do algoritmo genético foi realizada através da otimização de uma estrutura de cobertura com barras cruzadas com dimensões para o comprimento e largura da área coberta iguais a 1500cm. Os dados de entrada necessários para a execução do programa computacional OTR estão dispostos nas Tabs. 5.11 à 5.13.

Tabela 5.11 - Parâmetros geométricos e propriedades mecânicas dos materiais que compõem as estruturas

| | |
|---|---|
| Número máximo de módulos na direção x | 8 |
| Número máximo de módulos na direção z | 8 |
| Comprimento máximo da barra padrão | 200 cm |
| Ângulo mínimo de inclinação | 5° |
| Ângulo máximo de inclinação | 30° |
| Módulo de elasticidade do tubo (E) | 21000 kN/cm$^2$ |
| Módulo de elasticidade transversal do tubo (G) | 8076 kN/cm$^2$ |
| Limite de escoamento do tubo ($f_y$) | 32 kN/cm$^2$ |
| Ligações contínuas (rígidas) | Sim |
| Seção transversal do pilar de apoio | 30 x 30 cm |
| Módulo de elasticidade do concreto | 3500 kN/cm$^2$ |

Tabela 5.12 - Valores usados para definir o carregamento da estrutura

| | |
|---|---|
| Peso próprio das telhas | 0.0250 N/cm$^2$ |
| Sobrecarga | 0.025 N/cm$^2$ |
| Altura da edificação | 500 cm |
| Velocidade básica do vento | 0.25 cm/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 | - |

Tabela 5.13 - Valores para os parâmetros do AG

| | |
|---|---|
| Geração | 100 |
| População | 50 |
| Taxa de recombinação | 0.80 |
| Taxa de mutação | 0.05 |
| Estagnação | - |

A Tabela 5.14 apresenta os valores otimizados para a estrutura em estudo. A Figura 5.8 ilustra o tempo computacional gasto na otimização para 10 execuções, usando o operador genético mutação restrita. O tempo computacional médio foi de 1.7633 minutos, com desvio padrão de 0.2084 minutos. Em todas as execuções o algoritmo encontrou o mínimo absoluto.

Tabela 5.14 - Resumo dos parâmetros otimizados da estrutura

| | |
|---|---|
| Número de módulos na direção x | 6 |
| Número de módulos na direção z | 7 |
| Inclinação da cobertura (°) | 6 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 6.03 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.32 |
| Comprimento da barra (cm) | 166 |
| Consumo de tubos (kg) | 1583 |

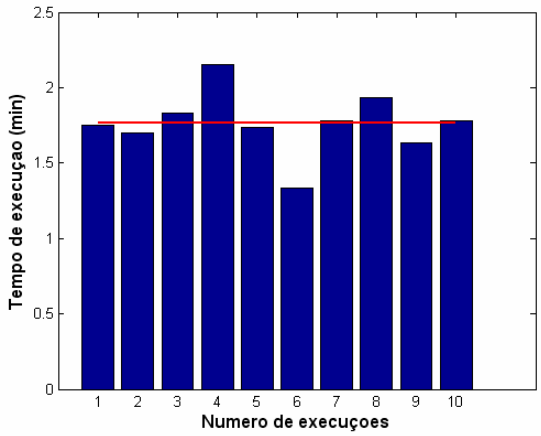



Figura 5.8 – Tempo de execução versus Número de execuções para otimização useo o operador mutação restrita

As Figuras 5.9 e 5.10 ilustram o tempo computacional gasto na otimização e o consumo de tubos para 10 execuções, sem utilizar o operador mutação restrita. O tempo computacional médio foi de 0.8400 minutos, com desvio padrão de 0.1238 minutos. O consumo de tubos médio foi de 1598.3kg, com desvio padrão de 17.5kg.

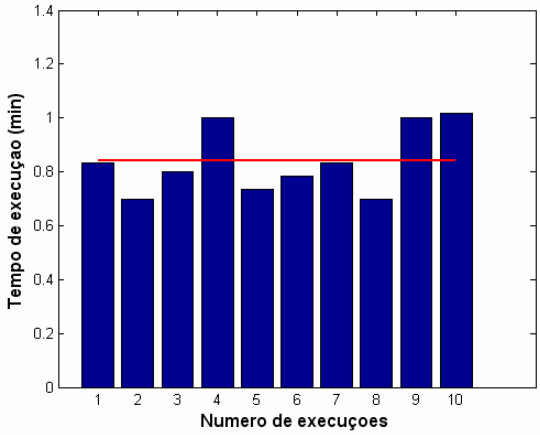



Figura 5.9 - Tempo de execução versus Número de execuções para otimização sem usar o operador mutação restrita

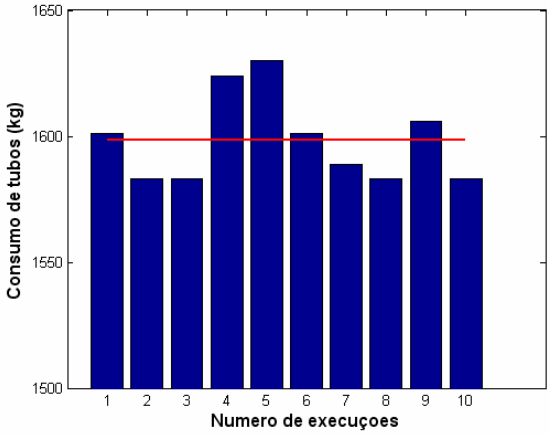



Figura 5.10 – Função objetivo versus Número de execuções para otimização sem usar o operador mutação restrita

Percebe-se pelas Figs. 5.9 e 5.10 que sem utilizar o operador mutação restrita o AG encontrou o valor ótimo para a função objetivo com um tempo computacional bem menor que o tempo gasto utilizando o operador mutação restrita. No entanto, o AG nem sempre encontrou o valor ótimo disposto na Tab. 5.14. Na tentativa de melhorar os resultados obtidos para o desempenho do AG sem o operador mutação restrita, otimizou-se a mesma estrutura com 200 gerações. Os resultados obtidos estão ilustrados nas Figs. 5.11 e 5.12. O tempo computacional médio foi de 2.8617 minutos, com desvio padrão de 0.3412 minutos. O consumo de tubos médio foi de 1586.9kg, com desvio padrão de 4.3kg. Nota-se que os resultados obtidos melhoraram em relação aos obtidos para 100 gerações sem usar o operador mutação restrita. Entretanto, o tempo computacional médio também aumentou

ultrapassando o tempo computacional gasto para a otimização utilizando o operador mutação restrita.

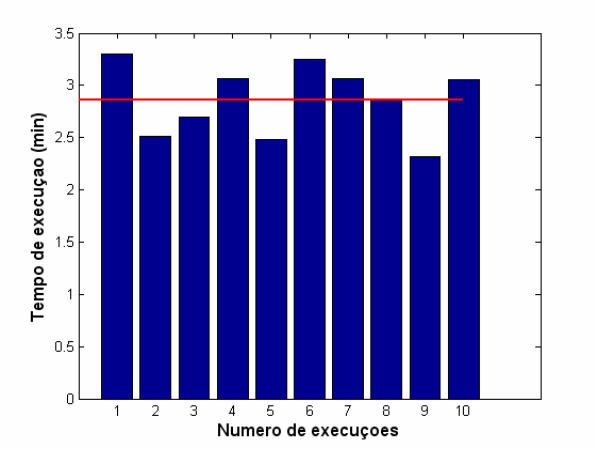



Figura 5.11 - Tempo de execução versus Número de execuções para otimização sem usar o operador mutação restrita – 200 gerações

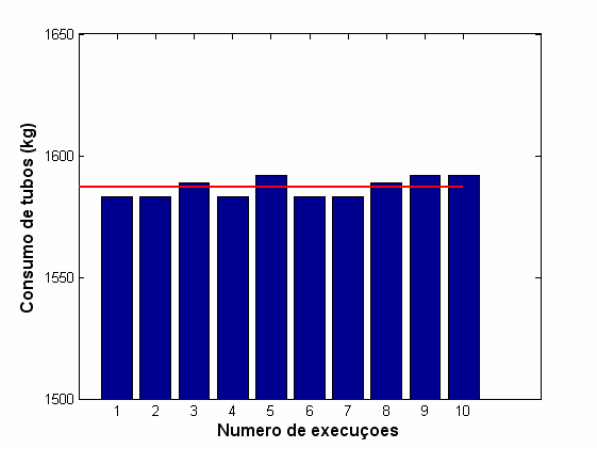



Figura 5.12 - Função objetivo versus Número de execuções para otimização sem usar o operador mutação restrita – 200 gerações

Conclui-se a partir dos resultados obtidos que o operador mutação restrita é importante para o desempenho do AG na otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas, pois conduz o AG ao valor ótimo da função objetivo com maior rapidez e segurança. Entende-se que os resultados obtidos neste capítulo são suficientes para garantir a eficiência do programa OTR na minimização do consumo de tubos de estruturas espaciais com barras cruzadas, os quais serão apresentados no capítulo seguinte.

# CAPÍTULO 6

## ANÁLISE DA EFICIÊNCIA GLOBAL DO MODELO ESTRUTURAL PARA COBERTURA COM BARRAS CRUZADAS

### 6.1 Introdução

A geometria de um modelo estrutural é de grande importância para o desempenho mecânico da estrutura. Consequentemente, torna-se importante conhecer detalhadamente a influência das variáveis de projeto no seu comportamento estrutural.

No caso em estudo, estruturas tubulares metálicas espaciais com barras cruzadas, avaliou-se a influência dos parâmetros: existência de barras no contorno da estrutura (direção x e/ou z), existência de barras ligando os nós de cumeeira, ângulo de inclinação da cobertura, relação comprimento/largura da área coberta em planta, distribuição dos apoios e diâmetro dos tirantes, no comportamento mecânico global da estrutura. Espera-se com isso, utilizar este modelo estrutural na sua máxima capacidade resistente aliado ao menor consumo de material na sua fabricação.

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos com o programa computacional OTR na minimização do consumo de tubos de estruturas tubulares metálicas espaciais com barras cruzadas. Admite-se que a minimização do consumo de tubos está diretamente ligada ao comportamento mecânico da estrutura, pois a mesma é dimensionada iterativamente durante a execução do programa. Pode-se então, chegar a conclusões importantes sobre o comportamento mecânico global da estrutura e de sua viabilidade econômica através dos resultados obtidos da otimização.

A Tabela 6.1 apresenta os valores utilizados para os parâmetros geométricos e as propriedades mecânicas comum a todos os modelos analisados. A partir destes valores, o programa computacional OTR, a cada iteração, seleciona o indivíduo melhor adaptado a função objetivo, e com os valores de suas variáveis gera os dados geométricos (posição dos nós, incidência de barras, apoios) e os armazena num arquivo do tipo texto. Em seguida, utilizando os valores da Tab. 6.2 fornecidos pelo usuário, o programa computacional OTR seleciona no banco de dados os valores dos coeficientes de forma interno e externos e determina o carregamento nodal da estrutura que é acrescentado ao arquivo de dados geométricos.

Tabela 6.1 - Parâmetros geométricos e propriedades mecânicas dos materiais que compõem as estruturas

| | |
|---|---|
| Comprimento máximo da barra padrão | 200 cm |
| Ângulo mínimo de inclinação | 5° |
| Ângulo máximo de inclinação | 30° |
| Módulo de elasticidade do tubo (E) | 21000 kN/cm$^2$ |
| Módulo de elasticidade transversal do tubo (G) | 8076 kN/cm$^2$ |
| Limite de escoamento do tubo ($f_y$) | 32 kN/cm$^2$ |
| Ligações contínuas (rígidas) | Sim |
| Seção transversal do pilar de apoio | 30 x 30 cm |
| Módulo de elasticidade do concreto | 3500 kN/cm$^2$ |

Tabela 6.2 - Valores usados para definir o carregamento da estrutura

| | |
|---|---|
| Peso próprio das telhas | 0.025 N/cm$^2$ |
| Sobrecarga | 0.025 N/cm$^2$ |
| Altura da edificação | 500 m |
| Velocidade básica do vento | 0.25 cm/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 | - |

Além dos parâmetros fornecidos nas Tabs. 6.1 e 6.2, para a geração da malha estrutural e das forças aplicadas nos nós da estrutura devido o peso próprio, a sobrecarga e ação do vento, o programa computacional OTR usou os valores dispostos na Tab. 6.3 específicos para a execução do AG. Foram utilizados cinco operadores genéticos: seleção (método da roleta), recombinação discreta, mutação uniforme, mutação restrita e elitismo. Como critério de parada adotou-se o critério de estagnação, ou seja, se o programa computacional dimensionar 100 estruturas e não ocorrer melhora na função objetivo, a execução é interrompida e o critério da máxima geração.

Tabela 6.3 - Valores para os parâmetros do AG

| | |
|---|---|
| Geração | 200 |
| População | 50 |
| Taxa de recombinação | 0.80 |
| Taxa de mutação | 0.05 |
| Estagnação | 100 |

A Tabela 6.4 fornece os valores adotados para o vão coberto da estrutura com os respectivos valores para o número máximo de módulos em cada direção.

Tabela 6.4 - Vão coberto $x$ Número máximo de módulos em cada direção

| Vão coberto (m) | N° máximo de módulos |
|---|---|
| Até 10.00 | 5 |
| de 10.01 à 14.99 | 7 |
| de 15.00 a 19.99 | 9 |
| de 20.00 à 24.99 | 11 |
| de 25.00 à 29.99 | 13 |
| de 30.00 à 35.00 | 15 |

## 6.2 Avaliação da influência das barras de contorno e de cumeeira no comportamento mecânico da estrutura

Espera-se que a inserção de barras fazendo o contorno da estrutura ou ligando os nós de cumeeira torne a estrutura mais rígida, diminuindo os deslocamentos. Consequentemente ter-se-á um valor ótimo menor para função custo. Para realizar este estudo foram otimizados cinco casos para o modelo estrutural em apreço, ilustrados na Fig. 6.1.

***Caso 1)*** Estrutura sem barras de contorno ou ligando os nós de cumeeira;
***Caso 2)*** Estrutura com barras ligando os nós de cumeeira;
***Caso 3)*** Estrutura com barras ligando os nós de contorno (direção x);
***Caso 4)*** Estrutura com barras ligando os nós de contorno (direção z);
***Caso 5)*** Estrutura com barras ligando os nós de contorno e os nós de cumeeira.

As análises feitas nas seções 6.2 a 6.4 foram realizadas para três modelos, com diferentes valores para as dimensões largura e comprimento da área coberta:

- Modelo 1: 10x12m;
- Modelo 2: 12x15m;
- Modelo 3: 15x25m;

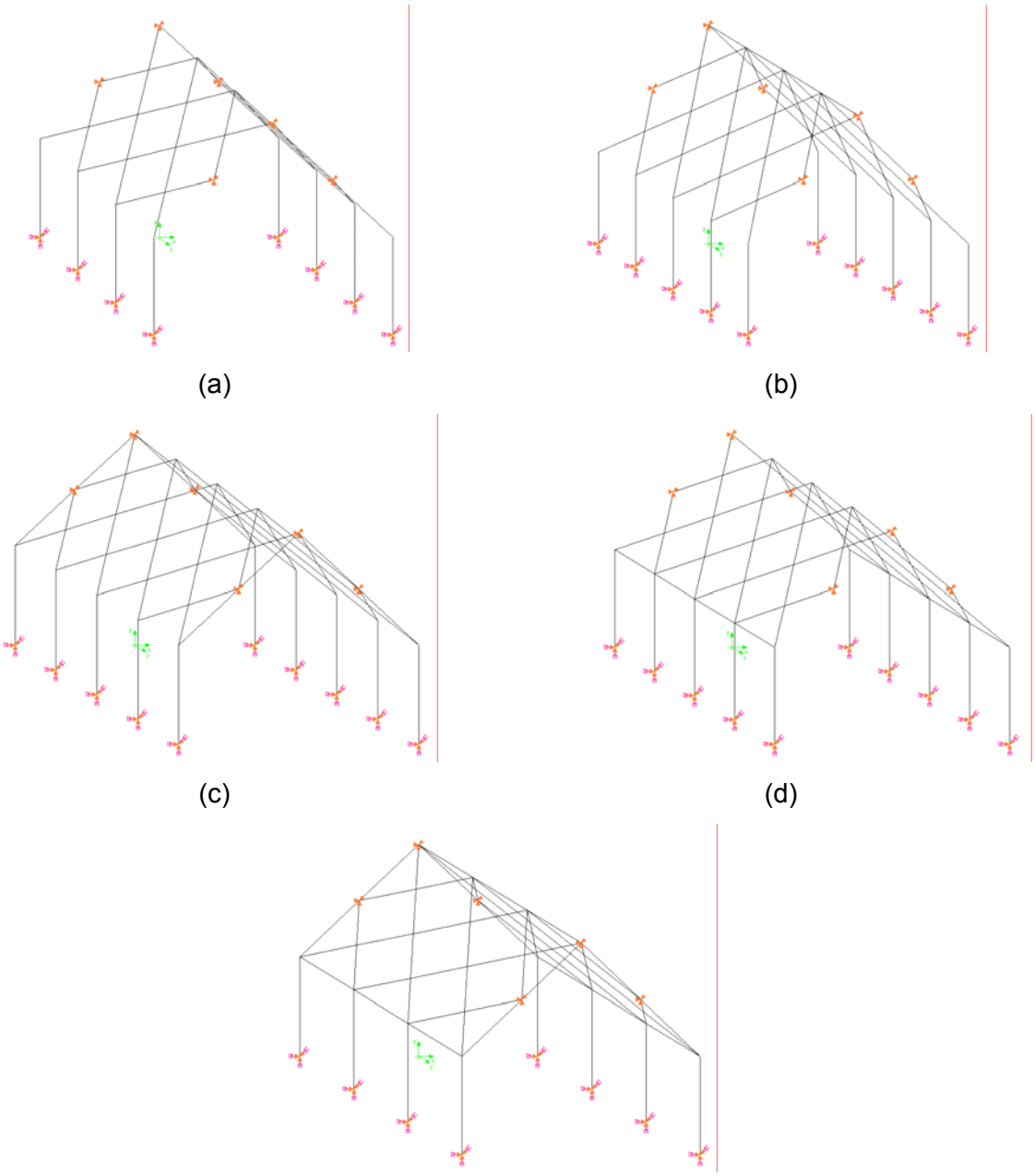



Figura 6.1 - Ilustração da estrutura de cobertura com barras cruzadas. a) Caso 1; b) Caso 2; c) Caso 3; d) Caso 4; e) Caso 5

Os resultados obtidos para a otimização dos três modelos são apresentados nas Tabs. 6.5 à 6.7 e pelas Figs. 6.2 à 6.13. Os resultados ilustrados para os esforços, normal e de flexão, foram obtidos para a combinação de carregamento do estado limite último. O cálculo do aumento no consumo de aço foi realizado através da seguinte equação:

$$Aumento = \frac{C_i - C_1}{C_1}.100\% \tag{6.1}$$

onde:

$C_i$ : consumo de aço em cada caso (i = 1 até 5);

$C_1$ : consumo de aço do caso 1.

Tabela 6.5 - Resultados obtidos na otimização do modelo 1

| | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Número de módulos na direção x | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Número de módulos na direção z | 6 | 7 | 5 | 6 | 6 |
| Inclinação da cobertura (°) | 28 | 15 | 10 | 28 | 16 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.22 | 4.22 | 4.83 | 4.22 | 4.22 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.25 | 0.25 | 0.28 | 0.25 | 0.25 |
| Comprimento da barra (cm) | 181 | 157 | 176 | 181 | 167 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 5.15 | 4.15 | 4.92 | 5.11 | 5.10 |
| Consumo de tubos (kg) | 432 | 466 | 504 | 491 | 537 |

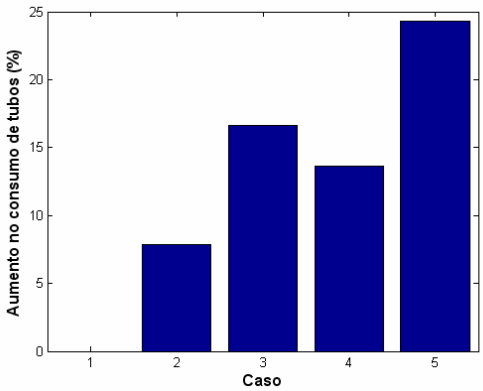



Figura 6.2 - Resultados obtidos para o aumento no consumo de aço do modelo 1

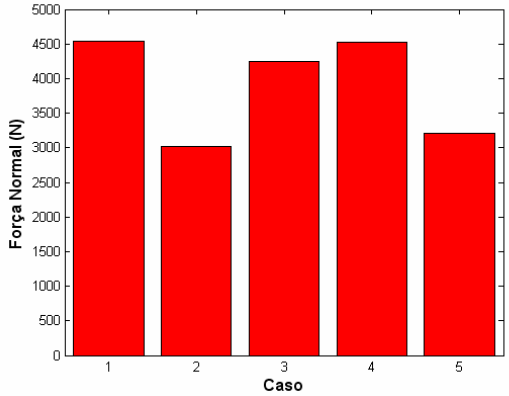



Figura 6.3 – Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1

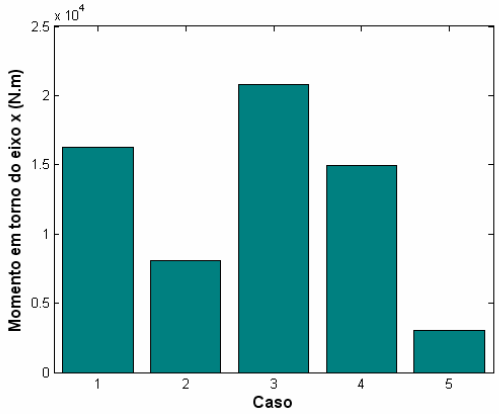



Figura 6.4 – Esforço de flexão máximo em torno do eixo x atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1

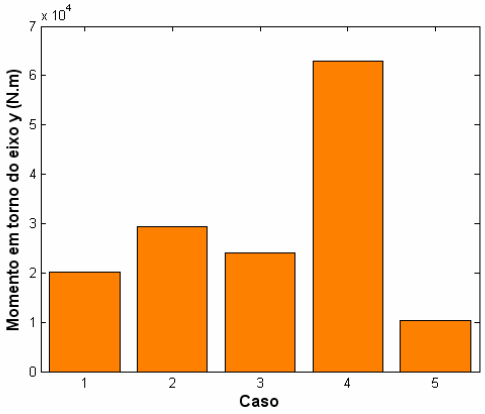



Figura 6.5 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo y atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1

Tabela 6.6 - Resultados obtidos na otimização do modelo 2

| | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Número de módulos na direção x | 4 | 4 | 6 | 4 | 4 |
| Número de módulos na direção z | 9 | 8 | 8 | 9 | 8 |
| Inclinação da cobertura (°) | 22 | 19 | 22 | 22 | 13 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.83 | 4.83 | 4.83 | 4.83 | 4.83 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| Comprimento da barra (cm) | 185 | 187 | 148 | 185 | 182 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 4.63 | 5.30 | 6.24 | 4.60 | 5.21 |
| Consumo de tubos (kg) | 834 | 796 | 969 | 928 | 945 |

