

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE
DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA

Curso de Engenharia Civil

Marcio Nelson Breunig

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS DIFERENTES
TOPOLOGIAS DE ESTRUTURAS TRELIÇADAS
UTILIZADAS EM COBERTURAS DE PAVILHÕES
INDUSTRIAIS**

Ijuí/RS

2008

Marcio Nelson Breunig

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS DIFERENTES
TOPOLOGIAS DE ESTRUTURAS TRELIÇADAS
UTILIZADAS EM COBERTURAS DE PAVILHÕES
INDUSTRIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia
Civil apresentado como requisito parcial para
obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Ijuí

2008

FOLHA DE APROVAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelos membros da banca examinadora.

Prof. Marco Antonio da Silva Pinheiro, Dr. Eng. - Orientador

Banca Examinadora

Prof.^a Cristina Eliza Pozzobon, M. Eng.
UNIJUÍ/DeTec

Prof. Luciano Pivoto Specht, Dr. Eng.
UNIJUÍ/DeTec

Dedico este trabalho a minha mãe, pelas inúmeras vezes que me deu forças para persistir na luta.

Agradeço a minha querida Jaqueline, pela paciência e compreensão.

A minha família, responsáveis por minha formação como pessoa e pelo incentivo nos momentos difíceis.

Ao Eng. Civil Ari Roque Adams, pelos conhecimentos e oportunidades oferecidas.

Aos meus amigos, pelos momentos de descontração.

A esta Faculdade e seus Professores, responsáveis por minha formação acadêmica.

A Deus, por todas as bênçãos que concedeu.

“A vida é para quem topa qualquer parada. Não para quem pára em qualquer topada.”

Bob Marley

RESUMO

Existem, atualmente, diferentes topologias de estruturas treliçadas possíveis de serem adotadas para a cobertura de pavilhões industriais, sendo que, na maioria das vezes, o engenheiro de estruturas define um modelo por sua conta e risco, sem conhecer o real comportamento da mesma, o que pode acabar elevando o custo da mesma. Desta forma, este trabalho procurou verificar qual a distribuição topológica mais econômica e com melhor eficiência estrutural, para um determinado vão livre, que deve ser adotada na construção de estruturas de aço treliçadas utilizadas em coberturas de pavilhões industriais. Este tema é de grande relevância para nortear futuros projetos, uma vez que a escolha de uma ou outra topologia sem o conhecimento do seu real comportamento possui grande impacto sobre o custo da estrutura. Para realizar este estudo, foi utilizado o software de Análise e Dimensionamento estrutural ENGMET 99.

Assim, este estudo apresenta, numa primeira parte, uma análise prática do comportamento de 12 topologias distintas, para 05 vãos livres diferentes, totalizando 105 modelos, verificando peso, eficiência e consumo de aço. Foi possível identificar que as topologias com banzos paralelos e inclinados são mais leves, consomem menos aço e são as mais eficientes. Destas topologias, a mais leve é aquela que possui o treliçado interno baseado nas treliças Warren. Já as topologias cujos banzos superiores possuem a forma de arco foram aquelas que apresentaram maior peso, menor eficiência e maior consumo de aço. No entanto, não existe uma relação direta entre peso, eficiência e consumo de aço por metro linear, ou seja, uma estrutura que possui um menor peso não necessariamente é a mais eficiente e a que menos consome aço, apesar de tender para isto.

Num segundo momento, realizou-se a otimização de parâmetros através da análise da influência do afastamento entre banzos, do afastamento do treliçado interno e da inclinação da cobertura sobre o peso e os esforços atuantes para a topologia com banzos paralelos e inclinados e treliçado interno baseado nas treliças Warren, que foi aquela considerada a mais leve dentre todas as estudadas.

Neste estudo verificou-se que para este modelo de topologia estudado, de maneira geral, quanto menor o afastamento entre banzos, menor o peso da estrutura e maiores os

esforços atuantes sobre a mesma, sendo definido com valor ideal um afastamento de 0,75m; quanto maior o afastamento do treliçado interno, menor o peso da estrutura e menor os esforços atuantes sobre a mesma, até um limite de 1,25m, sendo que a partir deste valor a estrutura começa a ter seu peso elevado novamente; e quanto maior a inclinação da cobertura, menor o peso e menor os esforços, sendo que a inclinação ideal situa-se entre 15° e 20°.

Com estes dados, relacionando-os com o vão livre (l), foi definido que o afastamento entre banzos deve ser da ordem de $\frac{l}{18}$ a $\frac{l}{20}$; o afastamento do treliçado interno deve estar entre $\frac{l}{12}$ e $\frac{l}{15}$, e a inclinação da cobertura deve estar entre 15° e 20°.