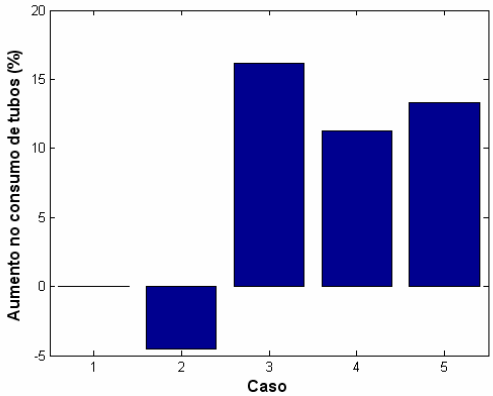



Figura 6.6 - Resultados obtidos para o aumento no consumo de aço do modelo 2

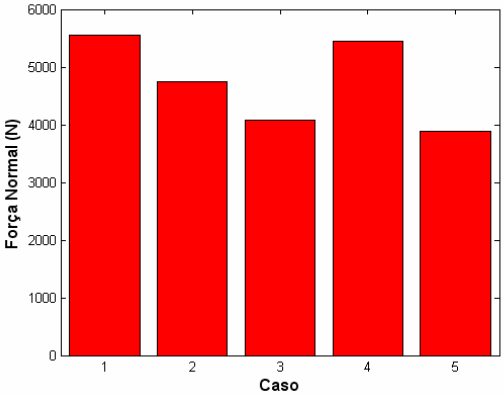



Figura 6.7 - Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 2

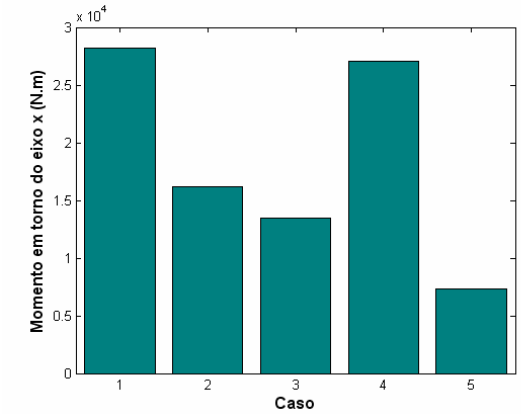



Figura 6.8 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo x atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 2

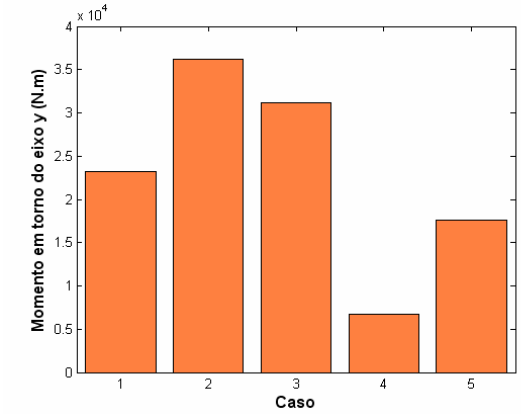



Figura 6.9 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo y atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 2

Tabela 6.7 - Resultados obtidos na otimização do modelo 3

| | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Número de módulos na direção x | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Número de módulos na direção z | 11 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| Inclinação da cobertura (°) | 19 | 17 | 17 | 18 | 14 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 7.30 | 7.30 | 7.30 | 7.30 | 6.03 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 |
| Comprimento da barra (cm) | 179 | 185 | 177 | 171 | 163 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 5.05 | 5.77 | 5.11 | 4.44 | 6.44 |
| Consumo de tubos (kg) | 2585 | 2568 | 2728 | 2974 | 2746 |

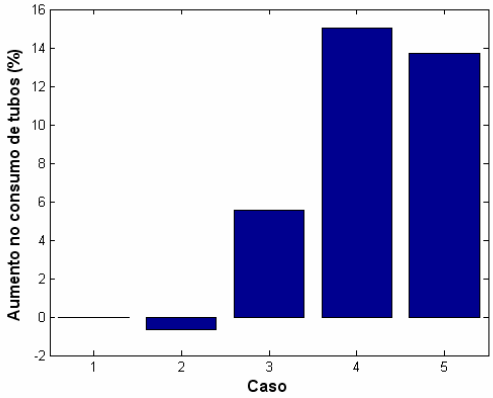



Figura 6.10 - Resultados obtidos para o aumento no consumo de aço do modelo 3

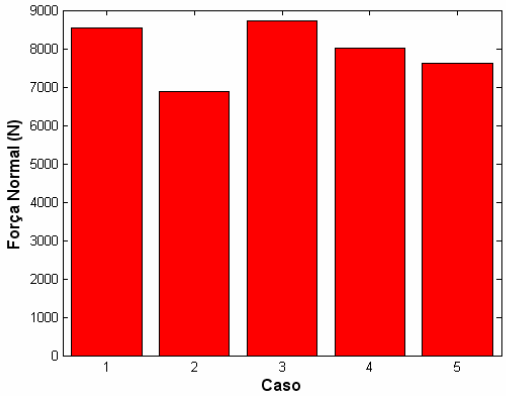



Figura 6.11 - Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 3

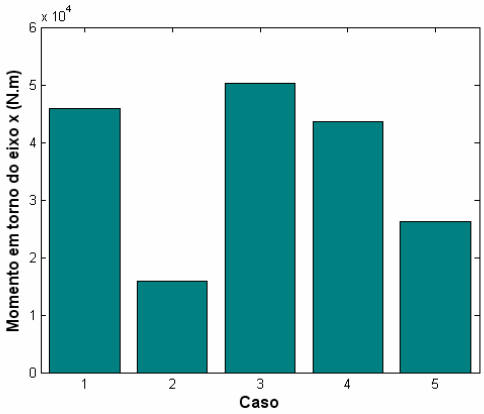



Figura 6.12 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo x atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 3

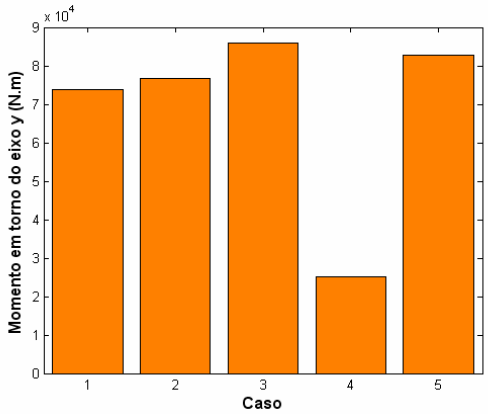



Figura 6.13 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo y atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 3

Conclui-se através dos resultados dispostos nas Tabs. 6.5 à 6.7 que o uso de barras fazendo o contorno da estrutura ou ligando os nós de cumeeira tem influência significativa nos valores ótimos das variáveis de projeto. Através das Figs. 6.2 à 6.13, verifica-se para os casos 3, 4 e 5 que geralmente, o consumo de tubos aumenta com a inserção de barras no contorno da estrutura. No entanto, para o caso 2 dos modelos 2 e 3 teve-se uma pequena redução no consumo de tubos de 4% e 1%, respectivamente. Isto mostra que barras ligando os nós de cumeeira são importantes para o desempenho mecânico global da estrutura. Percebe-se também uma variação significativa nos esforços máximos atuantes nos pilares, normal e flexão em torno dos eixos x e y, e na quantidade de pilares de apoio da estrutura. Na maioria dos casos houve redução nos esforços máximos de flexão nos pilares de apoio da estrutura de cobertura, o que consequentemente implicará em redução de custo na construção dos pilares.

## 6.3 Avaliação da Influência do Tirante no Desempenho Mecânico Global da Estrutura

Outra forma de reduzir os esforços nos pilares de apoio e melhorar a distribuição dos esforços nas barras que compõem a estrutura é inserindo tirantes, conforme está ilustrado na Fig. 6.14. Para avaliar este aspecto foram otimizados os modelos 1, 2 e 3 com diferentes valores para o diâmetro dos tirantes. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabs. 6.8 à 6.10 para o caso 1 dos modelos 1, 2 e 3, respectivamente.

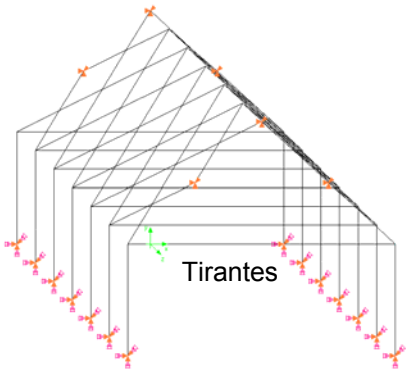



Figura 6.14 - Ilustração da estrutura de cobertura com barras cruzadas e com tirantes

Tabela 6.8 - Resultados obtidos para a otimização da estrutura de cobertura do modelo1 com diferentes valores para o diâmetro do tirante

| | Diâmetro da seção transversal do tirante (pol) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | - | 3/16 | 1/4 | 5/16 | 3/8 | 1/2 | 5/8 | 3/4 | 1 |
| Número de módulos na direção x | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Número de módulos na direção z | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Inclinação da cobertura (°) | 28 | 24 | 22 | 22 | 21 | 14 | 12 | 11 | 10 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.22 | 4.22 | 4.22 | 4.22 | 4.22 | 4.22 | 4.22 | 4.22 | 4.22 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| Comprimento da barra (cm) | 181 | 175 | 173 | 173 | 172 | 165 | 164 | 163 | 163 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 5.15 | 5.14 | 5.14 | 5.13 | 5.13 | 5.20 | 5.25 | 5.14 | 5.28 |
| Consumo de tubos (kg) | 432 | 417 | 411 | 411 | 408 | 393 | 390 | 388 | 387 |

As Figuras 6.15 à 6.18 ilustram os resultados obtidos para a redução no consumo de tubos e os esforços, normal e de flexão em torno dos eixos x e y, máximos nos pilares de apoio para a combinação de cargas do estado limite último do modelo 1. Nota-se pela Fig. 6.15 que o uso de tirantes proporciona uma redução no consumo de tubos. A curva de redução no consumo de tubos possui um crescimento mais acentuado para diâmetro dos tirantes até 1,25cm (1/2”), a partir deste ponto a curva tende a se estabilizar. A redução no consumo de tubos é determinada pela Eq. (6.1) em módulo.

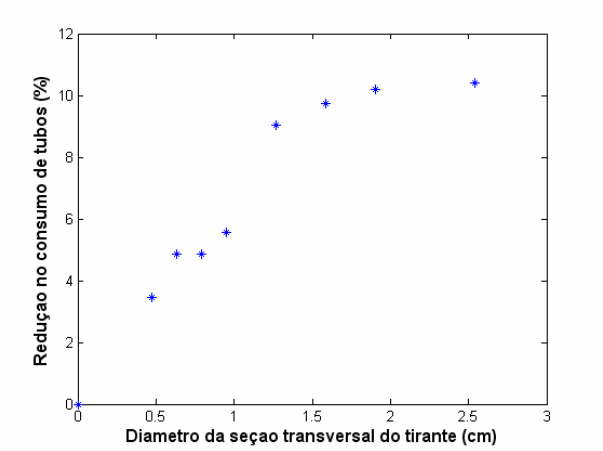



Figura 6.15 – Redução no consumo de tubos em função do diâmetro do tirante para o modelo 1

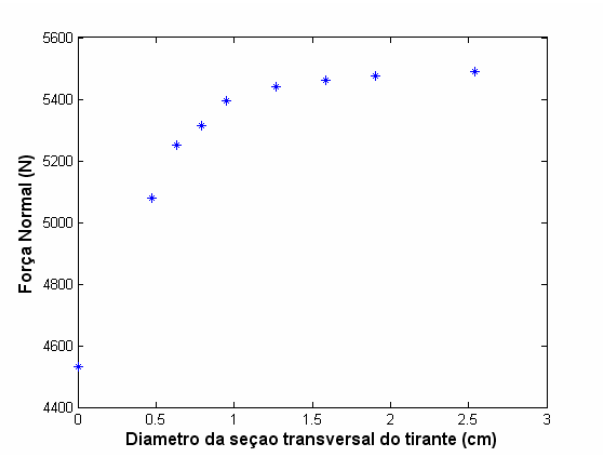



Figura 6.16 - Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1

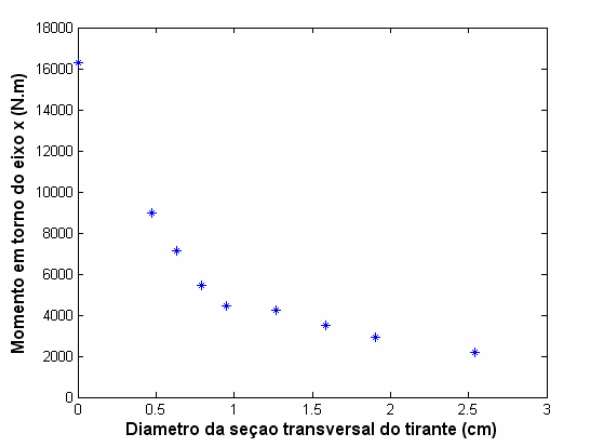



Figura 6.17 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo x ($M_x$) atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1

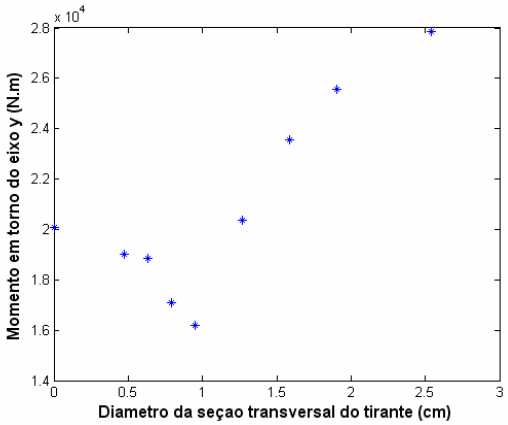



Figura 6.18 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo y ($M_y$) atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1

Percebe-se pela Fig. 6.16 que o uso de tirantes na estrutura provoca aumento no força normal máxima atuante nos pilares de apoio. A Figura 6.17 mostra que o momento máximo $M_x$ atuante nos pilares de apoio diminuem significativamente com o uso de tirantes. Já os resultados do momento fletor $M_y$ são decrescentes até tirantes com diâmetros de 1cm, a partir deste ponto o momento máximo $M_y$ aumenta, como pode ser visto na Fig. 6.18.

A Tabela 6.9 apresenta os resultados obtidos para a otimização da estrutura de cobertura com barras cruzadas do modelo 2 para diferentes valores do diâmetro dos tirantes.

Tabela 6.9 - Resultados obtidos para a otimização da estrutura de cobertura do modelo 2 com diferentes valores para o diâmetro do tirante

| | Diâmetro da seção transversal do tirante (pol) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | - | 3/16 | 1/4 | 5/16 | 3/8 | 1/2 | 5/8 | 3/4 | 1 |
| Número de módulos na direção x | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Número de módulos na direção z | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Inclinação da cobertura (°) | 22 | 16 | 13 | 12 | 11 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.83 | 4.83 | 4.83 | 4.83 | 4.83 | 4.83 | 4.83 | 4.83 | 4.83 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| Comprimento da barra (cm) | 185 | 184 | 182 | 181 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 4.63 | 5.38 | 5.46 | 5.44 | 5.45 | 5.41 | 5.41 | 5.41 | 5.41 |
| Consumo de tubos (kg) | 834 | 737 | 727 | 725 | 722 | 720 | 720 | 720 | 720 |

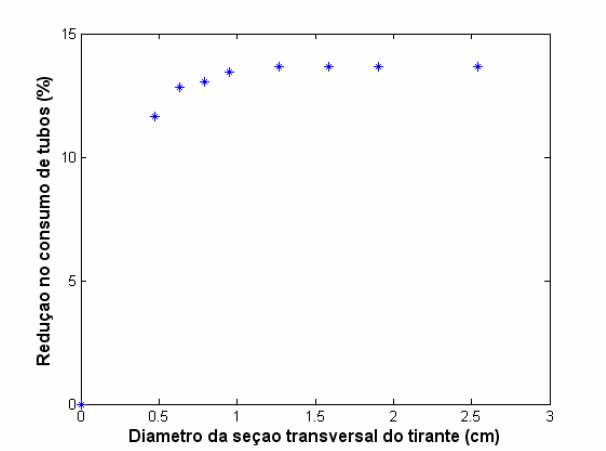



Figura 6.19 - Redução no consumo de tubos em função do diâmetro do tirante para o modelo 2

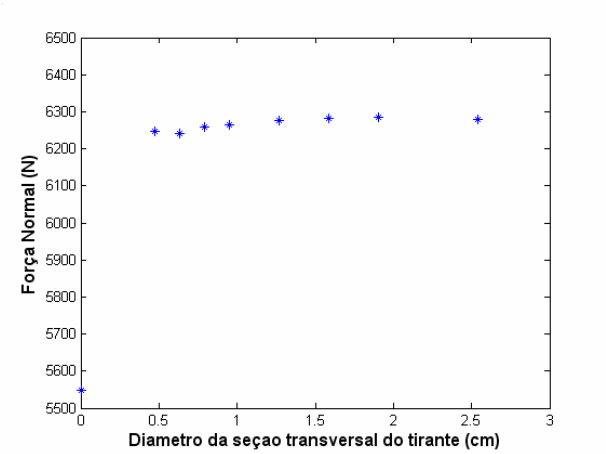



Figura 6.20 - Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 2

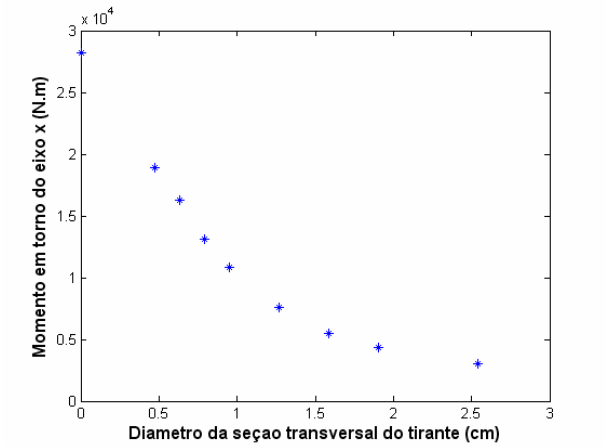



Figura 6.21 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo x atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 2

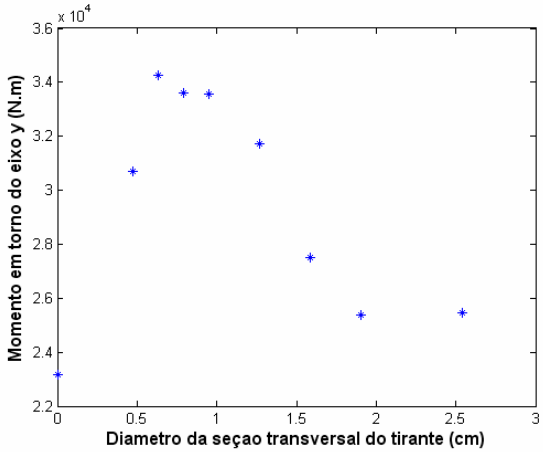



Figura 6.22 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo y atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 2

A Figura 6.19 ilustra a redução no consumo de tubos em função do diâmetro dos tirantes. Nota-se que para o modelo 2 a taxa de redução no consumo de tubos é mais significativa para diâmetros até 0,63cm (1/4”). A partir deste ponto, a taxa de redução no consumo de tubos tende a diminuir. Obseva-se pela Fig. 6.20 que o esforço normal máximo atuante nos pilares aumenta com a introdução dos tirantes. Isto ocorre principalmente porque o número de módulos na direção z otimizado diminui de 9 (sem tirante) para 8 (com tirante). Percebe-se ainda, que este aumento tem pouca variação com o diâmetro do tirante.

A Figura 6.21 ilustra os resultados obtidos para o momento fletor $M_x$ máximo atuante nos pilares de apoio. Nota-se que a curva que melhor representa estes resultados é não linear e decrescente. Os resultados obtidos para o momento fletor $M_y$ estão mostrados na Fig. 6.22. Neste caso o esforço aumenta rapidamente para diâmetros até 0.79cm (5/16”) e depois passa a diminuir.

Tabela 6.10 - Resultados obtidos para a otimização da estrutura de cobertura do modelo 3 com diferentes valores para o diâmetro do tirante

| | Diâmetro da seção transversal do tirante (pol) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | - | 3/16 | 1/4 | 5/16 | 3/8 | 1/2 | 5/8 | 3/4 | 1 |
| Número de módulos na direção x | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Número de módulos na direção z | 11 | 10 | 10 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 |
| Inclinação da cobertura (°) | 19 | 14 | 12 | 22 | 14 | 11 | 10 | 9 | 8 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 7.30 | 7.30 | 7.30 | 6.03 | 6.03 | 6.03 | 6.03 | 6.03 | 6.03 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 |
| Comprimento da barra (cm) | 179 | 182 | 181 | 170 | 163 | 161 | 160 | 160 | 159 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 5.05 | 6.07 | 6.25 | 6.26 | 6.42 | 6.53 | 6.52 | 6.55 | 6.56 |
| Consumo de tubos (kg) | 2585 | 2396 | 2377 | 2377 | 2272 | 2246 | 2238 | 2232 | 2226 |

As Figuras 6.23 à 6.26 ilustram os resultados obtidos para a redução no consumo de tubos e os esforços, normal e de flexão em torno dos eixos x e y, máximos nos pilares de apoio, respectivamente, para a combinação de ações do estado limite último do modelo 3.

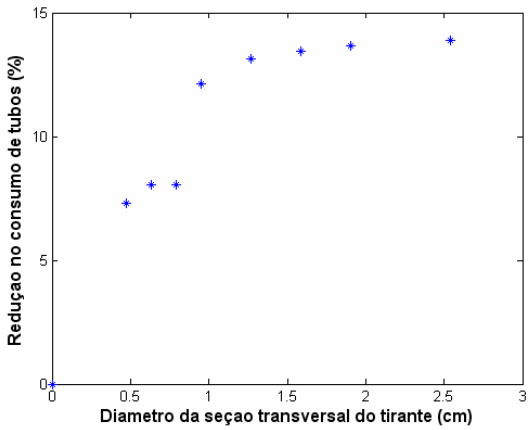



Figura 6.23 - Redução no consumo de tubos em função do diâmetro do tirante para o modelo 3

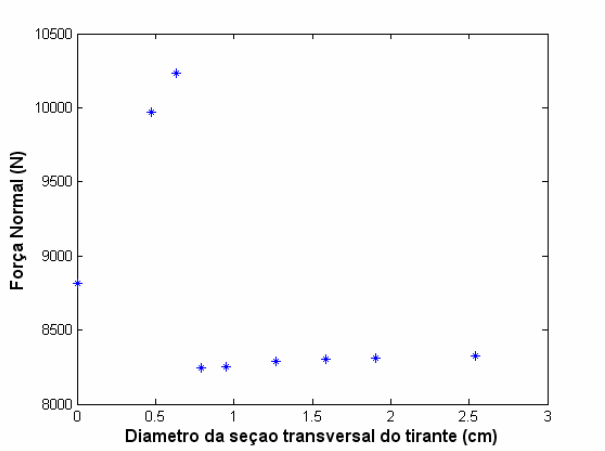



Figura 6.24 - Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 3

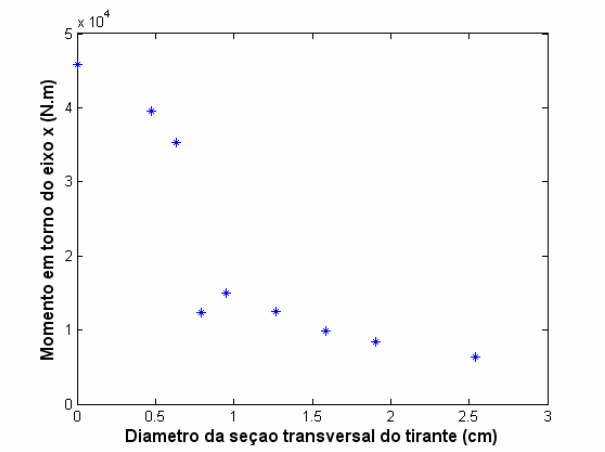



Figura 6.25 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo x ($M_x$) atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 3

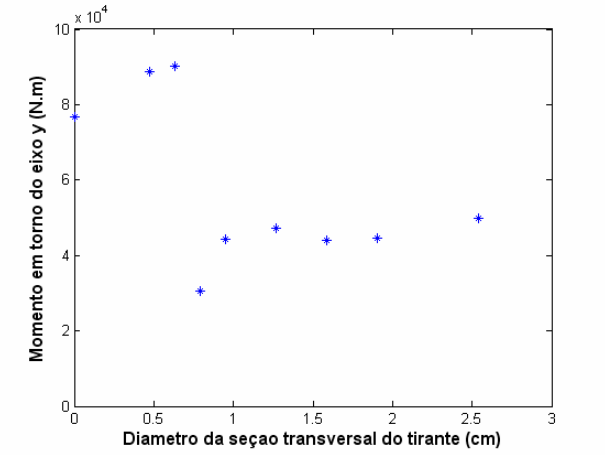



Figura 6.26 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo y ($M_y$) atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 3

Nota-se pela Fig. 6.23 que o uso de tirantes proporciona uma taxa de redução no consumo de tubos mais significativa para diâmetro dos tirantes de até 1,25cm (1/2”), a partir deste ponto a curva tende a se estabilizar. Pela Tabela 6.10 e pela Fig. 6.24 percebe-se que não havendo mudanças no número de pilares (estruturas otimizadas com tirantes de diâmetros iguais ou maiores que 5/16”), o esforço normal máximo tende a crescer com o aumento no diâmetro dos tirantes. Por outro lado, o momento máximo de flexão $M_x$, nos pilares de apoio diminuem com o aumento no diâmetro dos tirantes.

A seguir apresenta-se o estudo da influência das barras fazendo contorno da estrutura e do uso de tirantes simultaneamente no consumo de tubos e nos esforços máximos nos pilares de apoio. As Tabelas 6.11, 6.13 e 6.15 ilustram os resultados obtidos para os parâmetros otimizados dos modelos 1, 2 e 3, respectivamente. Para cada modelo foram analisados quatro casos. O caso 1 representa a estrutura de cobertura sem tirantes e sem barras de contorno. No caso 2, a estrutura de cobertura possui barras de contorno (barras ligando os nós de cumeeira e barras ligando os nós de contorno nas direções x e y), mas não possui tirantes. Para o caso 3, a estrutura não possui barras ligando os nós de contorno e de cumeeira, mas possui tirantes com diâmetro de ½” (1,27cm) ligando os pilares de apoio. Por fim, no caso 4, a estrutura possui barras ligando os nós de contorno e de cumeeira e tirantes com diâmetro de ½”. As Tabelas 6.12, 6.14 e 6.16 mostram os esforços máximos atuantes nos pilares para os modelos 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 6.11 – Resumo dos resultados obtidos para os parâmetros otimizados do modelo 1

| | **1** | **2** | **3** | **4** |
|---|---|---|---|---|
| Número de módulos na direção x | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Número de módulos na direção z | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Inclinação da cobertura (°) | 28 | 16 | 14 | 18 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.22 | 4.22 | 4.22 | 4.22 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| Comprimento da barra (cm) | 181 | 167 | 165 | 168 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 5.15 | 5.10 | 5.20 | 5.07 |
| Consumo de tubos (kg) | 432 | 537 | 393 | 542 |

Tabela 6.12 – Esforços máximos nos pilares de apoio do modelo 1

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| Força normal (N) | 4533 | 3208 | 5441 | 4009 |
| Momento fletor em torno do eixo x (N.m) | 16287 | 3044 | 4211 | 1891 |
| Momento fletor em torno do eixo y (N.m) | 20066 | 10342 | 20378 | 7468 |

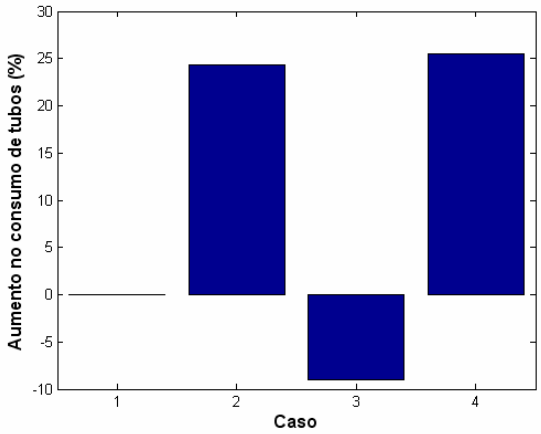



Figura 6.27 - Resultados obtidos para o aumento no consumo de aço do modelo 1

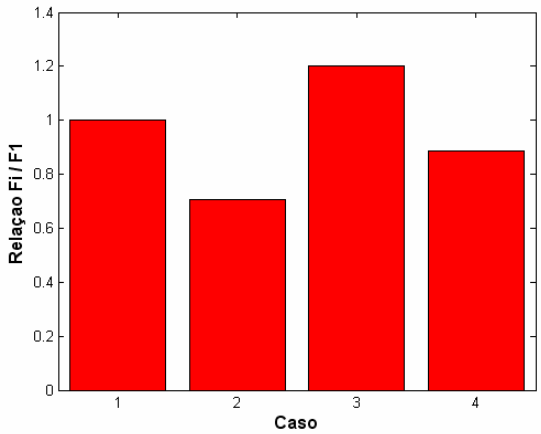



Figura 6.28 - Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1

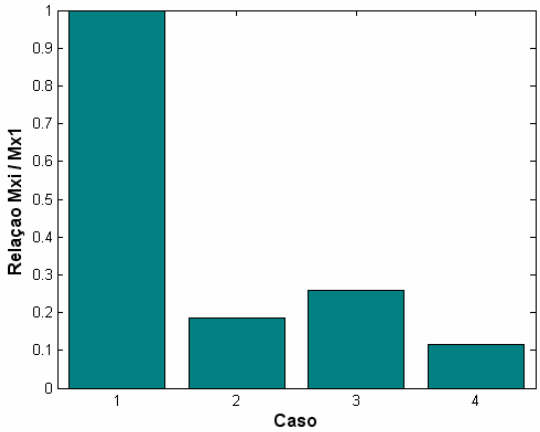



Figura 6.29 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo x atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1

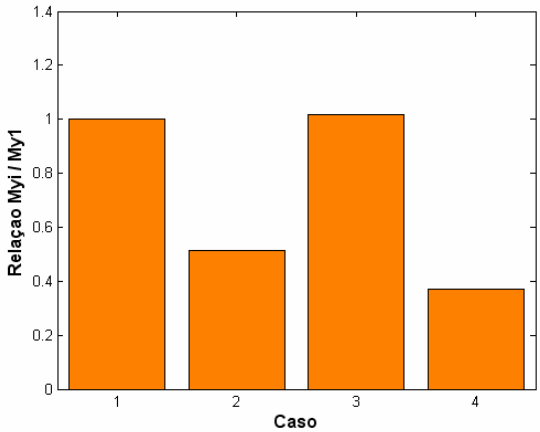



Figura 6.30 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo y atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1

Para comparar os esforços máximos atuantes nos pilares de apoio da estrutura de cobertura dos casos 1 à 4, dividiu-se os valores obtidos para os esforços nas Tabs. 6.12, 6.14 e 6.16 de cada caso pelos esforços do caso de referência (caso 1).

Percebe-se pela Fig. 6.27 que ilustra o consumo de tubos, que apenas para o caso 3 houve uma redução no consumo de tubos. As Figuras 6.28 à 6.30 ilustram os resultados obtidos para os esforços máximos, normal e flexão em torno dos eixos x e y, nos pilares de apoio, respectivamente. Nota-se que barras ligando os nós de contorno e de cumeeira da estrutura juntamente com o uso de tirantes ligando os pilares de apoio (caso 4) provoca uma redução significativa nos esforços de flexão máximos atuantes nos pilares de apoio. Em relação ao esforço normal máximo, verifica-se que o caso 4 teve um valor intermediário aos valores obtidos para os casos 2 e 3.

Tabela 6.13 – Resumo dos resultados obtidos para os parâmetros otimizados do modelo 2

| | **1** | **2** | **3** | **4** |
|---|---|---|---|---|
| Número de módulos na direção x | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Número de módulos na direção z | 9 | 8 | 8 | 8 |
| Inclinação da cobertura (°) | 22 | 13 | 10 | 10 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.83 | 4.83 | 4.83 | 4.83 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| Comprimento da barra (cm) | 185 | 182 | 180 | 180 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 4.63 | 5.21 | 5.41 | 5.26 |
| Consumo de tubos (kg) | 834 | 945 | 720 | 937 |

Tabela 6.14 – Esforços máximos nos pilares de apoio do modelo 2

| | **1** | **2** | **3** | **4** |
|---|---|---|---|---|
| Força normal (N) | 5549 | 3887 | 6275 | 5275 |
| Momento fletor em torno do eixo x (N.m) | 28166 | 7292 | 7568 | 5288 |
| Momento fletor em torno do eixo y (N.m) | 23178 | 17587 | 31716 | 16238 |

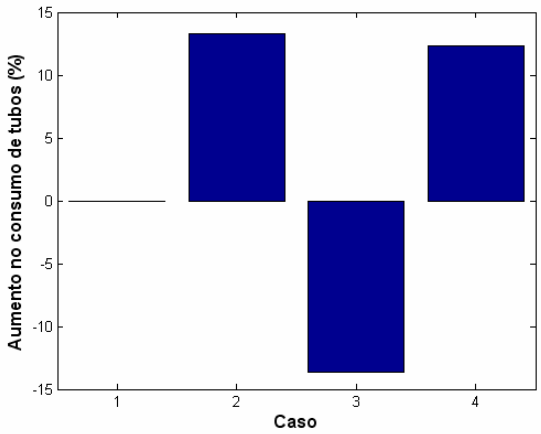



Figura 6.31 - Resultados obtidos para o aumento no consumo de aço do modelo 2

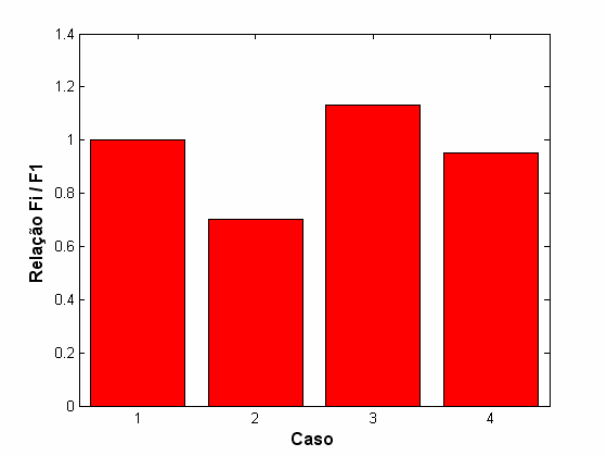



Figura 6.32 - Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 2

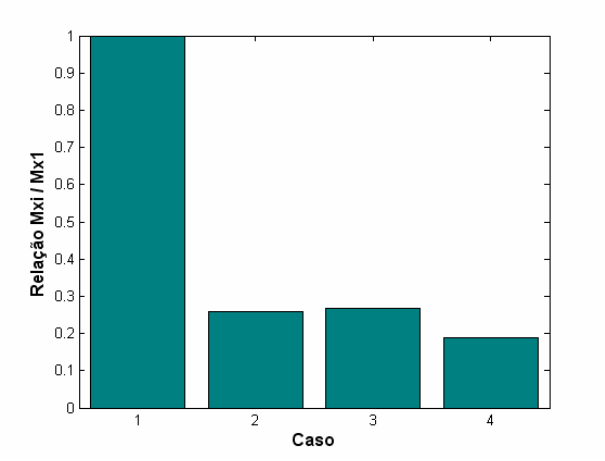



Figura 6.33 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo x atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 2

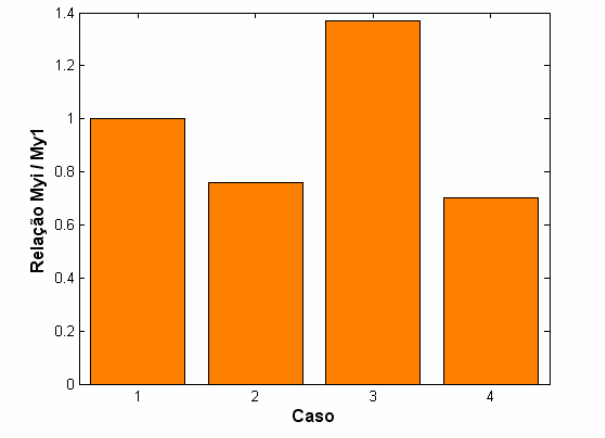



Figura 6.34 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo y atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 2

As Figuras 6.32 à 6.34 ilustram os resultados obtidos para os esforços máximos, normal e flexão em torno dos eixos x e y, nos pilares de apoio, respectivamente, para o modelo 2. Analogamente ao modelo 1, nota-se que o uso de barras no contorno e na cumeeira da estrutura juntamente com uso de tirantes (caso 4) provoca uma redução significativa nos esforços máximos de flexão atuantes nos pilares de apoio. O esforço normal máximo teve um valor intermediário em relação aos valores dos casos 2 e 3.

Tabela 6.15 – Resumo dos resultados obtidos para os parâmetros otimizados do modelo 3

| | **1** | **2** | **3** | **4** |
|---|---|---|---|---|
| Número de módulos na direção x | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Número de módulos na direção z | 11 | 13 | 13 | 13 |
| Inclinação da cobertura (°) | 19 | 14 | 11 | 10 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 7.30 | 6.03 | 6.03 | 6.03 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 |
| Comprimento da barra (cm) | 179 | 163 | 161 | 160 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 5.05 | 6.44 | 6.53 | 6.92 |
| Consumo de tubos (kg) | 2585 | 2746 | 2246 | 2711 |

Tabela 6.16 – Esforços máximos nos pilares de apoio do modelo 3

| | **1** | **2** | **3** | **4** |
|---|---|---|---|---|
| Força normal (N) | 8538 | 5125 | 8287 | 8149 |
| Momento fletor em torno do eixo x (N.m) | 45902 | 21316 | 12467 | 13302 |
| Momento fletor em torno do eixo y (N.m) | 73837 | 53777 | 47271 | 54860 |

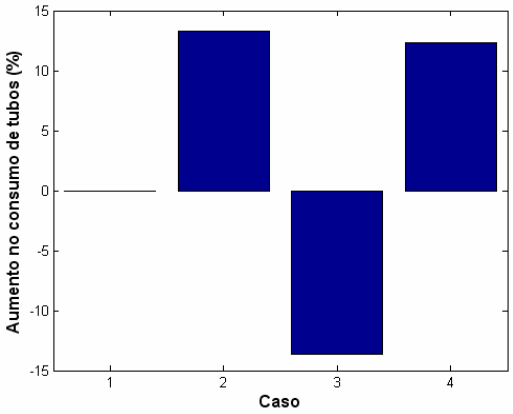



Figura 6.35 - Resultados obtidos para o aumento no consumo de aço do modelo 3

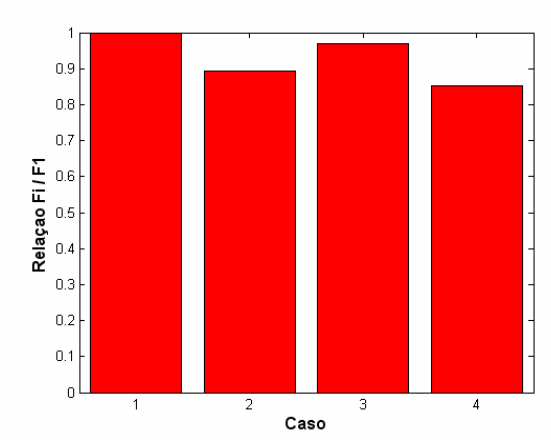



Figura 6.36 - Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 3

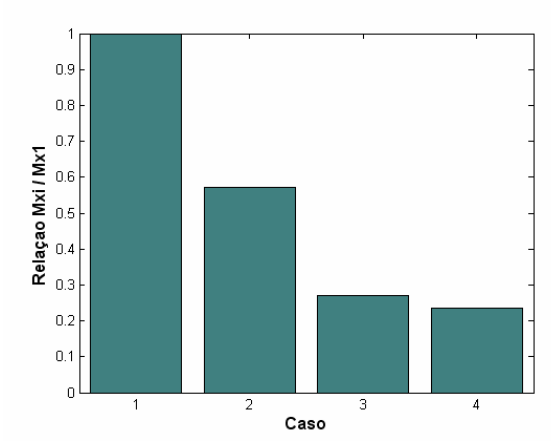



Figura 6.37 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo x atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 3

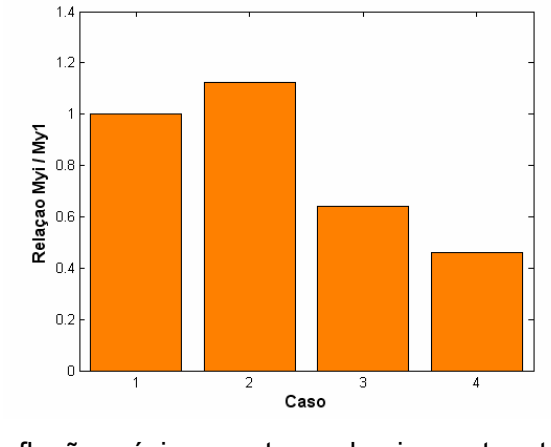



Figura 6.38 - Esforço de flexão máximo em torno do eixo y atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 3

Percebe-se pela Fig. 6.35 que para o caso 4 o consumo de tubos foi maior que para o caso padrão (caso 1), sendo um pouco inferior que o consumo obtido para o caso 2. O que é válido para os três modelos. As Figuras 6.36 à 6.38 ilustram os resultados obtidos para os esforços máximos, normal e flexão em torno dos eixos x e y, nos pilares de apoio, respectivamente. Nota-se que o caso 4 possui os menores valores de esforços máximos, normal e de flexão, atuantes nos pilares de apoio.

A partir destes resultados, conclui-se o uso de barras fazendo o contorno da estrutura de cobertura e ligando os nós de cumeeira, geralmente provoca um acréscimo no consumo de tubos. Mas, provoca também uma redução significativa nos esforços máximos atuantes nos pilares de apoio.

O uso de tirantes provoca uma redução no consumo de tubos e nos esforços máximos de flexão, entretanto, o esforço normal aumenta. A utilização dos tirantes juntamente com barras de contorno e ligando os nós de cumeeira não diminui o consumo de tubos da estrutura de cobertura em relação ao caso 1, mas provoca redução em praticamente todos os esforços máximos atuantes nos pilares de apoio, exceção pode ocorrer para o esforço normal máximo. A redução é mais significativa para os esforços de flexão. Dessa forma, o uso de tirantes na estrutura e/ou de barras ligando os nós de contorno e de cumeeira, implicará em seções transversais menores, ou seja, mais econômicas.

## 6.4 Avaliação da Influência do Ângulo de Inclinação da Cobertura no Comportamento Mecânico Global da Estrutura

Aqui são apresentados os resultados obtidos da análise da influência o ângulo de inclinação dos planos de cobertura no deslocamento máximo da estrutura, e por consequência, no consumo de aço para os modelos 1, 2 e 3 sem tirantes e com barras fazendo o contorno da estrutura e ligando os nós de cumeeira.

### *6.4.1 Modelo 1*

Os resultados obtidos para o deslocamento vertical máximo da estrutura e o consumo de aço em massa para o modelo 1 são apresentados na Tab. 6.17 e nas Figs. 6.39 e 6.40, respectivamente. Vale ressaltar, que para coletar estes resultados, o programa computacional OTR foi executado diversas vezes, adotando-se para o ângulo mínimo de

inclinação da cobertura o valor de 1°. A Tabela 6.18 mostra os parâmetros otimizados da estrutura de cobertura.

Tabela 6.17 - Resultados obtidos do deslocamento máximo da estrutura e do consumo de tubos do modelo 1

| Ângulo de inclinação | Deslocamento máximo da estrutura (cm) | Consumo de tubos (kg) | Ângulo de inclinação | Deslocamento máximo da estrutura (cm) | Consumo de tubos (kg) |
|---|---|---|---|---|---|
| **11°** | 5.25 | 528 | **18°** | 5.08 | 542 |
| **13°** | 5.17 | 531 | **19°** | 5.08 | 545 |
| **14°** | 5.14 | 533 | **20°** | 5.08 | 548 |
| **15°** | 5.12 | 535 | **22°** | 5.08 | 554 |
| **16°** | 5.10 | 537 | **25°** | 5.10 | 565 |
| **17°** | 5.09 | 540 | **28°** | 5.13 | 577 |

Tabela 6.18 - Parâmetros otimizados da estrutura de cobertura do modelo 1

| | |
|---|---|
| Número de módulos na direção x | 4 |
| Número de módulos na direção z | 6 |
| Ângulo de inclinação | 16° |
| Comprimento da barra (cm) | 167 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.22 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.25 |

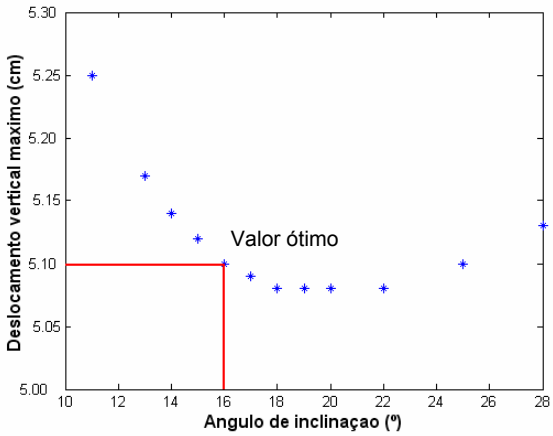



Figura 6.39 - Resultados obtidos para o deslocamento vertical máximo do modelo 1

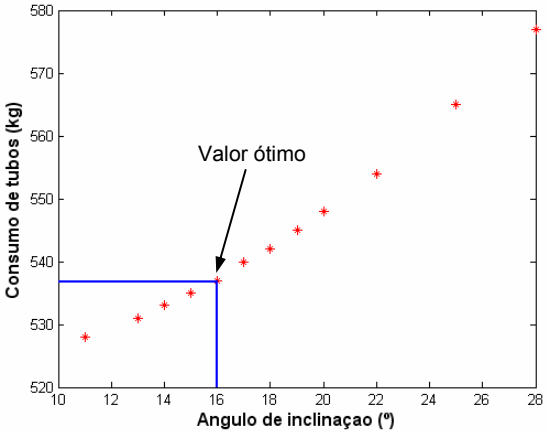



Figura 6.40 - Resultados obtidos para o consumo de tubos do modelo 1

Nota-se pelas Figs. 6.39 e 6.40 que o deslocamento vertical máximo da estrutura diminui com o aumento do ângulo de inclinação até atingir um valor mínimo, que neste caso foi de 5.08cm para o ângulo de inclinação no intervalo de 18° à 22º. A partir deste intervalo o deslocamento vertical máximo aumenta. Para este modelo o deslocamento máximo admitido pela NBR 8800 (ABNT, 1986) é de 5.55cm (L/180), portanto, todos os pontos do gráfico da Fig. 6.39 atendem este requisito da norma. Entretanto, o valor ótimo para este modelo ocorre para o ângulo de 16°, quando o consumo de tubos é o menor para os casos que atendem todos os critérios da norma, inclusive o dimensionamento a flexo-compressão a combinação de carregamento do estado limite último.

### ***6.4.2*** *Modelo 2*

Os resultados obtidos para o deslocamento vertical máximo e o consumo de tubos para o modelo 2 estão apresentados na Tab. 6.19 e nas Figs. 6.41 e 6.42, respectivamente, e os parâmetros geométricos otimizados estão dispostos na Tab. 6.20.

Nota-se pela Fig. 6.41 que ilustra o deslocamento vertical máximo da estrutura em função do ângulo de inclinação do plano de cobertura, que o menor deslocamento vertical máximo da estrutura ocorre para a inclinação da cobertura igual a 23°. Analisando juntamente as Figs. 6.41 e 6.42 observa-se que a estrutura com menor consumo de tubos e que atende o estado limite de utilização da NBR8800 (ABNT, 1986) possui ângulo de inclinação de 6°, cujo deslocamento vertical máximo é de 6.20cm (< 6.667cm). Entretanto, este caso não atende os critérios de dimensionamento à flexo-compressão e/ou flexo-tração do estado limite último. Portanto, a estrutura que atende aos dois estados limites, último e de utilização, tem ângulo de inclinação igual a 13°.