Palavras-chaves: Estruturas treliçadas, Estruturas metálicas, Otimização estrutural.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ponte Rio-Niteroi (Fonte: http://www.nitvista.com/galeria/ponte.jpg)	19
Figura 2 - Perfis produzidos nas indústrias siderúrgicas (Fonte: PINHEIRO, 2003, p. 02).....	20
Figura 3 - Perfis produzidos nas indústrias mecânicas (Fonte: PINHEIRO, 2003, p. 02)	21
Figura 4 - Treliça inglesa ou Howe (Fonte: PFEIL, 2000, p.26).....	22
Figura 5 - Grelha plana (Fonte: PFEIL, 2000, p.26)	22
Figura 6 - Pórtico típico de edificações (Fonte: PFEIL, 2000, p.26)	23
Figura 7 - Esquema tridimensional de um galpão metálico (Fonte: PFEIL, 2000, p.27).....	23
Figura 8 - Elementos de uma treliça (Fonte: Adapt. PFEIL, 2000, p.194)	25
Figura 9 - Treliça Pratt.....	26
Figura 10 - Treliça Howe.....	26
Figura 11 - Treliça Warren	26
Figura 12 - Viga treliçada de eixo reto com tirante.....	27
Figura 13 - Ligação de nós de treliça com chapa “gusset”.....	27
Figura 14 - Topologias estudadas.....	36
Figura 15 - Fluxograma de procedimento de trabalho	40
Figura 16 - Tesoura Inglesa - Vão de 5,0m	44
Figura 17 - Entrada de dados inicial.....	45
Figura 18 - Aplicação de seções transversais às barras	48
Figura 19 - Aplicação da vinculação e restrições na estrutura	48
Figura 20 - Gráfico de deformações	49
Figura 21 - Distribuição cromática dos esforços	50
Figura 22 - Definição do tipo de perfil das peças.....	51
Figura 23 - Resultado do pré-dimensionamento.....	52
Figura 24 - Cromatografia da eficiência.....	53
Figura 25 - Detalhe da impossibilidade construtiva que ocorre no pré-dimensionamento	53
Figura 26 - Eficiência da estrutura com perfis padronizados	54
Figura 27 - Pesos das topologias – Vão livre de 5,0m; inclinação 10°.....	58

Figura 28 - Pesos das topologias – Vão livre de 5,0m; inclinação 15°.....	59
Figura 29 - Eficiência das topologias – Vão livre de 5,0m; inclinação 10°.....	60
Figura 30 - Eficiência das topologias – Vão livre de 5,0m; inclinação 15°.....	61
Figura 31 - Consumo de aço das topologias, para vão livre de 5,0m.....	62
Figura 32 - Pesos das topologias – Vão livre de 10,0m; inclinação 10°.....	63
Figura 33 - Pesos das topologias – Vão livre de 10,0m; inclinação 15°.....	64
Figura 34 - Eficiência das topologias – Vão livre de 10,0m; inclinação 10°.....	65
Figura 35 - Eficiência das topologias – Vão livre de 10,0m; inclinação 15°.....	66
Figura 36 - Consumo de aço das topologias, para vão livre de 10,0m.....	67
Figura 37 - Pesos das topologias – Vão livre de 15,0m; inclinação 10°.....	68
Figura 38 - Pesos das topologias – Vão livre de 15,0m; inclinação 15°.....	68
Figura 39- Eficiência das topologias – Vão livre de 15,0m; inclinação 10°.....	69
Figura 40 - Eficiência das topologias – Vão livre de 15,0m; inclinação 15°.....	70
Figura 41 - Consumo de aço das topologias, para vão livre de 15,0m.....	71
Figura 42 - Pesos das topologias – Vão livre de 20,0m; inclinação 10°.....	73
Figura 43 - Pesos das topologias – Vão livre de 20,0m; inclinação 15°.....	73
Figura 44- Eficiência das topologias – Vão livre de 20,0m; inclinação 10°.....	74
Figura 45 - Eficiência das topologias – Vão livre de 20,0m; inclinação 15°.....	75
Figura 46 - Consumo de aço das topologias, para vão livre de 20,0m.....	76
Figura 47 - Pesos das topologias – Vão livre de 25,0m; inclinação 15°.....	77
Figura 48 - Pesos das topologias – Vão livre de 25,0m; inclinação 15°.....	77
Figura 49 - Eficiência das topologias – Vão livre de 25,0m; inclinação 10°.....	78
Figura 50 - Eficiência das topologias – Vão livre de 25,0m; inclinação 15°.....	79
Figura 51 - Consumo de aço das topologias, para vão livre de 25,0m.....	80
Figura 52 - Topologias do grupo C com tirantes.....	81
Figura 53 - Afastamento entre banzos X Peso de aço.....	84
Figura 54 - Afastamento entre banzos X Esforços atuantes - Hipótese 01.....	85
Figura 55 - Afastamento entre banzos X Esforços atuantes - Hipótese 02 e 03.....	85
Figura 56 - Afastamento entre banzos X Esforços atuantes - Hipótese 04.....	86