Tabela 6.19 - Resultados obtidos do deslocamento máximo da estrutura e do consumo de tubos do modelo 2

| Ângulo de inclinação | Deslocamento máximo da estrutura (cm) | Consumo de tubos (kg) | Ângulo de inclinação | Deslocamento máximo da estrutura (cm) | Consumo de tubos (kg) |
|---|---|---|---|---|---|
| **4°** | 7.71 | 927 | **15°** | 5.17 | 952 |
| **5°** | 6.75 | 928 | **17°** | 5.15 | 960 |
| **6°** | 6.20 | 929 | **20°** | 5.16 | 975 |
| **7°** | 5.86 | 931 | **22°** | 5.17 | 986 |
| **8°** | 5.64 | 932 | **24°** | 5.20 | 999 |
| **11°** | 5.31 | 939 | **27°** | 5.23 | 1013 |
| **13°** | 5.21 | 945 | **-** | - | - |

Tabela 6.20 - Parâmetros otimizados da estrutura de cobertura do modelo 2

| | |
|---|---|
| Número de módulos na direção x | 4 |
| Número de módulos na direção z | 8 |
| Ângulo de inclinação | 13° |
| Comprimento da barra (cm) | 182 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.83 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.28 |

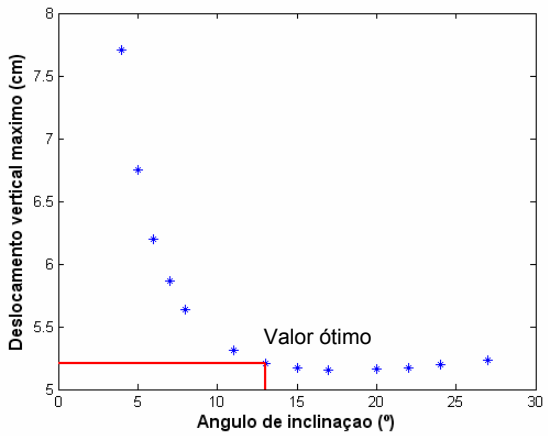



Figura 6.41 - Resultados obtidos para o deslocamento vertical máximo do modelo 2

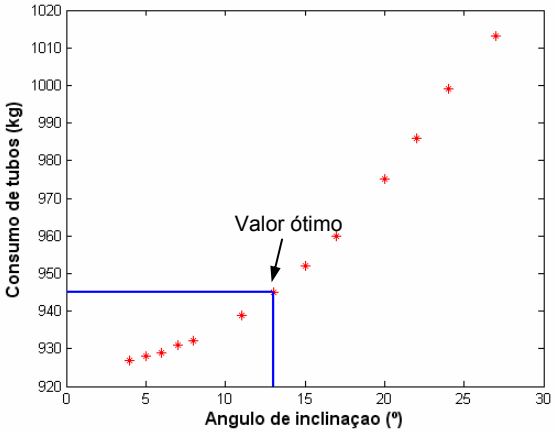



Figura 6.42 - Resultados obtidos para o consumo de tubos do modelo 2

### ***6.4.3*** *Modelo 3*

Os resultados obtidos para o modelo 3 são apresentados nas Tabs. 6.21 e 6.22, e em seguida, ilustrados nas Figs. 6.43 e 6.44. Novamente, o comportamento da função do deslocamento vertical máximo em função do ângulo de inclinação é semelhante ao obtido para os modelos 1 e 2. Verifica-se que a estrutura que atende todos os requisitos de dimensionamento da NBR8800 (ABNT, 1986) e apresenta um menor consumo de tubos tem ângulo de inclinação igual a 16°.

Tabela 6.21 - Resultados obtidos do deslocamento máximo da estrutura e do consumo de tubos do modelo 3

| Ângulo de inclinação | Deslocamento máximo da estrutura (cm) | Consumo de tubos (kg) | Ângulo de inclinação | Deslocamento máximo da estrutura (cm) | Consumo de tubos (kg) |
|---|---|---|---|---|---|
| **7°** | 7.96 | 2692 | **15°** | 6.38 | 2757 |
| **8°** | 7.48 | 2698 | **16°** | 6.33 | 2769 |
| **9°** | 7.15 | 2704 | **18°** | 6.28 | 2795 |
| **10°** | 6.92 | 2711 | **21°** | 6.24 | 2841 |
| **12°** | 6.61 | 2727 | **24°** | 6.25 | 2896 |
| **14°** | 6.44 | 2746 | **27°** | 6.29 | 2961 |

Tabela 6.22 - Parâmetros otimizados da estrutura de cobertura do modelo 3

| | |
|---|---|
| Número de módulos na direção x | 6 |
| Número de módulos na direção z | 13 |
| Ângulo de inclinação | 16º |
| Comprimento da barra (cm) | 160 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 6.03 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.32 |

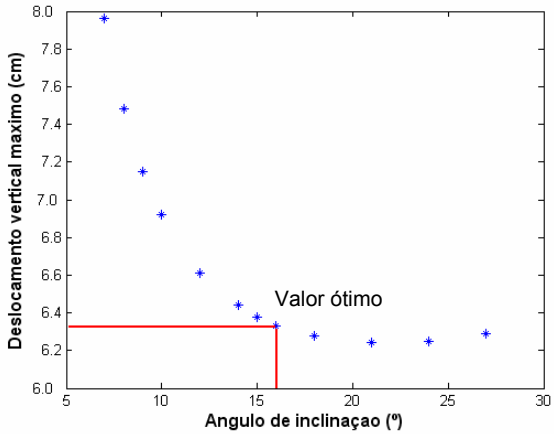



Figura 6.43 - Resultados obtidos para o deslocamento vertical máximo do modelo 3

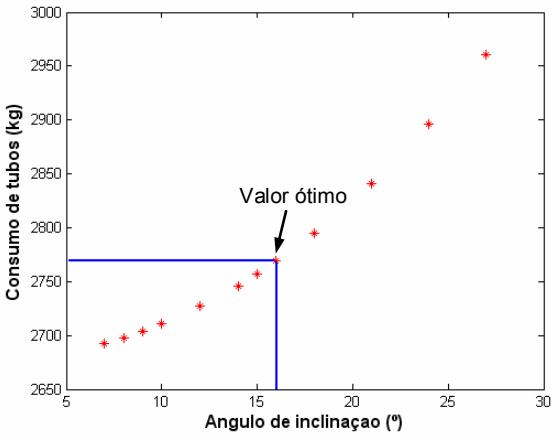



Figura 6.44 - Resultados obtidos para o consumo de tubos do modelo 3

Através dos resultados obtidos para os modelos 1, 2 e 3, conclui-se para os casos analisados, que a estrutura com menor consumo de tubos e que atende todos os requisitos de dimensionamento da norma NBR8800 (ABNT, 1986) não necessariamente possui o menor deslocamento vertical máximo. Pelo contrário, normalmente a estrutura otimizada

possui deslocamento vertical máximo maior que o menor valor encontrado, entretanto, atende todos os requisitos da norma e possui ângulo inclinação menor, consequentemente, tem um menor consumo de tubos.

## 6.5 Avaliação da viabilidade da estrutura em função dos comprimentos de vãos

### *6.5.1 Introdução*

Uma estrutura tridimensional pode ter o seu comportamento mecânico fortemente influenciado pela relação comprimento/largura, como acontece, por exemplo, em placas estruturais. De acordo com estudo feito por Ferreira e Calil Jr (2000) para estruturas reticuladas de eixo curvo formadas por barras de madeira, os esforços nas barras e os deslocamentos dos nós aumentam significativamente com o aumento do comprimento da estrutura. Buscar-se-á, através dos resultados que serão apresentados a seguir informações importantes sobre o consumo de tubos em função da relação comprimento/largura da área coberta. Lembrar que comprimento refere-se à dimensão na direção da cumeeira.

### *6.5.2 Caso 1 - Largura fixa*

Para realizar este estudo foram otimizadas diversas estruturas divididas em três modelos:

- Modelo 1: Largura (vão = 10m);
- Modelo 2: Largura (vão = 15m);
- Modelo 3: Largura (vão = 20m);

Não foram adotados tirantes para as estruturas. As Tabelas 6.23 à 6.25 apresentam o resumo dos resultados obtidos para a otimização de diversas estruturas com diferentes valores para o comprimento da área coberta, para os modelos 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 6.23 - Resultados obtidos para a otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas em função do comprimento da área coberta - Modelo 1 (largura=10m)

| | Comprimento (m) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 25 | 30 | 35 |
| Número de módulos na direção x | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 |
| Número de módulos na direção z | 5 | 6 | 6 | 9 | 8 | 10 | 12 | 12 | 17 |
| Inclinação da cobertura (°) | 11 | 16 | 12 | 19 | 18 | 14 | 25 | 22 | 23 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.22 | 4.22 | 4.83 | 4.22 | 4.83 | 4.83 | 4.83 | 6.03 | 4.83 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.25 | 0.25 | 0.28 | 0.25 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.32 | 0.32 |
| Comprimento da barra (cm) | 163 | 167 | 175 | 162 | 177 | 165 | 180 | 191 | 144 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 5.00 | 5.10 | 4.24 | 4.29 | 3.88 | 3.41 | 3.48 | 2.39 | 3.99 |
| Consumo de tubos (kg) | 448 | 537 | 721 | 751 | 943 | 1079 | 1383 | 2140 | 2527 |

Tabela 6.24 - Resultados obtidos para a otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas em função do comprimento da área coberta - Modelo 2 (largura = 15m)

| | Comprimento do vão (m) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 15 | 16 | 18 | 20 | 25 | 30 | 35 |
| Número de módulos na direção x | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Número de módulos na direção z | 7 | 8 | 8 | 11 | 10 | 14 | 15 |
| Inclinação da cobertura (°) | 8 | 7 | 13 | 8 | 10 | 11 | 16 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 6.03 | 6.03 | 6.03 | 6.03 | 7.30 | 7.30 | 7.30 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 |
| Comprimento da barra (cm) | 166 | 161 | 173 | 156 | 180 | 168 | 178 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 7.60 | 7.14 | 7.97 | 6.30 | 6.05 | 4.99 | 5.20 |
| Consumo de tubos (kg) | 1589 | 1738 | 1864 | 2251 | 2939 | 3749 | 4256 |

Tabela 6.25 - Resultados obtidos para a otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas em função do comprimento da área coberta - Modelo 3 (largura = 20m)

| | Comprimento do vão (m) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 35 |
| Número de módulos na direção x | 8 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Número de módulos na direção z | 11 | 11 | 11 | 13 | 10 | 11 | 14 |
| Inclinação da cobertura (°) | 6 | 8 | 23 | 8 | 9 | 9 | 11 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 7.30 | 7.30 | 7.30 | 7.30 | 8.89 | 8.89 | 8.89 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.32 | 0.38 | 0.38 | 0.38 | 0.38 | 0.38 | 0.38 |
| Comprimento da barra (cm) | 155 | 196 | 180 | 162 | 190 | 187 | 180 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 10.7 | 8.91 | 10.9 | 10.4 | 10.6 | 9.94 | 8.27 |
| Consumo de tubos (kg) | 3547 | 4060 | 4874 | 5141 | 5861 | 6318 | 7620 |

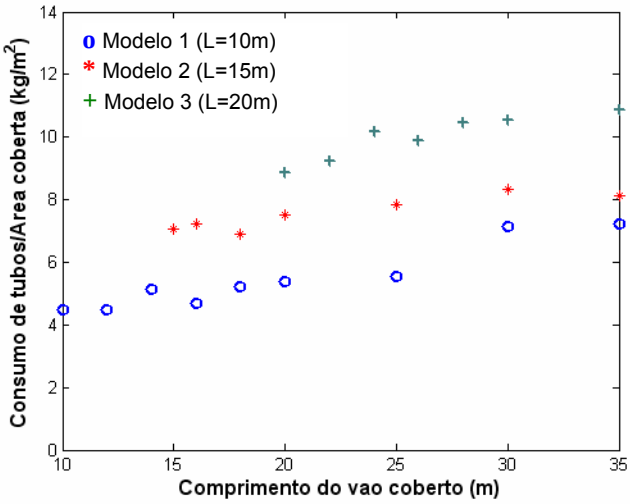



Figura 6.45 - Avaliação da viabilidade da estrutura em função do comprimento da área coberta para diferentes larguras

Observa-se pela Fig. 6.45 e pelas Tabs. 6.23 e 6.25 que o consumo de tubos por metro quadrado depende da largura da área coberta. Sendo que para larguras maiores o consumo de tubos é maior. Além disto, o consumo de tubos por metro quadrado varia de maneira aproximadamente linear com o comprimento da área coberta.

### ***6.5.3*** *Caso 2 - Comprimento fixo*

Em seguida, passou-se a avaliar a influência da largura no consumo de tubos. Para isto foram otimizados modelos com diferentes valores para o comprimento do vão:

- Modelo 1: Comprimento (vão = 15m);
- Modelo 2: Comprimento (vão = 20m);
- Modelo 3: Comprimento (vão = 30m);

A largura do vão foi variada como mostram as Tabs. 6.26 à 6.28. Não foram adotados tirantes para as estruturas.

Tabela 6.26 - Resultados obtidos para a otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas em função da largura da área coberta - Modelo 1.

| | Largura da área coberta (m) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| Número de módulos na direção x | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 |
| Número de módulos na direção z | 8 | 9 | 8 | 9 | 9 | 7 |
| Inclinação da cobertura (°) | 22 | 21 | 13 | 12 | 14 | 8 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.22 | 4.22 | 4.83 | 4.83 | 4.83 | 6.03 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.25 | 0.25 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.32 |
| Comprimento da barra (cm) | 169 | 172 | 182 | 187 | 200 | 166 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 4.63 | 5.37 | 5.21 | 5.87 | 6.83 | 7.60 |
| Consumo de tubos (kg) | 700 | 785 | 945 | 1066 | 1280 | 1589 |

Tabela 6.27 - Resultados obtidos para a otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas em função da largura da área coberta - Modelo 2

| | Largura da área coberta (m) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| Número de módulos na direção x | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Número de módulos na direção z | 10 | 8 | 9 | 10 | 9 | 11 |
| Inclinação da cobertura (°) | 14 | 11 | 11 | 14 | 9 | 8 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.83 | 6.03 | 6.03 | 6.03 | 7.30 | 7.30 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.28 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 |
| Comprimento da barra (cm) | 165 | 199 | 164 | 172 | 189 | 192 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 3.41 | 4.13 | 6.61 | 8.19 | 8.35 | 9.00 |
| Consumo de tubos (kg) | 1079 | 1519 | 1985 | 2263 | 2766 | 3324 |

Tabela 6.28 - Resultados obtidos para a otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas em função da largura do vão - Modelo 3

| | Largura da área coberta (m) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 |
| Número de módulos na direção x | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 10 | 10 |
| Número de módulos na direção z | 12 | 13 | 11 | 14 | 14 | 11 | 13 | 14 | 14 | 14 | 13 |
| Inclinação da cobertura (°) | 22 | 11 | 17 | 11 | 11 | 9 | 7 | 8 | 6 | 8 | 8 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 6.03 | 7.30 | 7.30 | 7.30 | 7.30 | 8.89 | 8.89 | 8.89 | 10.2 | 10.2 | 10.2 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.38 | 0.38 | 0.38 | 0.38 | 0.38 | 0.38 | 0.48 |
| Comprimento da barra (cm) | 191 | 193 | 188 | 174 | 188 | 187 | 181 | 186 | 196 | 178 | 191 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 2.39 | 3.41 | 5.27 | 5.91 | 7.14 | 9.94 | 10.6 | 11.7 | 11.3 | 14.3 | 16.3 |
| Consumo de tubos (kg) | 2140 | 2825 | 3369 | 3880 | 4925 | 6318 | 7093 | 7779 | 9365 | 10509 | 13045 |

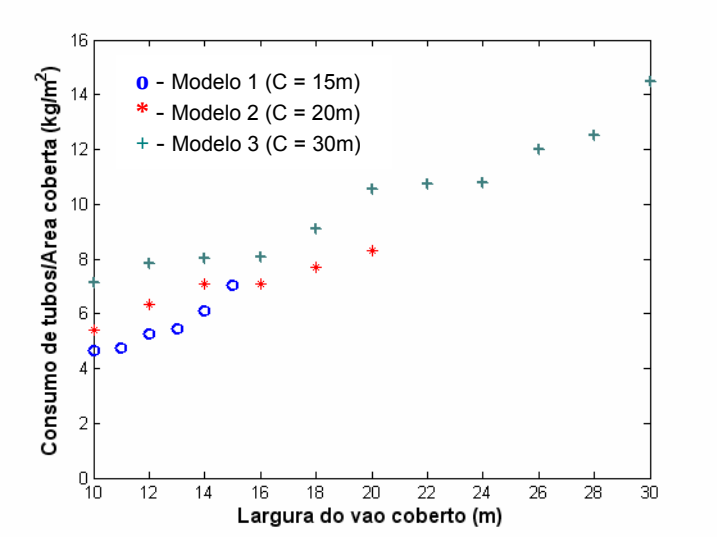



Figura 6.46 - Avaliação da viabilidade da estrutura em função da largura da área coberta

A Figura 6.46 ilustra o consumo de tubos por metro quadrado de área coberta em função da largura da área coberta para os modelos 1, 2 e 3. Novamente, percebe-se que o consumo de tubos por metro quadrado de área coberta depende tanto da largura quanto do comprimento do vão coberto. E que em ambos os casos o consumo é crescente.

## 6.6 Avaliação da relação comprimento/largura no comportamento mecânico da estrutura de cobertura com barras cruzadas

Por fim, deve-se analisar a influência da relação comprimento/largura no consumo de tubos da estrutura de cobertura com barras cruzadas. Para tanto, foram realizadas 5 avaliações. No primeiro caso, a relação é igual a 1.0, e foram otimizadas estruturas com a largura do vão variando de 10 a 30m como mostra a Tab. 6.29. Nesta tabela também são apresentados os resultados obtidos na otimização. De maneira análoga, as Tabs. 6.30 a 6.33 apresentam os resultados obtidos na otimização de estruturas espaciais com barras cruzadas com relação comprimento/largura iguais a 1.2, 1.4, 1.6 e 1.8, respectivamente.

Tabela 6.29 - Resultados obtidos na otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas com relação comprimento/largura igual a 1.0

| | Largura do vão (m) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 25 |
| Número de módulos na direção x | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 8 | 8 |
| Número de módulos na direção z | 5 | 6 | 6 | 8 | 8 | 9 | 12 |
| Inclinação da cobertura (°) | 11 | 11 | 8 | 9 | 8 | 11 | 6 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.22 | 4.83 | 6.03 | 6.03 | 7.30 | 7.30 | 8.89 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.25 | 0.28 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.38 | 0.38 |
| Comprimento da barra (cm) | 163 | 184 | 167 | 169 | 189 | 170 | 188 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 5.00 | 5.69 | 6.79 | 8.28 | 8.45 | 11.0 | 13.3 |
| Consumo de tubos (kg) | 448 | 741 | 1390 | 1812 | 2487 | 3844 | 6803 |

Tabela 6.30 - Resultados obtidos na otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas com relação comprimento/largura igual a 1.2

| | Largura do vão (m) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 25 |
| Número de módulos na direção x | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 8 | 10 |
| Número de módulos na direção z | 6 | 7 | 7 | 7 | 10 | 11 | 12 |
| Inclinação da cobertura (°) | 16 | 17 | 12 | 13 | 12 | 23 | 7 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.22 | 4.83 | 6.03 | 7.30 | 7.30 | 7.30 | 10.20 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.25 | 0.28 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.38 | 0.38 |
| Comprimento da barra (cm) | 167 | 190 | 171 | 196 | 189 | 180 | 178 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 5.10 | 5.89 | 7.20 | 7.69 | 7.73 | 10.9 | 13.4 |
| Consumo de tubos (kg) | 537 | 880 | 1642 | 2303 | 3042 | 4874 | 9147 |

Tabela 6.31 - Resultados obtidos na otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas com relação comprimento/largura igual a 1.4

| | Largura do vão (m) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 25 |
| Número de módulos na direção x | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 8 | 8 |
| Número de módulos na direção z | 6 | 9 | 9 | 9 | 11 | 10 | 15 |
| Inclinação da cobertura (°) | 12 | 16 | 10 | 10 | 10 | 9 | 8 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.83 | 4.83 | 6.03 | 7.30 | 7.30 | 8.89 | 10.2 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.28 | 0.28 | 0.32 | 0.32 | 0.38 | 0.38 | 0.38 |
| Comprimento da barra (cm) | 175 | 183 | 162 | 185 | 192 | 190 | 197 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 4.24 | 5.18 | 6.49 | 7.04 | 7.61 | 10.2 | 10.7 |
| Consumo de tubos (kg) | 721 | 1064 | 1959 | 2738 | 4018 | 5861 | 10115 |

Tabela 6.32 - Resultados obtidos na otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas com relação comprimento/largura igual a 1.6

| | Largura do vão (m) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 25 |
| Número de módulos na direção x | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 8 | 10 |
| Número de módulos na direção z | 9 | 8 | 10 | 11 | 13 | 12 | 17 |
| Inclinação da cobertura (°) | 19 | 9 | 16 | 11 | 12 | 11 | 12 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.22 | 6.03 | 6.03 | 7.30 | 7.30 | 8.89 | 8.89 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.25 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.38 | 0.38 | 0.47 |
| Comprimento da barra (cm) | 162 | 195 | 168 | 180 | 191 | 186 | 176 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 4.29 | 34.09 | 6.41 | 6.28 | 7.24 | 9.15 | 13.8 |
| Consumo de tubos (kg) | 751 | 1482 | 2240 | 3208 | 4667 | 6814 | 13535 |

Tabela 6.33 - Resultados obtidos na otimização de estruturas de cobertura com barras cruzadas com relação comprimento/largura igual a 1.8

| | Largura do vão (m) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 25 |
| Número de módulos na direção x | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 8 | 10 |
| Número de módulos na direção z | 8 | 9 | 12 | 12 | 15 | 14 | 19 |
| Inclinação da cobertura (°) | 18 | 11 | 17 | 17 | 13 | 12 | 14 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.83 | 6,03 | 6.03 | 7.30 | 7.30 | 8.89 | 8.89 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.28 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.38 | 0.38 | 0.47 |
| Comprimento da barra (cm) | 177 | 196 | 1645 | 188 | 190 | 183 | 178 |
| Deslocamento vertical máximo (cm) | 3.88 | 4.02 | 5.80 | 6.24 | 97.06 | 8.51 | 13.8 |
| Consumo de tubos (kg) | 943 | 1662 | 2588 | 3617 | 5311 | 7762 | 15229 |

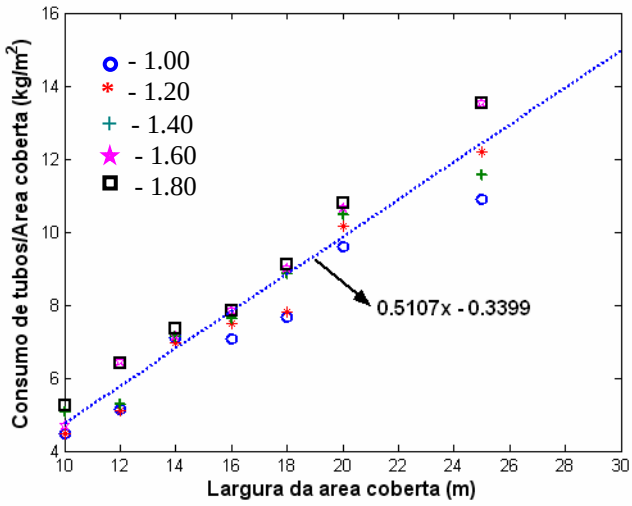



Figura 6.47 - Resultados obtidos para o consumo de tubos de estruturas de cobertura com barras cruzadas com diferentes valores para a relação comprimento/largura da área coberta

Conclui-se pela Fig. 6.47 que o consumo de tubos por metro quadrado para estruturas de cobertura com barras cruzadas aumenta com a largura da área coberta independentemente da relação comprimento/largura. Além disto, percebe-se que este

aumento tem comportamento tendendo a linear para o domínio analisado e, que pode ser representado com boa aproximação pela Eq. (6.1) obtida por regressão linear.

$$C = 0.5107x - 0.3399 \tag{6.1}$$

Na Equação 6.1, a variável $x$ representa a largura da área coberta. É importante ressaltar que a Eq. 6.1 é válida apenas como aproximação para o domínio dos casos analisados.

## 6.7 Análise da influência do número de pilares no comportamento mecânico global de estruturas de cobertura com barras cruzadas

O uso de pilares de forma repetida, até então considerados em todos os nós da periferia ao longo do comprimento, foi uma preocupação, pois isto pode afetar o custo da estrutura. Assim, foi também analisada a variação intercalada de pilares.

Para analisar a influência do número de apoios no comportamento global da estrutura utilizou-se o programa computacional Gestrut para estruturas reticuladas. É o mesmo usado internamente no programa computacional OTR para gerar a malha estrutural e calcular os esforços e deslocamentos da estrutura. A inserção ou a retirada de apoios foi simulada de forma simples, apenas mudando as condições de contorno dos nós da base dos pilares. Quando a extremidade de base do pilar é livre (sem vínculos) este funciona como se não existisse. Este procedimento facilita as análises realizadas pois não há alteração na numeração dos nós e das barras. Para esta análise foram estudados dois modelos com as seguintes dimensões:

- Modelo 1: 12 x 15m;
- Modelo 2: 10 x 12m;

### *6.7.1 Modelo 1*

A análise da influência dos pilares no comportamento mecânico da estrutura da estrutura de cobertura com barras cruzadas, modelos 1 e 2 foi feita para quatro condições de contorno. A primeira é a condição normal de otimização e está ilustrada na Fig. 6.48, onde são apresentadas a distribuição de barras, os apoios da estrutura e a numeração dos

nós. Nela são destacados os nós com deslocamento vertical máximo para cada condição de contorno. Na segunda condição, foram retirados 8 apoios dos nós laterais (direção z), 4 de cada lado da estrutura, são eles, os apoios dos nós 12, 18, 34, 40, 56, 62, 78 e 84. Na terceira condição foram retirados os apoios dos nós na direção x: 3, 5, 91, e 93. Por fim, na quarta condição foram retirados os apoios dos nós 4 e 92 a partir da 3ª condição. A Tabela 6.34 apresenta os valores das variáveis para a estrutura do modelo 1 otimizada. Novamente, vale ressaltar que retirando os apoios dos pilares, os mesmos ficam suspensos sem nenhuma função estrutural.

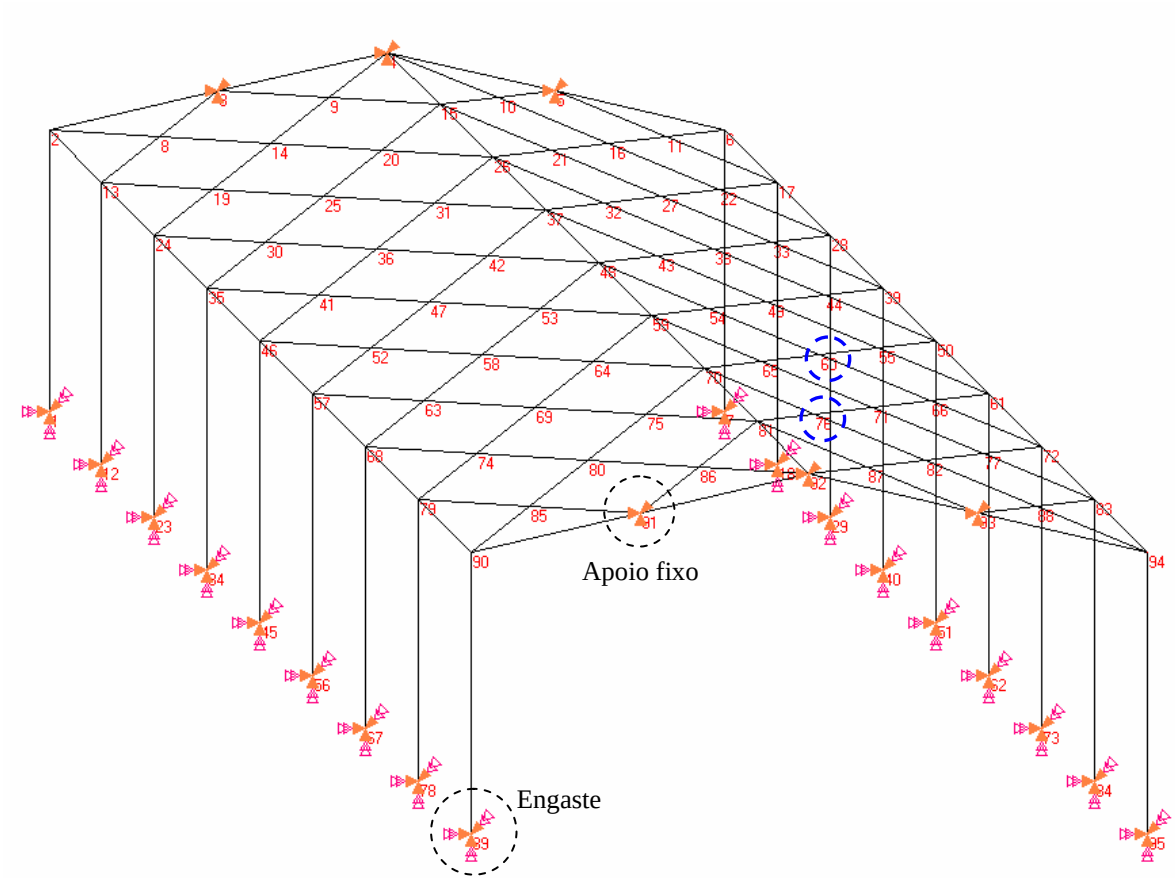



Figura 6.48 - Vista geral da estrutura do modelo 1 com numeração dos nós

As forças devidas ao carregamento foram consideradas concentradas em cada nó da estrutura por área de influência. Seus valores são devidos o peso próprio da estrutura, a sobrecarga e a ação de vento. Seu cálculo foi gerado a partir dos valores da Tab. 6.2, considerando a incidência de vento a 90°. As Tabelas 6.35 e 6.36 mostram os deslocamentos máximos na direção y e, os esforços máximos, normal e de flexão na direção x, respectivamente, para o modelo 1.

Tabela 6.34 - Resumo dos parâmetros otimizados do modelo 1

| | |
|---|---|
| Número de módulos na direção x | 4 |
| Número de módulos na direção z | 8 |
| Inclinação da cobertura (°) | 13 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.83 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.28 |
| Comprimento da barra (cm) | 182 |
| Consumo de tubos (kg) | 945 |

Tabela 6.35 - Deslocamentos verticais máximos para o modelo 1

| | Nó | Deslocamento vertical (cm) | Aumento (%) |
|---|---|---|---|
| 1ª condição | 60 | 10.38 | **-** |
| 2ª condição | 60 | 12.73 | **+ 22.6** |
| 3ª condição | 60 | 10.52 | **+ 1.4** |
| 4ª condição | 76 | 14.54 | **+ 40.1** |

Tabela 6.36 - Esforços máximos atuantes nas barras que compõem os planos de cobertura do modelo 1

| | Barra | Esforço normal (N) | Aumento (%) | Barra | Momento fletor $M_x$ (N.m) | Aumento (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1ª condição | 136 | 24804 | **-** | 123 | 1406 | |
| 2ª condição | 136 | 28401 | **+ 14.5** | 121 | 2155 | **+ 53.3** |
| 3ª condição | 142 | 32061 | **+ 29.3** | 123 | 1426 | **+ 1.1** |
| 4ª condição | 135 | 14633 | **- 41.0** | 123 | 1727 | **+ 22.8** |

Tabela 6.37 – Esforços máximos nos pilares de apoio do modelo 1

| | Barra | Esforço normal (N) | Aumento (%) | Barra | Momento fletor $M_x$ (N.m) | Aumento (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1ª condição | 174 | 3887 | **-** | 174 | 7292 | **-** |
| 2ª condição | 174 | 7192 | **+ 85.0** | 174 | 8442 | **+ 15.8** |
| 3ª condição | 175 | 4030 | **+ 3.7** | 174 | 9622 | **+ 32.0** |
| 4ª condição | 175 | 6145 | **+ 58.1** | 169 | 50587 | **+ 693.7** |

A Tabela 6.35 mostra que a retirada de apoios na estrutura a partir do modelo de referência (modelo 1) provoca aumento no deslocamento máximo na direção y, sendo que a quarta condição teve o maior aumento (40.1%). Além disto, percebe-se na Tabela 6.36 que para esta condição também ocorre um aumento significativo no momento fletor na direção x (22.8%) e uma redução no esforço normal máximo atuante nas barras de cobertura (-41.0%). Entretanto, é a segunda condição que apresenta o maior aumento no esforço máximo de flexão $M_x$ Para todas as condições o aumento dos esforços máximos nos pilares de apoio da estrutura de cobertura são significativos, entretanto, para a quarta condição o aumento no esforço de flexão $M_x$ foi muito significativo (693.7%). Em especial, para este caso o uso de tirantes é de grande importância para um melhor desempenho mecânico global da estrutura. A Figura 6.49 apresenta a vista geral da estrutura sem apoios e com numeração de barras. Também são destacadas as barras com maior esforço para cada condição.

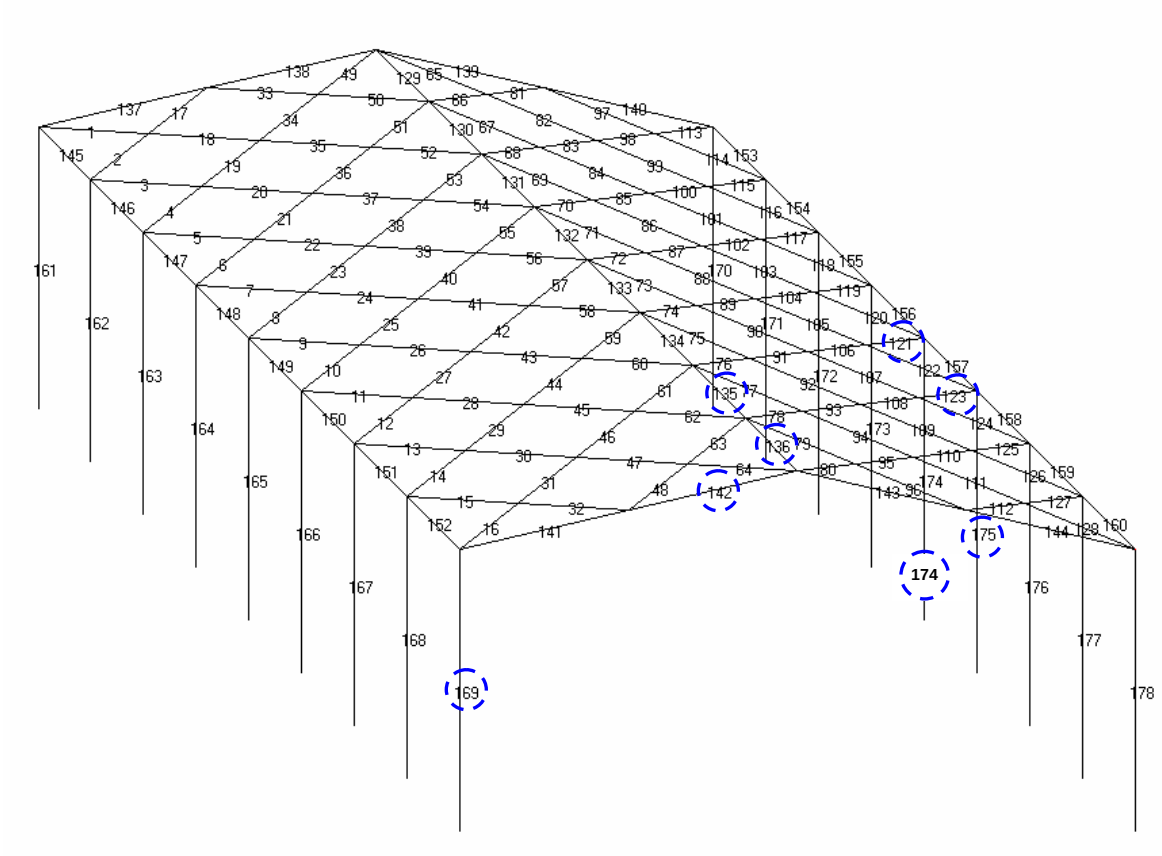



Figura 6.49 – Vista geral da estrutura do modelo 1 com barras numeradas

### ***6.7.2*** *Modelo 2*

Novamente, foram estudadas as quatro condições de contorno: a primeira é a condição normal de otimização e está ilustrada na Fig. 6.50. Nela são apresentadas a distribuição de barras e os apoios da estrutura. Destaca-se também os nós com maior deslocamento vertical máximo para cada condição. Na segunda condição, foram retirados 8 apoios dos nós laterais (direção z), 4 de cada lado da estrutura, são eles, os apoios nos nós 12, 18, 23, 29, 34, 40, 45 e 51. Na terceira condição foram retirados os apoios dos nós na direção x: 3, 5, 58 e 60. Por fim, na quarta condição foram retirados os apoios nos nós 5 e 59 a partir da terceira condição.

Tabela 6.38 - Resumo dos parâmetros otimizados do modelo 2

| | |
|---|---|
| Número de módulos na direção x | 4 |
| Número de módulos na direção z | 6 |
| Inclinação da cobertura (°) | 16 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.22 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.25 |
| Comprimento da barra (cm) | 167 |
| Consumo de tubos (kg) | 537 |

O carregamento foi elaborado como no modelo 1. As Tabelas 6.39 e 6.40 mostram os deslocamentos máximo na direção y e, os esforços normal e de flexão na direção x máximos, respectivamente, para o modelo 2.

Tabela 6.39 - Deslocamentos máximos para o modelo 2

| | Nó | Deslocamento vertical (cm) | Aumento (%) |
|---|---|---|---|
| 1ª condição | 38 | 9.60 | **-** |
| 2ª condição | 55 | 18.21 | **+ 89.7** |
| 3ª condição | 49 | 9.52 | **- 1.00** |
| 4ª condição | 49 | 12.08 | **+ 25.8** |

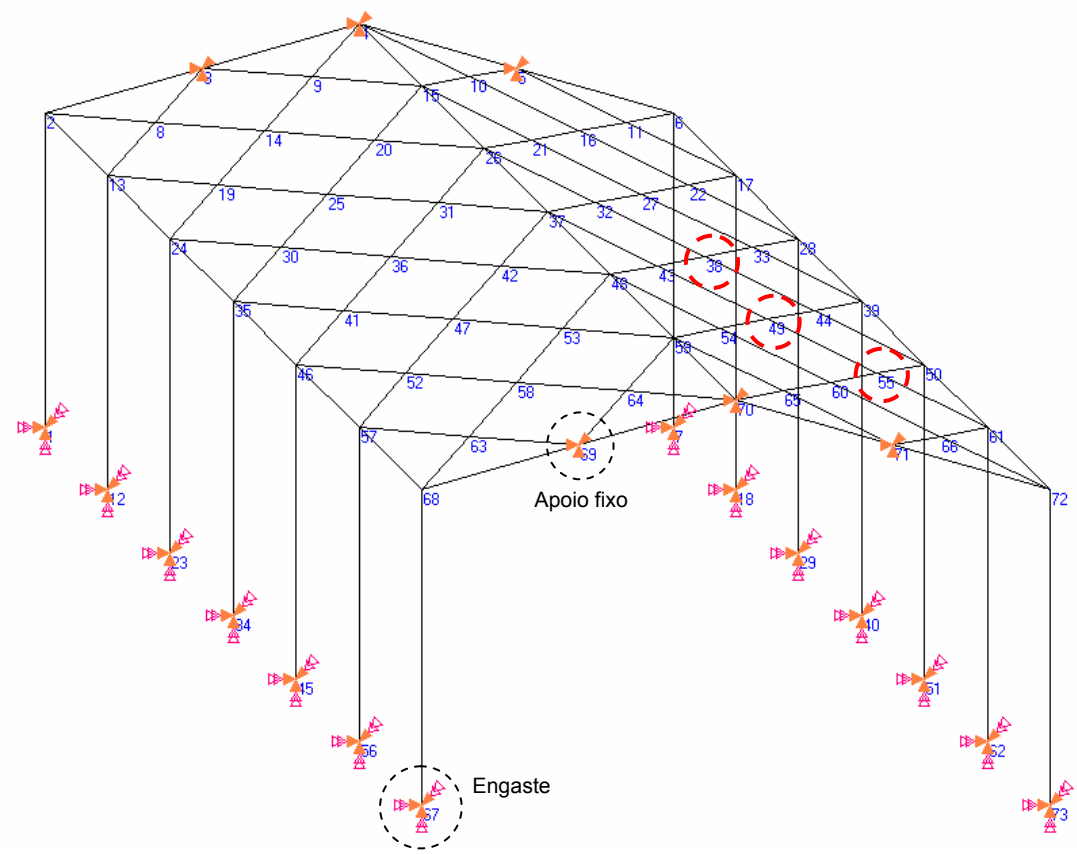



Figura 6.50 - Ilustração da distribuição de barras da estrutura com numeração dos nós

Tabela 6.40 - Esforços máximos atuantes nas barras que compõem os planos de cobertura do modelo 2

| | Barra | Esforço normal (N) | Aumento (%) | Barra | Momento fletor $M_x$ (N.m) | Aumento (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1ª condição | 120 | 11443 | - | 91 | 1005 | - |
| 2ª condição | 120 | 15832 | **+ 38.4** | 91 | 2159 | **+ 114.8** |
| 3ª condição | 109 | 16558 | **+ 44.7** | 55/91 | 1006 | **+ 0.0** |
| 4ª condição | 100 | 11802 | **+ 3.1** | 91 | 1142 | **+ 13.6** |

A Figura 6.51 ilustra a distribuição de barras da estrutura e sua respectiva numeração. Os resultados obtidos no segundo modelo novamente mostram a importância dos pilares de apoio para o comportamento mecânico global da estrutura. Para este modelo, a segunda condição apresentou o maior aumento no deslocamento vertical máximo da estrutura (89.7%). Além disso, os aumentos nos esforços máximos que compõem a estrutura de cobertura também são bastante significativos como mostra a Tab. 6.40. Assim como no

modelo 1, a quarta condição apresentou grandes aumentos nos esforços máximos nos pilares de apoio da estrutura de cobertura, chegando a 519.6% de aumento no esforço máximo de flexão $M_x$.

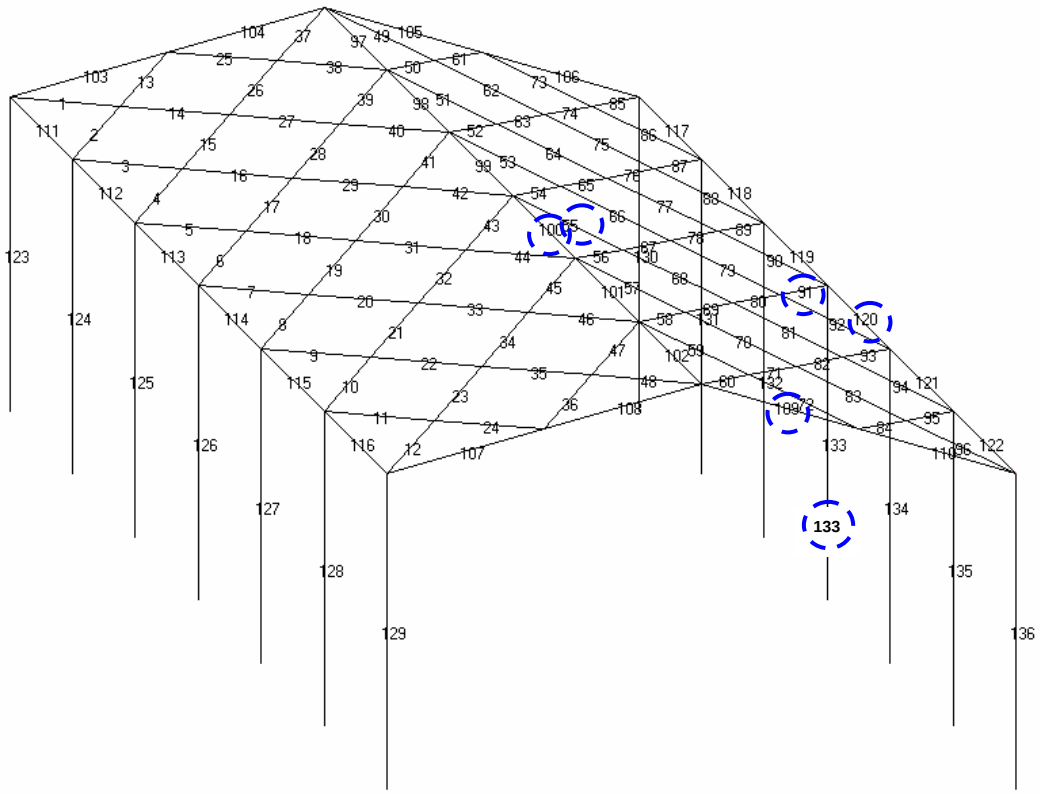



Figura 6.51 – Vista geral da estrutura do modelo 2 com barras numeradas

Tabela 6.41 – Esforços máximos nos pilares de apoio do modelo 2

| | Barra | Esforço normal (N) | Aumento (%) | Barra | Momento fletor $M_x$ (N.m) | Aumento (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1ª condição | 133 | 3208 | - | 133 | 3044 | - |
| 2ª condição | 133 | 8485 | **+ 264.5** | 133 | 3742 | **+ 22.9** |
| 3ª condição | 133 | 3690 | **+ 15.0** | 133 | 10760 | **+ 253.5** |
| 4ª condição | 133 | 5866 | **+ 82.9** | 133 | 46258 | **+ 519.6** |

A partir dos resultados obtidos dos modelos 1 e 2, conclui-se que os apoios na estrutura de cobertura com barras cruzadas têm influência muito significativa no deslocamento vertical máximo e nos esforços máximos nas barras da estrutura. Em especial, a existência dos apoios nos nós de cumeeira e a repetição dos apoios nos pilares na direção z são de grande importância para a rigidez da estrutura e consequentemente para a minimização do consumo de tubos.

## 6.8 Um Breve Comparativo entre Estruturas Espaciais Tubulares com Barras Cruzadas e Treliças de Duas Águas para Coberturas

Treliças metálicas de duas águas, é um dos modelos estruturais mais utilizados para coberturas. Sendo assim, é importante um estudo comparativo entre o modelo proposto e o modelo do tipo treliça. Aqui serão apresentados os resultados obtidos na otimização de dois modelos com dimensões de largura e comprimento iguais a:

- Modelo 1: 12 x 20m;
- Modelo 2: 15 x 30m;

Os dados de entrada necessários à otimização estão dispostos nas Tabs. 6.1 (pág. 54) à 6.4 (pág. 55). Para os dois modelos otimizados o ângulo mínimo para inclinação da cobertura foi de 10°.

### *6.8.1 Otimização do modelo 1*

A Tabela 6.42 apresenta os resultados dos parâmetros otimizados para a estrutura espacial com barras cruzadas do modelo 1. Na otimização foram consideradas barras ligando os nós de cumeeira e os nós no contorno da estrutura. Também foram admitidos tirantes de diâmetro de ½” ligando os pilares de apoio. A Figura 6.52 mostra a vista geral da estrutura otimizada.

Tabela 6.42 - Resumo dos parâmetros otimizados para a estrutura espacial com barras cruzadas do modelo 1

| | |
|---|---|
| Número de módulos na direção x | 4 |
| Número de módulos na direção z | 11 |
| Inclinação da cobertura (°) | 18 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.83 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.28 |
| Comprimento da barra (cm) | 184 |
| Consumo de tubos (kg) | 1283 |

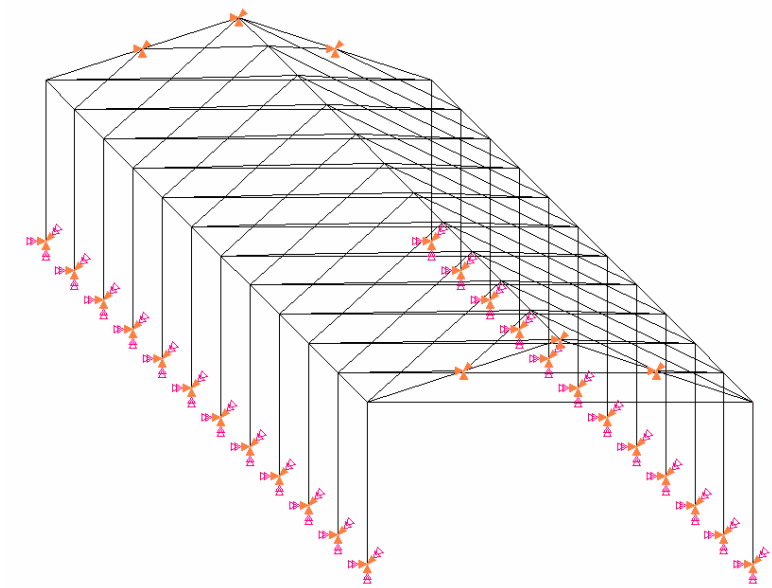


Figura 6.52 – Ilustração do modelo espacial com barras cruzadas otimizado do modelo 1

As Figuras 6.53 e 6.54 ilustram a distribuição de esforços, normal e flexão $M_x$, nas barras da estrutura espacial com barras cruzadas.