Figura 57 - Afastamento entre banzos X Esforços atuantes - Hipótese 05	86
Figura 58 - Interterças X Peso de aço.....	88
Figura 59 - Interterças X Eficiência global	88
Figura 60 - Interterças X Esforços atuantes - Hipótese 01	89
Figura 61 - Interterças X Esforços atuantes - Hipótese 02 e 03	89
Figura 62 - Interterças X Esforços atuantes - Hipótese 04	90
Figura 63 - Interterças X Esforços atuantes - Hipótese 05	90
Figura 64- Inclinação dos banzos (Cobertura) X Peso de aço.....	92
Figura 65 - Inclinação dos banzos (Cobertura) X Eficiência global	92
Figura 66 – Inclinação dos banzos (Cobertura) X Esforços atuantes - Hipótese 01	93
Figura 67 - Inclinação dos banzos (Cobertura) X Esforços atuantes - Hipóteses 02 e 03.....	93
Figura 68 - Inclinação dos banzos (Cobertura) X Esforços atuantes - Hipótese 04.....	93
Figura 69 - Inclinação dos banzos (Cobertura) X Esforços atuantes - Hipótese 05.....	94
Figura 70- Análise de pesos na otimização	98
Figura 71 - Análise da eficiência na otimização.....	98
Figura 72 - Análise do consumo de aço na otimização	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados geométricos das topologias estudadas.....	36
Tabela 2 - Coeficientes eólicos.....	38
Tabela 3 - Hipóteses de carregamentos	47
Tabela 4 - Resultado do pré-dimensionamento	51
Tabela 5 - Padronização dos elementos estruturais	54
Tabela 6 - Resultado do dimensionamento final	55
Tabela 7- Coeficientes de cálculo.....	91
Tabela 8 - Principais dimensões das estruturas otimizadas.....	97

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

γ_g – Coeficiente de ponderação da ação permanente

γ_{q1} – Coeficiente de ponderação da ação variável predominante

γ – Coeficiente de ponderação das ações

Ψ – Fator de combinação, é um fator estatístico que leva em conta a frequência da ocorrência simultânea de cargas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CSN – Companhia Siderúrgica Nacional

E – Ação excepcional

G – Ação permanente

K – Parâmetro utilizado no cálculo de comprimento de flambagem

MPa – Mega Pascal

NB – Norma Brasileira

NBR – Norma Brasileira Registrada

ϕ – Coeficiente de minoração da resistência do material

Q – Ação variável

Q_1 – Ação variável predominante

R_d – Resistência de cálculo

R_n – Resistência nominal do material

S – Esforço nominal

S_1 – Fator topográfico de ação do vento

S_2 – Fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação ou parte da edificação em estudo, e de sua altura sobre o terreno, para ação de vento

S_3 – Fator baseado em conceitos probabilísticos, na aplicação de ação de vento

S_d – Solicitação de cálculo

SI – Sistema Internacional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Tema da Pesquisa	15
1.2 Delimitação do Tema	15
1.3 Formulação da questão de estudo	15
1.4 Justificativas	15
1.5 Objetivos	16
1.5.1 <i>Objetivo geral</i>	16
1.5.2 <i>Objetivos específicos</i>	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Sistemas estruturais em aço	18
2.2 Vigas em treliças	25
2.3 Métodos de análise para treliças isostáticas	28
2.4 Segurança: Método dos Estados Limites	29
2.5 Otimização estrutural	31
2.5.1 <i>Emprego de software no processo de otimização estrutural</i>	32
2.5.2 <i>Algumas aplicações da otimização</i>	34
3. METODOLOGIA.....	35
3.1 Classificações do estudo	35
3.2 Planejamento da pesquisa.....	35
3.2.1 <i>Identificação das topologias e verificação do desempenho</i>	35
3.2.2 <i>Identificação da estrutura com melhor eficiência e menor peso</i>	40
3.2.3 <i>Otimização da estrutura com melhor eficiência e menor peso</i>	41
3.3 Materiais e/ou equipamentos utilizados na pesquisa.....	41
4. PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL ..	42
4.1 Descrição do software ENGMET 99	42
4.2 Procedimentos para análise estrutural	44
4.3 Dimensionamento do pórtico com o ENGMET 99	50
5. RESULTADOS DA ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL	56
5.1 Análise das topologias para vão de 5,0m	58
5.1.1 <i>Peso de aço</i>	58
5.1.2 <i>Eficiência global</i>	60
5.1.3 <i>Consumo de aço</i>	61
5.2 Análise das topologias para vão de 10,0m.....	63
5.2.1 <i>Peso de aço</i>	63
5.2.2 <i>Eficiência global</i>	64
5.2.3 <i>Consumo de aço</i>	66
5.3 Análise das topologias para vão de 15,0m.....	67
5.3.1 <i>Peso de aço</i>	67
5.3.2 <i>Eficiência global</i>	69
5.3.3 <i>Consumo de aço</i>	71
5.4 Análise das topologias para vão de 20,0m.....	72
5.4.1 <i>Peso de aço</i>	72
5.4.2 <i>Eficiência global</i>	74