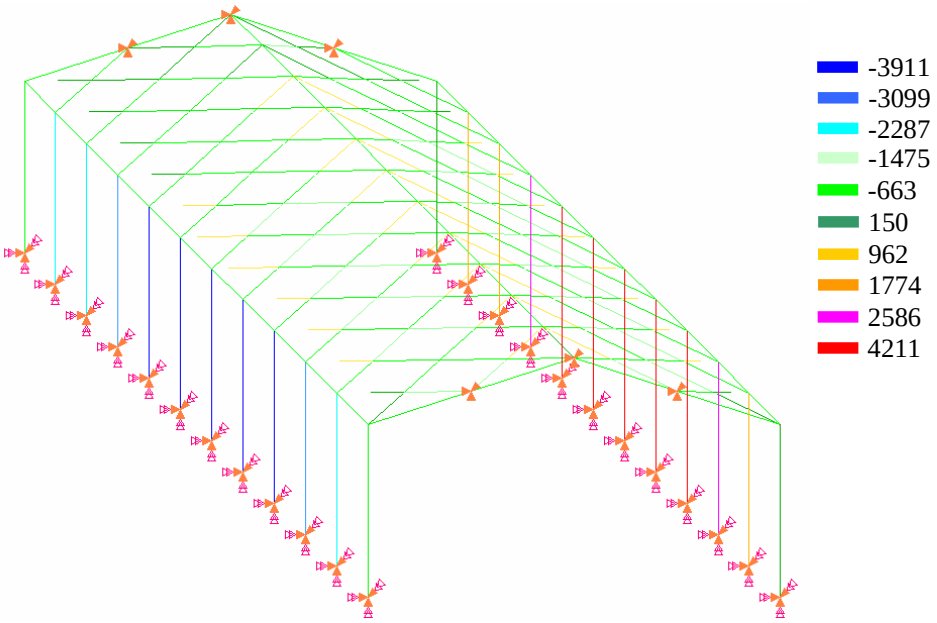



Figura 6.53 – Mapa do esforço de flexão $M_x$ (N.m) nas barras da estrutura espacial com barras cruzadas

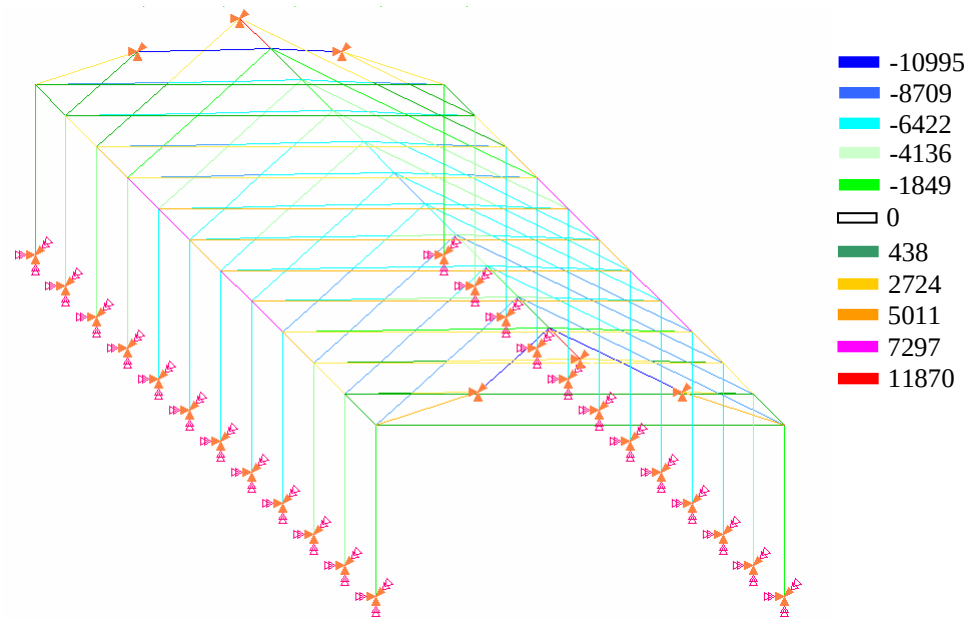



Figura 6.54 – Mapa do esforço normal (N) nas barras da estrutura espacial com barras cruzadas

Para otimizar o modelo do tipo treliça foram admitidos como dados de entrada, número máximo de módulos na direção x e z, iguais a 10 e 8, respectivamente.

É importante salientar que as treliças foram consideradas igualmente espaçadas. Para gerar o carregamento o programa OTR avalia as diversas possibilidades de combinação para os coeficientes de forma para à ação de vento e determina as forças sobre os nós para a condição mais desfavorável. A Tabela 6.43 apresenta os resultados obtidos para os parâmetros otimizados do modelo 1 do tipo treliça. A Figura 6.55 ilustra o modelo do tipo treliça otimizado. Como o programa computacional Gestrut estava preparado para reconhecer estruturas tridimensionais, para equilibrar a treliça foi inserido um apoio perpendicular ao plano da treliça no nó de cumeeira.

Tabela 6.43 - Resumo dos parâmetros otimizados para a estrutura do tipo treliça

| | |
|---|---|
| Número de módulos na direção x | 8 |
| Número de treliças | 8 |
| Inclinação da cobertura (°) | 14 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.22 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.25 |
| Consumo de tubos (kg) | 1353 |

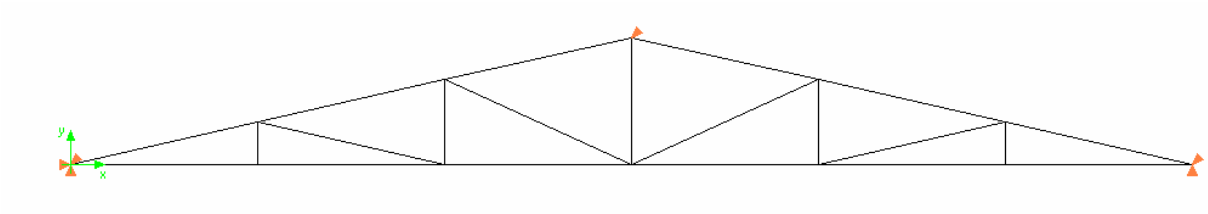


Figura 6.55 – Ilustração do modelo 1 tipo treliça otimizado

As Figuras 6.56 e 6.57 ilustram a distribuição de esforços, normal e flexão $M_x$, nas barras da estrutura espacial com barras cruzadas.

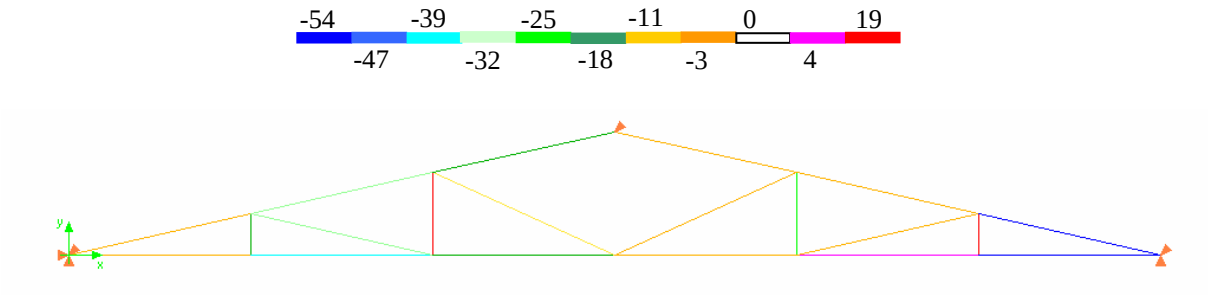



Figura 6.56 – Mapa do esforço de flexão $M_x$ (N.m) nas barras da treliça do modelo 1

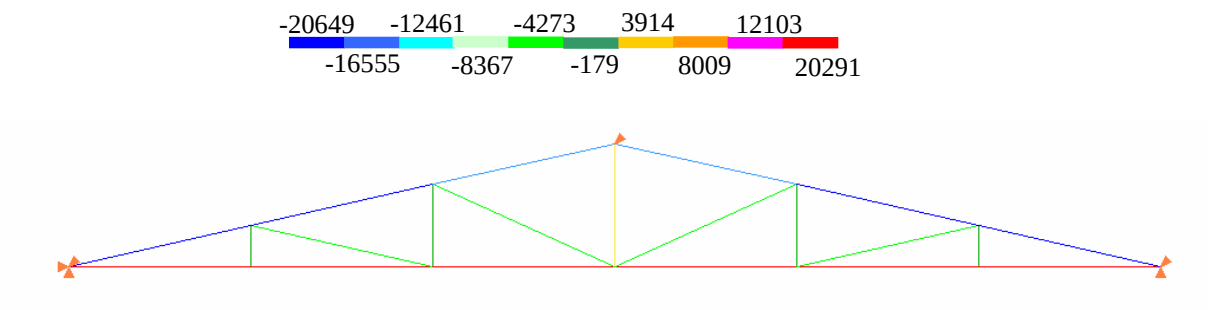



Figura 6.57 – Mapa do esforço normal (N) nas barras da treliça do modelo 1

Pelas Figuras 6.53 a 6.57 percebe-se que as barras que compõem os planos de cobertura do modelo espacial com barras cruzadas têm esforços de flexão $M_x$ maiores que as barras do modelo do tipo treliça. O contrário ocorre com relação aos esforços normais. Outro detalhe importante, é que a distribuição dos esforços nas barras do modelo espacial com barras cruzadas é mais homogênea, ou seja, a diferença da intensidade dos esforços, tanto normal quanto de flexão $M_x$, entre as barras é menos significativa que na treliça. Por

fim, o modelo espacial com barras cruzadas teve um consumo de tubos menor que a treliça, mostrando que o modelo é competitivo.

### ***6.8.2*** *Otimização do modelo 2*

A Tabela 6.44 apresenta os resultados dos parâmetros otimizados para a estrutura espacial com barras cruzadas do modelo 2. Novamente, para a otimização foram consideradas barras ligando os nós de cumeeira e os nós no contorno da estrutura. Também foram admitidos tirantes de diâmetro de ½" ligando os pilares de apoio. A Figura 6.58 mostra a vista geral da estrutura otimizada.

Tabela 6.44 - Resumo dos parâmetros otimizados para a estrutura espacial com barras cruzadas do modelo 2

| | |
|---|---|
| Número de módulos na direção x | 6 |
| Número de módulos na direção z | 12 |
| Inclinação da cobertura (°) | 12 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 7.30 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.32 |
| Comprimento da barra (cm) | 181 |
| Consumo de tubos (kg) | 3514 |

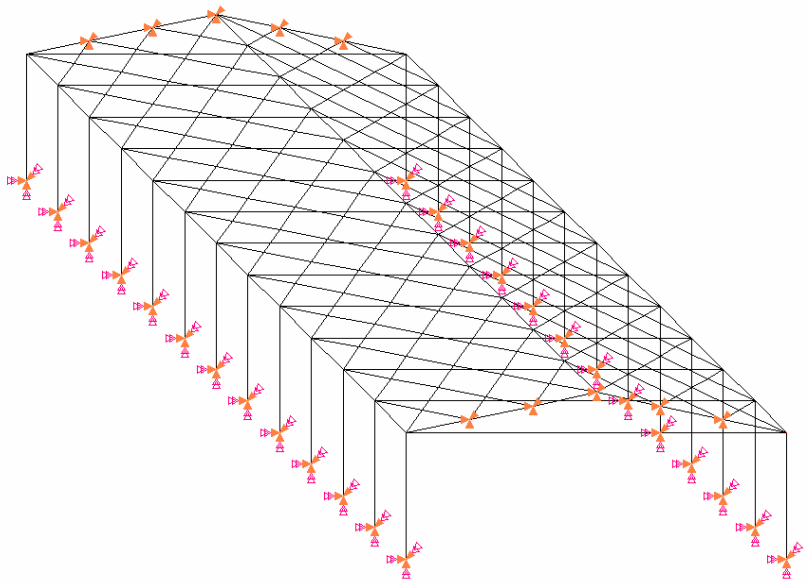


Figura 6.58 - Ilustração do modelo espacial com barras cruzadas otimizado do modelo 2

As Figuras 6.59 e 6.60 ilustram a distribuição de esforços, normal e flexão $M_x$, nas barras da estrutura espacial com barras cruzadas do modelo 2.

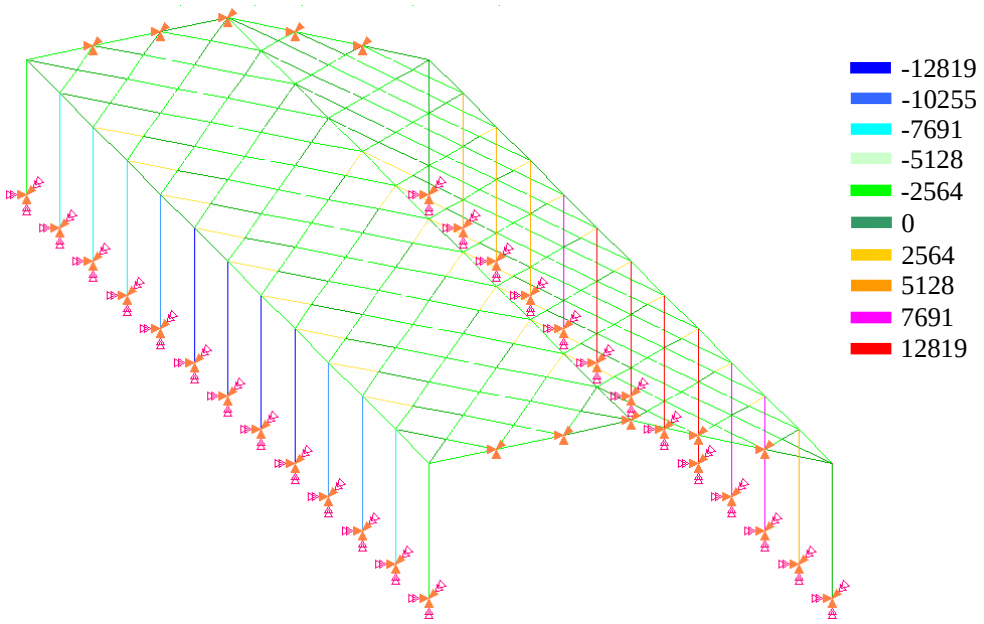



Figura 6.59 – Mapa do esforço de flexão $M_x$ (N.m) nas barras da estrutura espacial com barras cruzadas

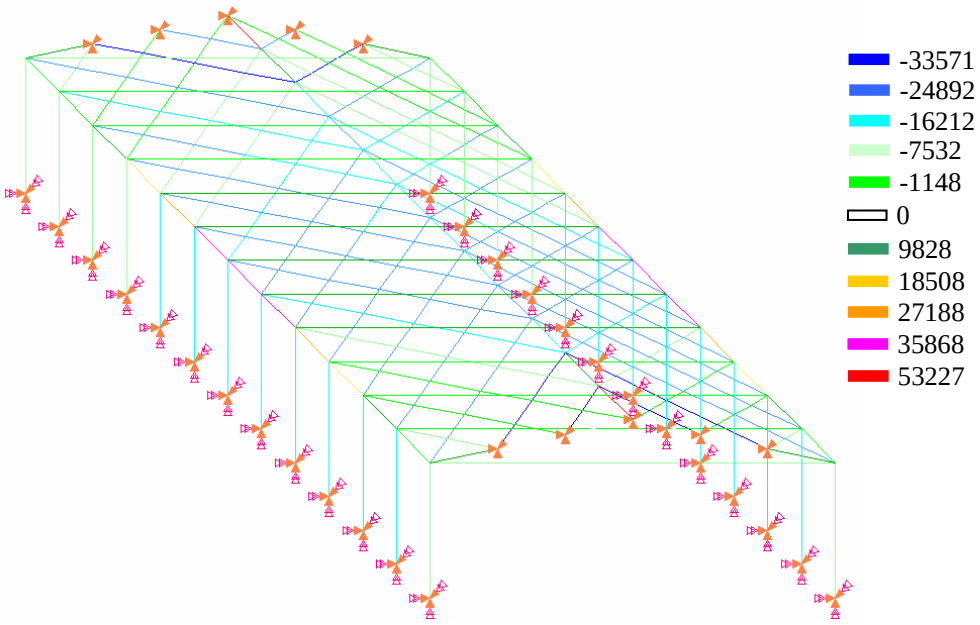



Figura 6.60 – Mapa do esforço normal (N) nas barras da estrutura espacial com barras cruzadas

Para otimizar o modelo 2 do tipo treliça foram admitidos como dados de entrada, número máximo de módulos na direção z igual a 15 e número máximo de módulos na direção x igual a 12.

Para as terças também foram adotados perfis tubulares circulares com as seguintes dimensões 42x3.2mm. A Tabela 6.45 apresenta os resultados obtidos para os parâmetros otimizados do modelo 2 do tipo treliça. A Figura 6.61 ilustra o modelo do tipo treliça otimizado.

Tabela 6.45 - Resumo dos parâmetros otimizados para a estrutura do tipo treliça

| | |
|---|---|
| Número de módulos na direção x | 8 |
| Número de treliças | 14 |
| Inclinação da cobertura (°) | 20 |
| Diâmetro do tubo (cm) | 4.83 |
| Espessura do tubo (cm) | 0.28 |
| Consumo de tubos (kg) | 2851 |

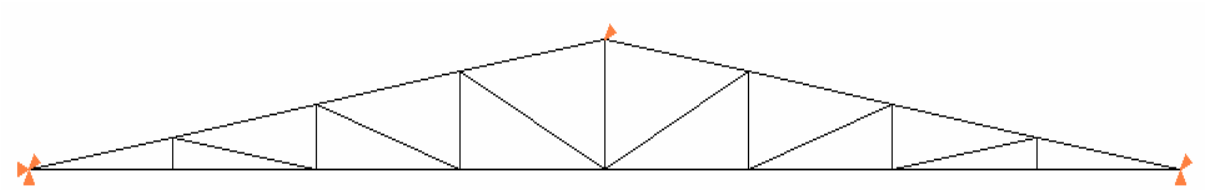


Figura 6.61 - Ilustração do modelo 2 tipo treliça otimizado

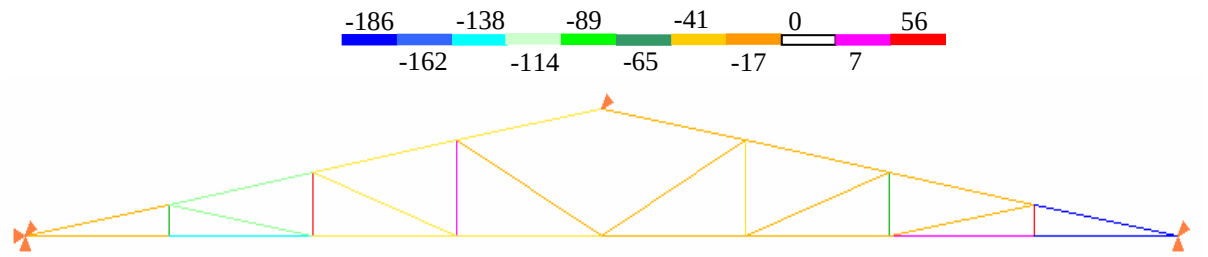



Figura 6.62 - Mapa do esforço de flexão $M_x$ (N.m) nas barras da treliça do modelo 2

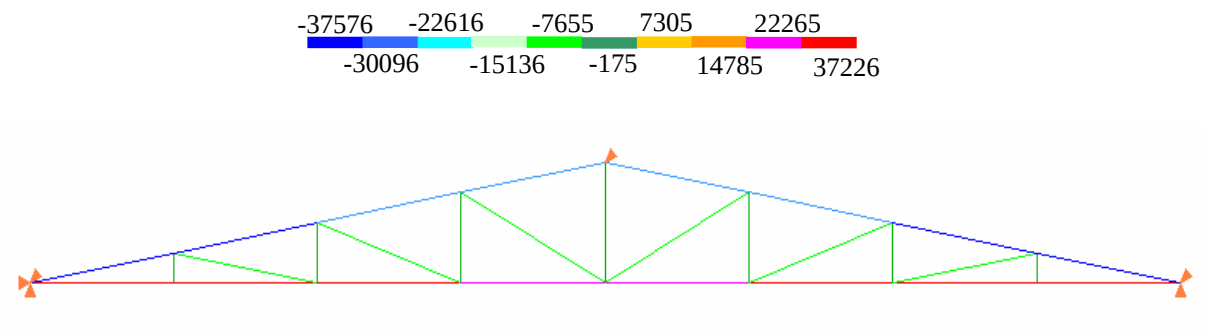



Figura 6.63 - Mapa do esforço normal (N) nas barras da treliça do modelo 2

Novamente, percebe-se pelas Figs. 6.59 à 6.63 que as barras que compõem os planos de cobertura do modelo espacial com barras cruzadas têm esforços de flexão $M_x$ maiores que as barras que formam a treliça. Assim como no primeiro modelo os esforços normais na estrutura com barras cruzadas são menores que os esforços nas barras da treliça. Entretanto, os esforços normais nas barras da estrutura com barras cruzadas aumentaram significativamente, diminuindo a diferença entre os valores máximos determinados para cada tipo de estrutura. O que justifica o consumo de tubos maior na estrutura com barras cruzadas. Verifica-se novamente que a distribuição dos esforços nas barras do modelo espacial com barras cruzadas é mais homogênea que na treliça.

# CAPÍTULO 7

## CONCLUSÕES

Para melhor entendimento global do trabalho realizado será feito neste capítulo uma retrospectiva, seguida das principais conclusões.

Foi estudado neste trabalho a aplicação do método dos AGs na otimização do consumo de tubos de estruturas tubulares metálicas espaciais com barras cruzadas formando dois planos de cobertura. A avaliação foi feita para diversas configurações geométricas e de relações comprimento/largura da área coberta. Os resultados obtidos mostraram que o modelo estrutural avaliado é competitivo do ponto de vista econômico.

Para realizar as avaliações foi desenvolvido um programa computacional específico para otimização de estruturas reticuladas baseado no método dos AGs. Para gerar a malha geométrica e determinar os esforços e deslocamentos da estrutura utilizou-se o programa computacional GESTRUT. Pelo fato do GESTRUT ter sido escrito em linguagem de programação DELPHI®, a escolha da mesma para elaborar o AG se mostrou vantajosa. Isso permitiu trocar informações entre os programas com o mínimo de ajustes possíveis.

De acordo com a literatura, o estudo de funções com variáveis discretas utilizando o algoritmo genético é feito em código binário. Apesar disto, decidiu-se escrever o algoritmo genético em código real. Isto facilitou a implementação do programa e suprimiu duas etapas do algoritmo, a de converter os números reais em binários e depois convertê-los em números reais. Pode-se afirmar que esta escolha não influenciou negativamente o desempenho do AG.

O consumo de tubos (função objetivo) da estrutura tubular metálica espacial com barras cruzadas pode ser escrita apenas em termos das variáveis $\alpha$, $\theta$ e A, já que as variáveis m e n são funções do ângulo $\alpha$. No entanto, usar os parâmetros m e n facilita a implementação do programa computacional e melhora a interface com o usuário.

Foi aplicada duas restrições ao problema. A primeira é geométrica. O usuário deve restringir o comprimento máximo da barra padrão em função das dimensões das telhas a serem usadas. A segunda restrição é aplicada após cada geração, se o indivíduo melhor adaptado não satisfazer as condições de dimensionamento imposta a estrutura pela NBR8800 (ABNT, 1986). Neste caso, o indivíduo é descartado, fazendo sua probabilidade de seleção igual a zero.

Como é difícil determinar qual é a barra mais solicitada, o dimensionamento foi feito para todas as barras. Assim, devem ser determinados os esforços (força axial, força cortante e momento fletor) atuante em cada barra. É importante ressaltar que para fazer o dimensionamento foi necessário automatizar o carregamento. Neste processo, a etapa mais trabalhosa foi implementar o cálculo das forças devidas à ação do vento, que dependem de diversas condições impostas pela NBR6123 (ABNT, 1988). Além disso, os coeficientes de pressão externos dependem da inclinação da cobertura, que é uma variável da função objetivo. Todo este procedimento é realizado dentro do programa de otimização bastando o usuário fornecer uma pequena quantidade de informações. Enfim, as forças devidas aos carregamentos foram concentradas sobre os nós da estrutura por área de influência.

Para verificar a eficiência e confiabilidade do programa OTR, criou-se um módulo a parte no programa que permite a otimização de qualquer função matemática a partir dos operadores genéticos implementados. Com isto, foi possível utilizá-lo para otimizar diversas funções matemáticas encontradas na literatura. Os resultados obtidos confirmaram sua eficiência e mostraram que ele possui ótima robustez a problemas com multimodalidade e na presença de ruído.

Os resultados obtidos na otimização de estruturas tubulares metálicas espaciais com barras cruzadas mostraram que o uso de barras ligando os nós de cumeeira e/ou ligando os nós no contorno da estrutura em geral aumentam o consumo de tubos. Por outro lado, diminuem os esforços máximos nos pilares de apoio da estrutura de cobertura.

Outra forma de reduzir os esforços nos pilares de apoio é ligá-los com tirantes. Neste caso, há uma redução bastante significativa nos esforços máximos de flexão e um aumento no esforço normal máximo nos pilares de apoio da estrutura. Em relação ao consumo de tubos ocorre uma redução mais acentuada (em média, 13%) para tirantes até ½” de diâmetro. A partir deste ponto a curva de redução tende a estabilizar.

A análise do consumo de tubos em função do ângulo de inclinação dos planos de cobertura mostrou que a situação ótima de projeto não é aquela cujo deslocamento vertical máximo da estrutura é menor possível para uma dada configuração geométrica. Pelo contrário, na situação ótima de projeto, ou seja, menor consumo de tubos, o ângulo de inclinação é menor e a estrutura possui deslocamento vertical máximo maior. Vale ressaltar que apesar do deslocamento vertical máximo ser maior, ele está dentro dos critérios de dimensionamento da NBR8800 (ABNT, 1986).

Os resultados obtidos da otimização do consumo de tubos em função da relação comprimento/largura da área coberta mostraram que independentemente do valor desta relação, o consumo de tubos por área coberta em função da largura da área coberta é crescente, podendo ser aproximado, com boa concordância, por uma reta. Este resultado

tem grande importância, pois pode limitar com facilidade o domínio de viabilidade econômica do modelo estrutural estudado.

Avaliou-se também, a influência da posição e do número de apoios no desempenho mecânico global da estrutura. Para os casos estudados pode-se perceber que a retirada dos apoios nos nós de cumeeira provocam aumentos muito significativos no deslocamento vertical máximo da estrutura e nos esforços máximos nas barras que compõem os planos de cobertura e nos pilares de apoio. Nos outros casos, em geral, as variações no deslocamento vertical máximo e nos esforços máximos são menores, mas também significativas. Conclui-se então, que os pilares de apoio influenciam significativamente no desempenho mecânico global da estrutura e por conseqüência, no consumo de tubos.

Ainda, foi feita uma análise comparativa entre o desempenho mecânico global de uma estrutura tubular metálica espacial com uma treliça. Para realizar este estudo o programa computacional OTR foi preparado para gerar a malha geométrica de treliças. Pode assim, otimizar o consumo de tubos deste outro modelo estrutural também. Para um dos casos analisados, a estrutura tubular metálica espacial apresentou um menor consumo de tubos que a treliça, mostrando que o modelo proposto é economicamente competitivo. Além disso, os resultados obtidos mostram que os esforços são mais homogêneos nas barras que compõem os planos de cobertura da estrutura espacial que nas barras que compõem a treliça.

Conclui-se também, que o programa computacional OTR é uma ótima ferramenta de otimização, permitindo realizar de forma rápida e segura, diversas análises sobre o comportamento mecânico de estruturas reticuladas. Além disso, o programa possui uma interface com o usuário versátil e de fácil utilização, pois requer do usuário uma pequena quantidade de dados.

Como perspectivas futuras podem ser realizadas novas otimizações para diferentes distribuições de barras, tanto para estruturas tubulares metálicas espaciais com barras cruzadas quanto para treliças ou outros sistemas. Também podem ser avaliadas estruturas espaciais com barras cruzadas de madeira com seção retangular, uma vez que o programa OTR também foi preparado para este tipo de análise, mesmo não fazendo parte do escopo de trabalho. Enfim, considera-se que o programa computacional OTR tornou-se uma ferramenta, cuja capacidade poderá ser intensamente explorada de agora em diante na solução de diferentes tipos de problemas, com um custo bastante reduzido, devido ao fato do seu código ser aberto. Sugere-se ainda a análise do comportamento mecânico das ligações submetidas à forças axiais e flexão no plano perpendicular das peças.

# CAPÍTULO 8

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


Alves, E. C., Vaz, L. E., Kataoka Filho, M. Venâncio Filho, F., Na Confrontation Between Deterministic and Probabilistic Optimization of Reticulated Structures. In: Iberian Latin-American Congress on Computacional Methods in Engineering, 22, 2001, Campinas, CD ROM.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6123: Forças devidas ao vento. Rio de Janeiro, 1988. 80f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8800: Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios, Rio de Janeiro, 1986. 200f.

Baker, J. E., Adaptive Selection Methods for Genetic Algorithms. In: Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms e their Application, 1, 1985, Hillsdale, New Jersey, USA, pp. 101-111.

Barbosa, P. R., Michels Jr, V., Rolnik, V. P. e Seleghim jr, P., Estratégias Otimizadas para Movimentação de Fluidos e Gestão de Reservatórios. In: Iberian Latin-American Congress on Computacional Methods in Engineering, 22, 2001, Campinas, CD ROM.

Braga, C. G., **O uso de Algoritmos Genéticos para Aplicações em Problemas de Otimização de Sistemas Mecânicos**. 1998. 73f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Borges, C. C. H. e Barbosa, H. J. C., Optimization of Framed Structures Subject to Seismic Loading via Genetic Algorithims. In: Iberian Latin-American Congress on Computacional Methods in Engineering, 22, 2001, Campinas, CD ROM.

Carvalho, E. M. L., Pinho, A. L. S., Battista, R. C., Redução de Tensões em Risers Rígidos de Plataformas TLP. In: XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 30, 2002, Brasília, CD-ROM.

Casas, W. J. P., **Concepção Ótima de Sistemas Mecânicos Acoplados. Acoplados em Problemas Elasto-Acústico de Interiores**. 1998. Tese de Doutorado – Universidade de Campinas, Campinas.

Castilho, V. C., Debs, M. K. e Nicoletti, M. C., Application of Genetic algorithm for optimizing slabs of prestressed concrete joists. In: Iberian Latin-American Congress on Computacional Methods in Engineering, 22, 2001, Campinas, CD ROM.

Chiew, S. P.; Soh, C. K.; Fung, T. C. e Soh, A. K., Numerical study of multiplanar tubular DX-joints subject to axial loads. 1999, **Journal Pergamon**, pp. 749-761.

Faria, M. M. L. e Steffen Jr, V., Uma Técnica para Otimização de Projetos Mecânicos. **Revista Ciência e Engenharia**, UFU, Ano 1, n° 2, pp. 181-197, 1992.

Ferreira, N. S. S. **Estruturas lamelares de madeira para coberturas**. 1999, 217f, Dissertação de mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

Ferreira, N. S. S. e Calil Jr, C., Recomendações para o dimensionamento de estruturas lamelares de madeira para coberturas, In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 7, 2000, São Carlos, CD-ROM.

Filipkowski, J. e Krysztoforski, A., An experimental study of plane tubular trusses with two different welded joints, In: International Conference on Space Structures, 4, 1993, London: Thomas Telford, Anais International Conference on Space Structures, Vol. 2, pp. 1879-1884.

Friswell, M. I., Penny, J. E. T. e Lindfield, G., The Location of Damage from Vibration Data Using Genetic Algorithms. In: Proceedings of the 13$^{th}$ International Modal Analysis Conference, 13, 1995, Nashville, Tennessee, pp. 1640-1646.

Gabrielli, T. V. e Neves, F. A., Numerical Simulation Of Structural Behavior Of Transmission Line Towers In Tubes. In: Iberian Latin-American Congress on Computacional Methods in Engineering, 25, 2004, Recife, CD ROM.

Gesualdo, F.A.R., Gestrut – Análise e Dimensionamento de Estruturas Reticuladas, 2005, Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, /Software, versão educativa.

Goldberg, D. E. **Genetic Algorithms in Serch, Optimization e Machine Learning.** Massachusetts: Addison-Wesley Pub. Co, 1989. 412p.

Goldberg, D. E. e Deb, K., A Comparative Analysis of Selection Schemes Used in Genetic Algorithms. In: Foundations of Genetic Algorithms, 1991, San Mateo, California, USA, pp. 69-93.

Haupt, R. L. e Haupt, S. E. **Practical Genetic Algorithms**, John Wiley e Sons, Inc., 1998.

Holle, J. H. **Adaptation in Natural e Artificial Systems**, The University of Michigan Pres, ann Arbor, 1975.

Huallem, A., Perfis estruturais laminados – Solução nacional para o mercado da construção metálica. In: CICOM – Congresso Internacional da Construção Metálica, 1, 2001, São Paulo, CD ROM.

Jármais, K. e Farkas, J., Tubular Structures, In: International Symposium on Tubular Structures, 7, 1996, Hungary.

Lapa, C. M. F., Sampaio, P. A. B., Botelho, D. A. e Pereira, C. M. N. A., Dimensionamento de experimentos em escala reduzida useo algoritmos genéticos, In: Iberian Latin-American Congress on Computacional Methods in Engineering, 22, 2001, Campinas, CD ROM.

Larson, C. B. e Zimmerman, D. C., Structural Model Refinement Using a Genetic Algorithm Approach. In: Proceedings of the International Modal Analysis Conference, 11, 1993, Kissimmee, Florida, pp. 1095-1101.

Lima, F. J., Aço Plano e o Mercado da Construção Civil. In: CICOM – Congresso Internacional da Construção Metálica, 1, 2001, São Paulo, CD ROM.

Lima, L. R. O. e Vellasco, P. C. G. S., Calibração da Rigidez Pós-limite de Ligações Viga-coluna utilizando-se Algoritmos Genéticos, In: Iberian Latin-American Congress on Computacional Methods in Engineering, 25, 2004, Recife, CD ROM.

Malite, M.; Gonçalves, R. M.; Sáles, J. J.; Magalhães, J. R. M. e Salles, E. R. P., Space Structures in Brazil, **Journal Elsevier**, p. 476-477, 1998.

Menezes, A. G. e Galgoul, N. S., Análise de Tensões em Anéis – Aplicação a Juntas de Apoio de Plataformas Offshore. In: XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 30, 2002, Brasília, CD-ROM.

Meyer, K. F., **Estruturas Metálicas**, Belo Horizonte: KM Engenharia Ltda, 2002, 224p.

Mühlenbein, H. e Schlierkamp-Voosen, D., Predictive Models for the Breeder Genetic Algorithm: I. Continuous Parameter Optimization. In: Evolutions Computation, 1, 1993, p. 25-49.

Neves, A. S. e Santos, D. C., Optimização de Lajes com Base num Modelo Discreto com Módulos Articulados Espaciais. In: Iberian Latin-American Congress on Computacional Methods in Engineering, 22, 2001, Campinas, CD ROM.

Packer, J. A. e Henderson, J. E., **Hollow Structural Section: Connections e Trusses – a Design Guide**, 2 ed., Toronto: Canadian Institute of Steel Construction, 1997. 447p.

Pulilo Filho, A. R.; Aguiar, L. L. e Arcaro, V. F., Um sistema computacional para o projeto de treliças espaciais metálicas, In: XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 30, 2002, Brasília, CD-ROM.

Requena, J. A. V.; Silva, N. C.; Paschoal, L. G. e Araújo, A. H. M., Automação do projeto de treliças metálicas planas constituídas de barras tubulares, In: CICOM – Congresso Internacional da Construção Metálica, 1, 2001, São Paulo, CD ROM.

Santos, P. C., A maturidade da construção metálica no Brasil, In: CICOM – Congresso Internacional da Construção Metálica, 1, 2001, São Paulo. CD ROM.

Silva, L. A. **Estudo Avaliativo de Algoritmos Genéticos Aplicados a Problemas de Identificação em Elastodinâmica**. 1999, 118f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Silva, L. A. e Rade, D. A., Time Domain-Based Identification of Mechanical Characteristics of Supporting Elements. In: Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference, 17, 1999, Orlando, Florida, pp. 1616-1621.

Souza, M. G. Q., Branco, R. H. F. e Requena, J. A. V., Automação e Utilização CAD/CAE no Projeto de Estruturas Metálicas Planas, utilizando perfis tubulares. In: Iberian Latin-American Congress on Computacional Methods in Engineering, 25, 2004, Recife, CD ROM.

Souza, J. M. C., Caligiana, G. e Chimisso, F. E. G., Otimização de Cabos para Ancoragem Através da Associação de Algoritmos Genéticos e de Lógica Nebulosa (Fuzzy Logic). In: Iberian Latin-American Congress on Computacional Methods in Engineering, 22, 2004, Campinas, CD ROM.

Souza Jr, D. A. e Gesualdo, F. A. R., Avaliable Study of Genetic Algorithm Aplicable to Otimization of the Spatial Metallic Tubular Structures from segmental-lattice of the Straight Shaft to Cove, In: Iberian Latin-American Congress on Computacional Methods in Engineering, 24, 2004, Campinas, CD ROM.

Souza Jr, D. A. **Estudo de estruturas lamelares de eixo reto.** 1998, Relatório de Iniciação Científica, 100f. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Souza Jr, D. A. e Gesualdo, F.A.R., OTR – Otimização de Estruturas Reticuladas, 2005a, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, /Software, versão educativa.

Souza Jr, D. A. e Gesualdo, F.A.R., Análise da Confiabilidade e da Eficiência do Programa Computacional OTR. In: XV POSMEC – Simpósio de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 15, 2005b, Uberlândia, CD ROM.

Souza, E. N. e Mendes Neto, F., Aplicação de algoritmo genético no dimensionamento de seções transversais retangulares de concreto armado. In: Iberian Latin-American Congress on Computacional Methods in Engineering, 22, 2001, Campinas, CD ROM.

Steffen Jr, V. e Assis, E. G., “Parameter Identification in Rotor Bearing Systems”, In: Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference, 17, 1999, Orlando, Florida, pp. 1100-1106.

Vegte, G. G. van der e Wardenier, J. The static Strength of multiplanar tubular TX-joints under axial loading excluding the effects of overall chord bending moments, **Journal Elsevier**, p. 141-168, 1998.

## ANEXO A - DESCRIÇÃO DE FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL OTR

Este anexo tem o objetivo de fornecer informações específicas sobre os procedimentos e detalhes do programa computacional OTR, visando facilitar o entendimento para sua aplicação e utilização.

O programa OTR é específico para minimização do consumo de material, tubos metálicos ou madeira, na montagem de estruturas de cobertura. O programa foi preparado para otimizar dois modelos estruturais: estruturas espaciais com barras cruzadas e treliças. Sendo que para o primeiro modelo admite-se a otimização tanto para perfis tubulares metálicos com seção circular quanto para peças de madeira com seção retangular. Já o segundo modelo é otimizado apenas com perfis metálicos de seção circular.

Para otimização de estruturas utilizando perfis tubulares, OTR trabalha com 4 variáveis de projeto: número de módulos nas direções x e z, ângulo de inclinação da cobertura e seção transversal do perfil tubular. Para a quarta variável, o perfil tubular, montou-se um banco de dados com as propriedades geométricas de cada perfil tubular. No caso da otimização de estruturas com barras cruzadas usando barras de madeira de seção transversal retangular, além das três primeiras variáveis de projeto, são definidas mais duas variáveis, a largura e a altura da seção transversal. A Figura A.1 ilustra a vista geral da estrutura espacial com barras cruzadas. Denomina-se módulo como sendo o losango formado pelos cruzamentos das barras que compõem os planos de cobertura. Nota-se que a estrutura ilustrada possui 6 módulos em cada direção (x e z). O ângulo de inclinação da cobertura é representado por $\theta$. Vale ressaltar que a estrutura otimizada possui pilares em todos os nós da direção z.

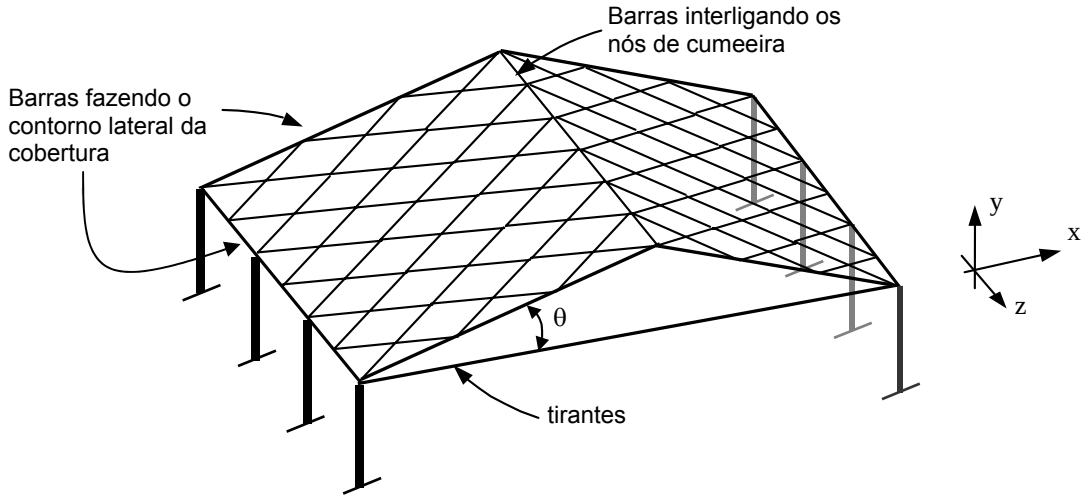



Figura A.1 - Vista geral da estrutura espacial com barras cruzadas

A Figura A.2 ilustra a vista frontal da estrutura do tipo treliça com 6 módulos na direção x. Para a direção z, o número de módulos é dado pela quantidade de treliças menos 1 como mostra a Figura A.3, que tem 4 módulos na direção z e 5 treliças igualmente espaçadas.

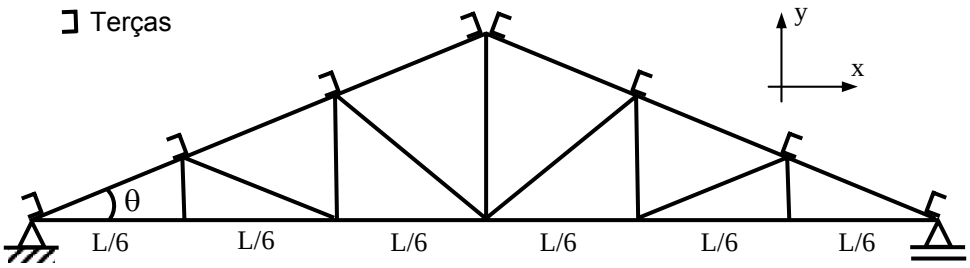



Figura A.2 – Vista frontal da estrutura do tipo treliça

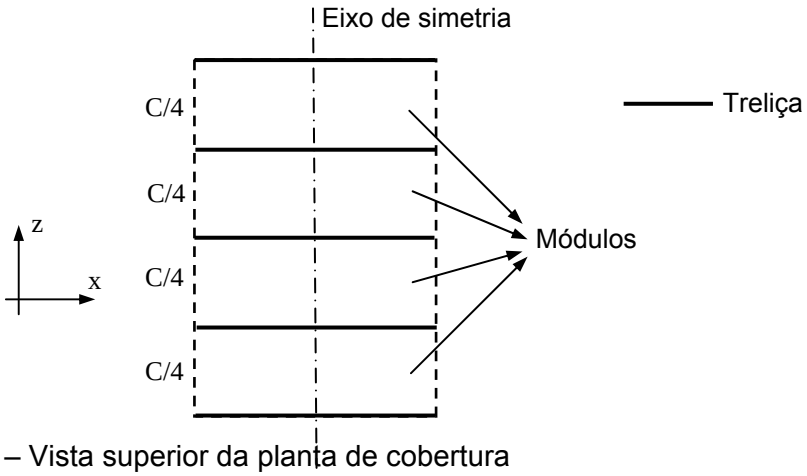



Figura A.3 – Vista superior da planta de cobertura

Como método de busca implementou-se o método dos AGs. Suas características se mostraram muito interessantes para este problema. O sucesso da escolha foi confirmado depois pelos resultados obtidos.

O objetivo principal deste trabalho é criar uma ferramenta computacional de fácil utilização pelo usuário, ou seja, que a partir de uma quantidade mínima de informações fornecidas pelo usuário, o programa seja capaz de operar sem sua intervenção e, no final encontre a solução ótima para o problema. Além disto, para montagem dos dados geométricos da estrutura (posição dos nós, incidência de barras, condições de contorno, e determinação dos esforços e deslocamentos) usou-se o programa computacional Gestrut desenvolvido por Gesualdo (2005) em linguagem Delphi®. Para que pudessem trabalhar juntos com uma quantidade mínima de ajustes necessários entre os programas computacionias OTR e Gestrut, implementou-se o programa OTR em linguagem Delphi®.

Esta escolha também permitiu criar uma interface agradável para o programa, como pode ser visto na Fig. A.4.

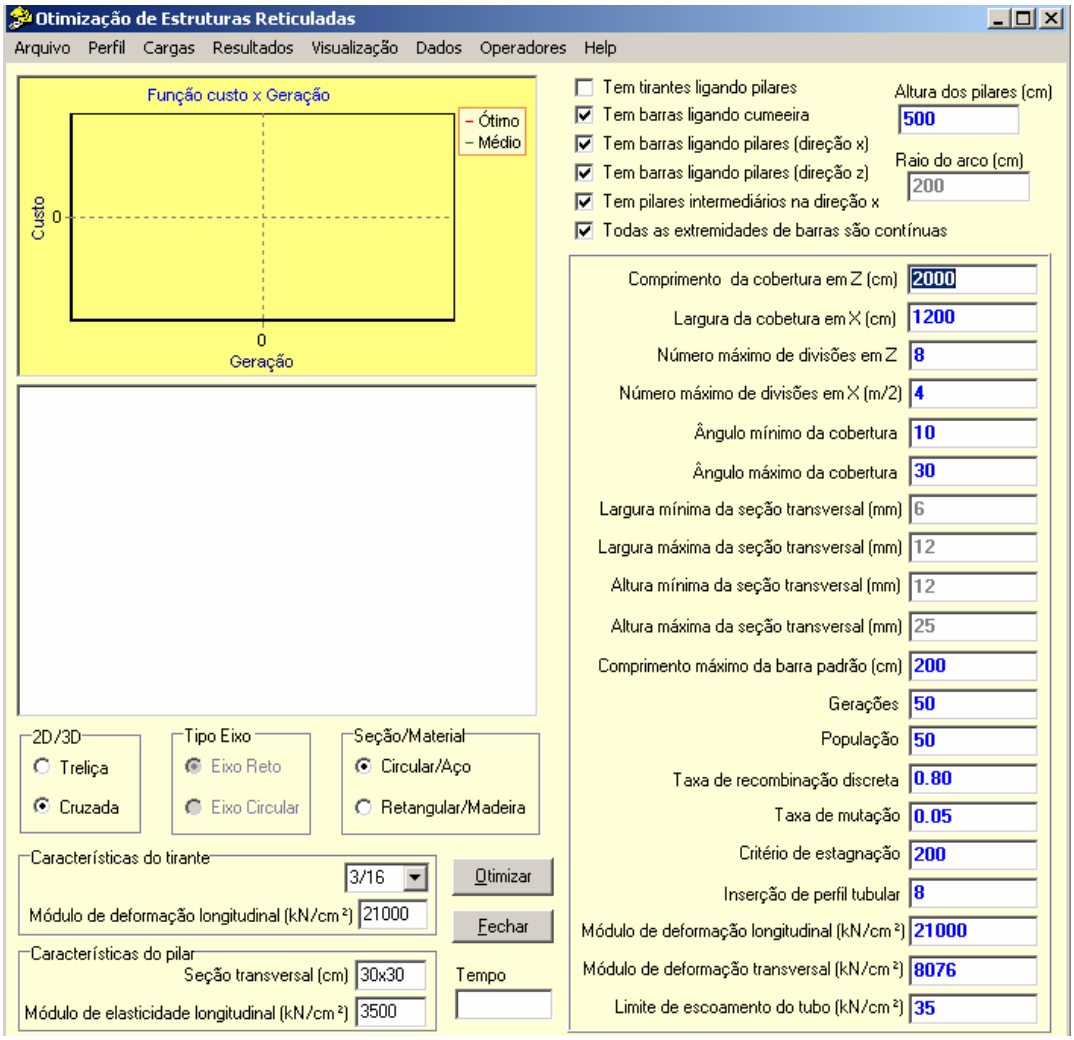



Figura A.4 – Tela principal do programa computacional OTR

Observa-se na Fig. A.4 a existência de um gráfico na porção superior esquerda. Neste gráfico são plotadas as curvas da função objetivo e de sua média em função do número de gerações, permitindo ao usuário acompanhar a convergência do processo.

A Figura A.5 ilustra o esquema para escolha do tipo de estrutura e o material das barras a ser otimizada. Vale ressaltar que o programa computacional OTR ainda não está pronto para otimizar estruturas espaciais com barras cruzadas de madeira e eixo curvo.

Como dados iniciais o programa exige que o usuário forneça os valores máximos para os módulos nas direções x e z. Os valores mínimos para estas variáveis são determinados internamente pelo programa a partir dos valores de comprimento e largura da área coberta e do comprimento máximo da barra padrão que forma os módulos, Eqs. (4.1) e (4.2) pág. 25.

Deve-se fornecer também os ângulos mínimo e máximo de inclinção da cobertura, limitando assim o domínio desta variável de projeto. No caso de otimização com perfil tubular, o usuário deve entrar apenas com as propriedades físicas, módulo de deformação longitudinal e transversal e, limite de escoamento do tubo.

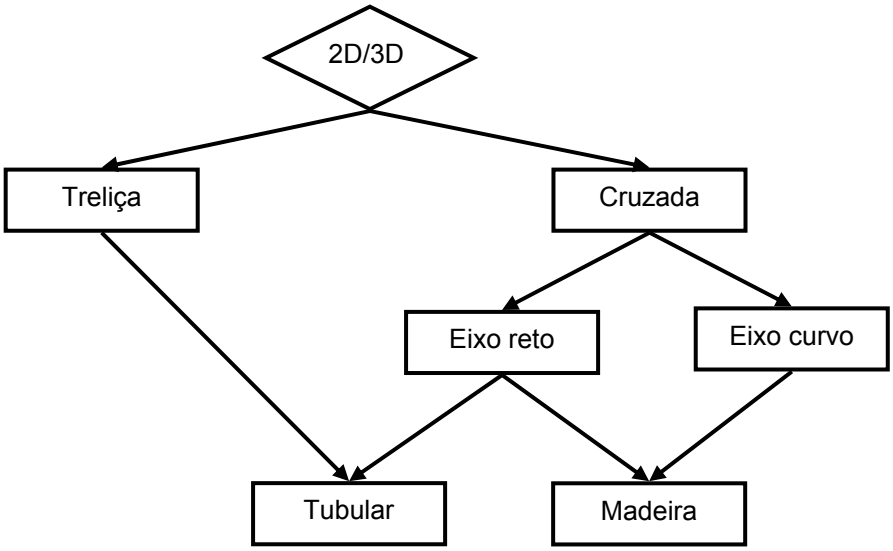



Figura A.5 – Esquema para escolha do tipo da estrutura e do material a ser otimizada

Entretanto, no caso de otimização com peças de madeira, o usuário deve fornecer os limites inferior e superior para as variáveis de projeto, largura e altura da seção transversal. Para definir as propriedades físicas da madeira existe uma tela específica, que está ilustrada na Fig. A.6.

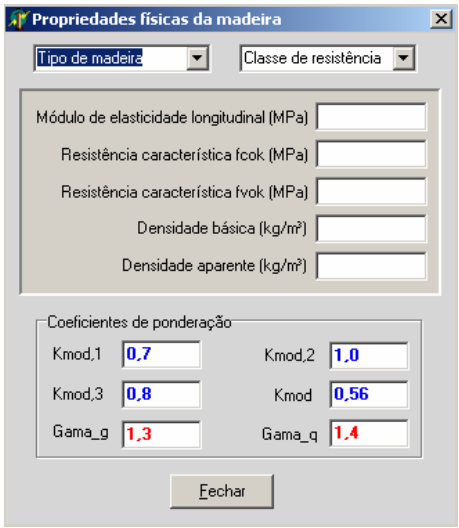



Figura A.6 – Tela para escolha das propriedades físicas da madeira

Nesta tela o usuário escolhe o tipo de madeira: conífera ou dicotiledônea e, a classe de resistência da madeira. Automaticamente o programa preenche os campos das propriedades físicas da madeira. Além desta escolha o usuário deverá fornecer os valores para os coeficientes $k_{mod,1}$, $k_{mod,2}$, $k_{mod,3}$, $\gamma_g$ e $\gamma_q$.

Ainda na tela principal, para qualquer tipo de material, o usuário deverá fornecer os parâmetros específicos para operação do AG, quantidade de gerações, população, taxa de recombinação discreta, taxa de mutação e critério de estagnação. O critétio de estagnação funciona da seguinte maneira: se o programa dimensionar a quantidade de estruturas definidas pelo usuário neste campo, sem obter melhora na função objetivo, o programa termina a otimização mesmo não completando o número de gerações definido pelo usuário.

Devido às grandes diferenças entre as propriedades geométricas dos perfis cadastrados no banco de dados, a otimização pode ficar presa numa região do campo de busca não viável e não obter sucesso. Para evitar este problema, criou-se o campo "Inserção de perfil tubular". Este funciona da seguinte maneira: suponhamos que o usuário defina este campo com um valor x. Ao iniciar a otimização o programa OTR limita o domínio da 4ª variável em, por exemplo, 50% dos perfis do banco de dados, que são justamente os perfis com seção transversal mais robusta. Assim, dificilmente a estrutura não passará no dimensionamento. Durante x gerações o programa otimizará a função objetivo dentro deste domínio, buscando refiná-la o máximo possível. Por fim, a cada x gerações o programa OTR aumenta o domínio desta variável em 10% do tamanho do banco de dados até atingir 100% do banco de dados.

Este recurso se mostrou importante em diversas otimizações. No entanto, devido à dificuldade em avaliar a sua eficiência e acreditando ser necessário realizar muitos outros testes, não foi destacada sua utilização neste trabalho.

Ainda na tela principal, o usuário pode escolher se deseja otimizar a estrutura espacial com barras cruzadas, com ou sem barras no contorno da estrutura (direção x e z), ou ligando os nós de cumeeira. Também, é permitido o uso, ou não, de tirantes ligando os pilares de apoio. Se o usuário optar por utilizar tirantes na estrutura, ele deverá escolher o diâmetro do tirante e digitar seu módulo de deformação longitudinal. Por fim, o usuário deverá fornecer a seção transversal dos pilares de apoio e com seu módulo de deformação longitudinal.

No menu da tela principal, clicando na aba "Perfil", o usuário tem acesso aos perfis cadastrados no banco de dados. Clicando duas vezes em qualquer campo da tabela abre-se outra tela na qual o usuário pode inserir, apagar ou alterar um perfil. A Figura A.7 ilustra estas duas telas.

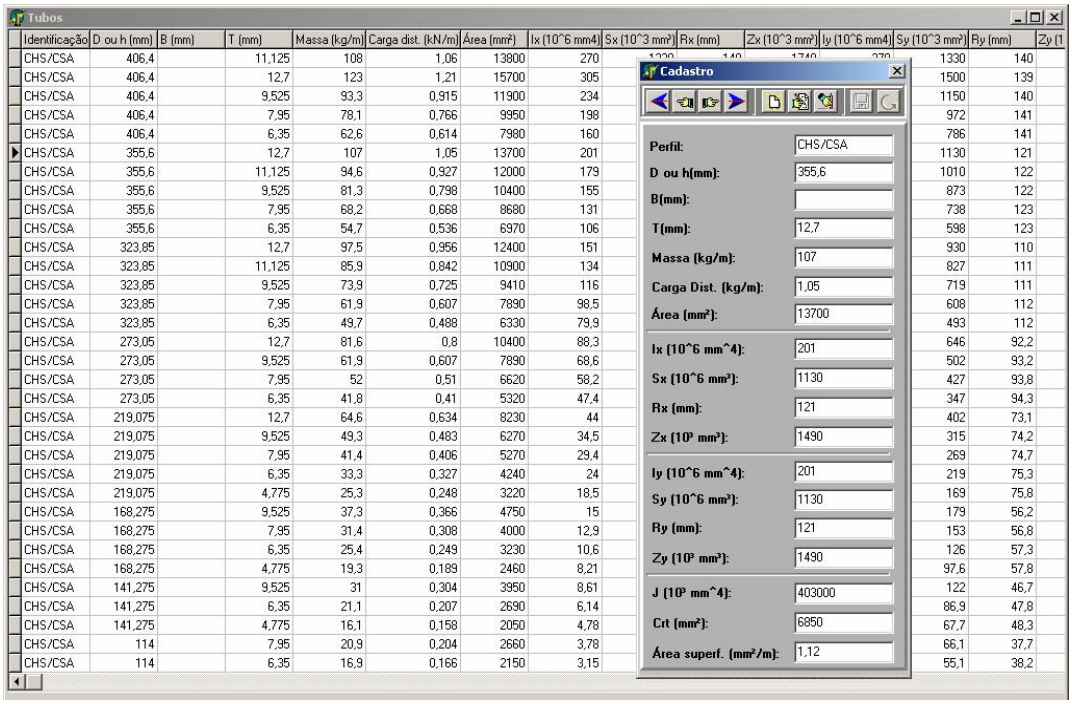



Figura A.7 – Ilustração das telas de entrada visualização e cadastro de tubos

Figura A.8 – Tela de entrada do peso próprio e da sobrecarga

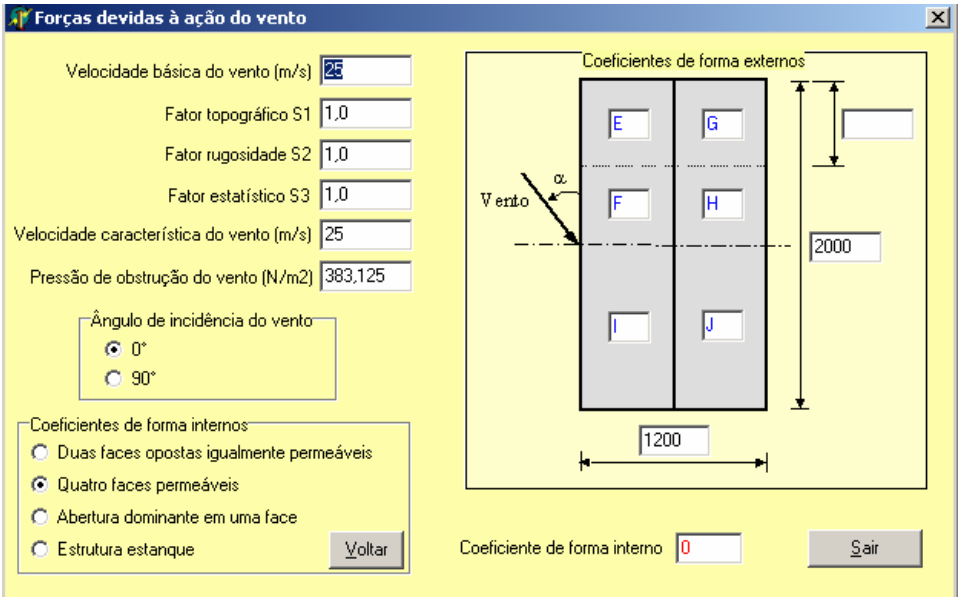



Figura A.9 – Tela de entrada dos parâmetros necessários para a definição do carregamento devido à ação do vento

O usuário também deverá definir como dado de entrada as condições gerais para o programa OTR determinar as forças aplicadas sobre os nós da estrutura. Para isto, ele deverá clicar na aba “Cargas” do menu da tela principal e abrir duas telas. A Figura A.8 ilustra a tela onde define-se o peso próprio das telhas e o valor da sobrecarga. A Figura A.9 mostra a tela para definição das forças devidas a ação de vento.

Para que o programa OTR determine as forças devidas à ação do vento, o usuário deverá entrar com a velocidade básica do vento, os fatores $S_1$, $S_2$ e $S_3$, escolher o ângulo de incidência do vento, 0 ou 90º, e escolher a condição de estanqueidade do ambiente. Para fazer a última escolha, o usuário deverá selecionar um dos itens:

- Duas faces opostas igualmente permeáveis,
- Quatro faces permeáveis,
- Abertura dominante em uma face ou,
- Estrutura estanque.

Escolhendo “Quatro faces permeáveis” ou “Abertura estanque” o programa OTR já tem as informações necessárias para definir o carregamento. Entretanto, escolhendo “Duas faces opostas igualmente permeáveis” uma nova tela é aberta, Fig. A.10.

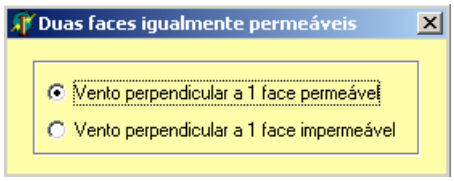



Figura A.10 – Tela “Duas faces igualmente permeáveis”

E escolhendo “Abertura dominante em uma face” abre-se a tela ilustrada na Fig. A.11.

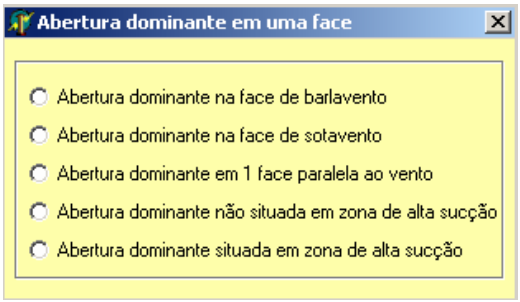



Figura A.11 – Tela “Abertura dominante em uma face”

Escolhendo a opção “Abertura dominante na face de barlavento” abre-se a tela mostrada na Fig. A.12, onde o usuário deverá escolher a proporção entre a área de todas as aberturas na face de barlavento e a área total em todas as faces submetidas a sucções externas.

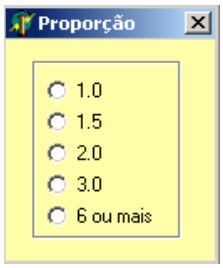



Figura A.12 – Tela “Proporção para abertura dominante na face de barlavento”

Escolhendo “Abertura dominante na face de sotavento”, “Abertura dominante em uma face paralela ao vento” ou “Abertura dominante não situada em zona de alta sucção externa”, o programa OTR determina os coeficientes de forma interno a partir dos valores dispostos na Tab. 4 da norma NBR 6123 (ABNT, 1988).

Se a escolha for “Abertura dominante em uma face paralela ao vento” ou “Abertura dominante não situada em zona de alta sucção”, o programa OTR abre uma nova janela. A Figura A.13 ilustra a janela aberta para incidência de vento a 0° e a Fig. A.14 mostra a tela para incidência de vento a 90º. Para estes casos o usuário deverá selecionar a opção correspondente ao local da abertura.

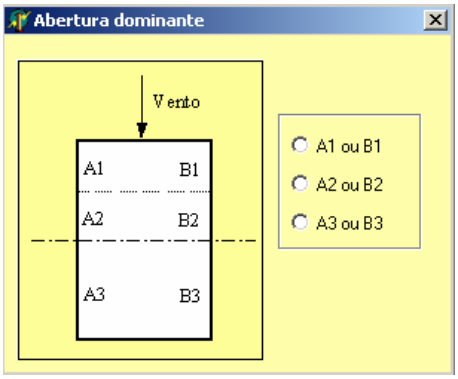



Figura A.13 – Tela “Abertura dominante” para incidência de vento a 0º

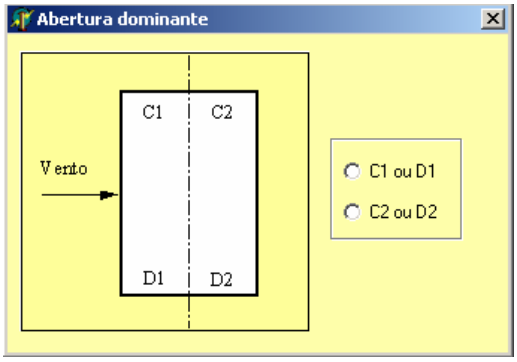



Figura A.14 – Tela “Abertura dominante” para incidência de vento a 90º

Enfim, se o usuário escolher “Abertura dominante situada em zona de alta sucção” será aberta a tela ilustrada na Fig. A.15. Nesta o usuário deverá selecionar a opção que corresponde à proporção entre a área da abertura dominante (ou área das aberturas situadas nesta zona) e a área total das outras aberturas situadas em todas as faces submetidas a sucções externas.

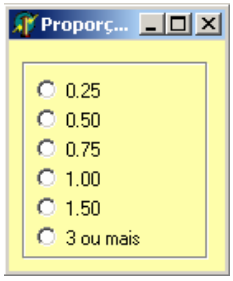



Figura A.15 – Tela “Proporção para abertura dominante situada em zona de alta sucção”

Visto que os coeficientes de forma externo depende da inclinação da cobertura, do ângulo de inclinação do vento, da relação altura dos pilares de apoio e largura do vão coberto, criou-se um banco de dados com todos os possíveis valores para estes coeficientes. Desta forma, seu valor é atualizado a cada geração de acordo com o ângulo de inclinação da cobertura para o indivíduo melhor adaptado ao problema, ou seja, com o menor valor da função objetivo.

Clicando na aba “Operadores“ do menu da tela principal, o usuário pode ainda escolher com quais operadores de mutação deseja trabalhar. A Figura A.16 ilustra a tela que permite fazer esta escolha.

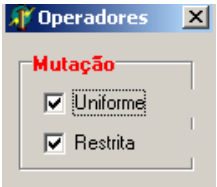



Figura A.16 – Tela “Operadores”

Iniciada a otimização, a cada geração o programa avalia todos os indivíduos da população e seleciona o indivíduo melhor adaptado ao problema, ou seja, com o maior valor de função aptidão. No caso de estruturas espaciais com barras cruzadas, o programa computacional OTR chama internamente o programa Gestrut, que determina a posição dos nós, a incidência de barras com suas propriedades físicas e geométricas e as condições de contorno da estrutura para este indivíduo. Estes dados geométricos são armazenados num arquivo do tipo texto (*.tmp). Para estruturas do tipo treliça estes dados são determinados pelo por OTR.

Em seguida, a partir dos dados geométricos do arquivo *.tmp, o programa OTR determina as forças concentradas em cada nó por área de influência para a combinação de carregamento do estado limite de utilização. Estes dados são acrescentados aos do arquivo *.tmp e armazenados em outro arquivo (*.uti). Chama-se o programa Gestrut novamente e, este calcula os deslocamentos e os esforços nas barras da estrutura e armazena estes resultados em outro arquivo texto. A partir deste arquivo OTR verifica se o deslocamento vertical máximo encontrado para a estrutura atende as recomendações da norma NBR8800 (ABNT, 1986). Caso não atenda, o indivíduo é descartado da população. Para isto impõe sua probabilidade de seleção igual a zero, retira-se da soma total das probabilidades de seleção dos indivíduos o valor de sua probabilidade e recalculam-se as probabilidades de cada indivíduo, exceto a do indivíduo descartado que deve ser zero. Dos indivíduos restantes, seleciona-se o indivíduo melhor adaptado e chama-se o programa Gestrut para determinar o arquivo de dados geométricos refazendo o processo até que um indivíduo atenda a este critério de dimensionamento.

Por outro lado, se o indivíduo atender a este critério de dimensionamento, o programa OTR calcula as forças concentradas em cada nó por área de influência para a combinação de carregamento do estado limite último e, acrescenta estes dados ao primeiro arquivo (*.tmp). A partir deste arquivo, Gestrut elabora a estrutura novamente e determina os deslocamentos dos nós e os esforços nas barras, salvando estes resultados num arquivo texto. Em seguida, o programa OTR lê este arquivo e dimensiona todas as barras da estrutura à flexocompressão ou flexotração segundo os critérios da norma NBR8800 (ABNT, 1986). Novamente, caso alguma condição não seja atendida, o indivíduo é descartado da

população. Para isto impõe-se sua probabilidade de seleção igual a zero, retira-se da soma total das probabilidades de seleção dos indivíduos o valor de sua probabilidade e recalculam-se as probabilidades de cada indivíduo exceto a sua, que deve ser nula. Dos indivíduos restantes, seleciona-se o indivíduo melhor adaptado e chama-se o Gestrut para determinar o arquivo de dados geométricos refazendo o processo até que um indivíduo atenda aos critérios de dimensionamento da norma NBR8800 (ABNT, 1986).

Após esta etapa de cálculo que exige o maior tempo computacional, procede-se com os operadores genéticos, recombinação discreta, mutação uniforme e restrita e, elitismo. O processo é repetido até que um dos critérios de parada sejam satisfeitos.

Para verificar a eficiência do programa OTR criou-se uma janela especial para otimização de funções matemáticas. A Figura A.17 ilustra esta janela que é acessada clicando na opção “Otimização” da aba “Resultados” do menu principal. Nela o usuário pode otimizar qualquer função matemática com até cinco variáveis. Percebe-se pela Fig. A.17 que o usuário pode escolher se deseja maximizar ou minimizar uma função, se esta função tem restrição ou não, se deseja utilizar o operador mutação discreta ou intermediária, e se deseja utilizar os operadores mutação uniforme e/ou restrita. Ressalta-se que para realizar as avaliações do capítulo 5 deste trabalho as funções objetivo e de restrição foram digitadas diretamente no código do programa computacional OTR.

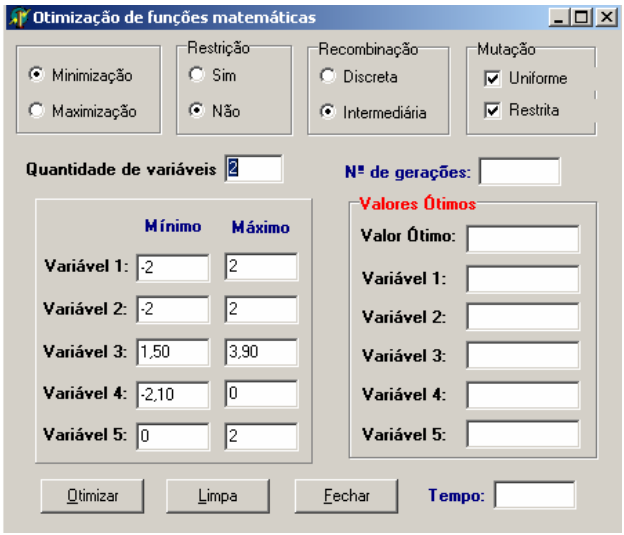



Figura A.17 – Tela para otimização de funções matemáticas