5.4.3	Consumo de aço.....	75
5.5	Análise das topologias para vão de 25,0m.....	76
5.5.1	Peso de aço.....	76
5.5.2	Eficiência global.....	78
5.5.3	Consumo de aço.....	79
5.6	Considerações gerais.....	80
6.	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL.....	83
6.1	Afastamento entre banzos.....	83
6.2	Afastamento do treliçado interno (Interterças).....	87
6.3	Inclinação dos banzos (Cobertura).....	91
6.4	Correlações.....	94
6.4.1	Afastamento entre banzos.....	95
6.4.2	Afastamento do treliçado interno (Interterças).....	96
6.4.3	Inclinação dos banzos (Cobertura).....	96
6.5	Aplicação das correlações.....	96
6.6	Considerações gerais.....	99
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	101
7.1	Conclusões do trabalho.....	101
7.1.1	Análise e dimensionamento estrutural.....	101
7.1.2	Otimização estrutural.....	102
7.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	103
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
	APÊNDICE 01.....	106
	APÊNDICE 02.....	119
	APÊNDICE 03.....	130
	APÊNDICE 04.....	133
	APÊNDICE 05.....	137
	APÊNDICE 06.....	139
	APÊNDICE 07.....	142

1. INTRODUÇÃO

1.1 Tema da Pesquisa

O tema da pesquisa é análise de estruturas treliçadas.

1.2 Delimitação do Tema

O tema deste trabalho limita-se a investigação, por meio da utilização de software de análise e dimensionamento estrutural, do comportamento estrutural de diferentes topologias atualmente adotadas em estruturas metálicas treliçadas, utilizadas para suporte de cobertura de pavilhões industriais.

1.3 Formulação da questão de estudo

Qual a distribuição topológica mais econômica e com melhor eficiência estrutural, para um determinado vão livre, que deve ser adotada no dimensionamento de estruturas de aço treliçadas utilizadas em coberturas de pavilhões industriais?

1.4 Justificativas

Após definido o projeto arquitetônico, o engenheiro de estruturas deve verificar qual modelo estrutural, dentro das especificações estabelecidas por norma e pelas limitações construtivas impostas pelo projeto, possui a melhor eficiência estrutural, observando sempre a necessidade de tornar a estrutura a mais econômica possível.

Com isso, num primeiro momento, o engenheiro deve fazer o lançamento da estrutura, gerando uma distribuição dos diversos elementos estruturais de forma a atender as solicitações atuantes na mesma. A distribuição geométrica destes elementos, comumente designada de topologia, é determinante para se obter um comportamento estrutural ótimo, e conseqüentemente, uma estrutura “enxuta” e econômica.

A grande diversidade de modelos topológicos disponíveis, aliada a falta de informações sobre o comportamento destas topologias em serviço, aumenta as chances de o profissional adotar modelos impróprios para as solicitações exigidas, muitas vezes projetando estruturas inviáveis economicamente e com eficiência estrutural prejudicada.

Ainda, através de processos de otimização, é possível diminuir a extração da matéria prima do aço, material este retirado das reservas naturais de minério, e que, portanto, podem vir a tornarem-se escassas num futuro próximo. Também o processo de padronização, gera qualidade e eficiência para os processos construtivos, gerando assim, mais uma vez, economia.

Desta forma, além da constante preocupação na redução de custos, sem deixar de lado a qualidade e a eficiência de um projeto, justifica-se o tema de pesquisa deste trabalho, o qual busca analisar o comportamento de algumas topologias de estruturas treliçadas utilizadas para cobertura de pavilhões industriais, para diferentes vãos, criando uma relação entre disposição geométrica, vão livre e eficiência estrutural.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é verificar o comportamento estrutural de algumas distribuições geométricas (topologias) freqüentemente adotadas na construção de coberturas para pavilhões industriais, buscando identificar qual dessas topologias conduz a melhor eficiência estrutural e econômica.

1.5.2. Objetivos específicos

- Identificar as distribuições geométricas (topologias) de estruturas treliçadas para coberturas de pavilhões industriais mais utilizadas;
- Determinar os perfis geométricos para cada modelo estudado;
- Criar um estudo de referência para projetos futuros que possuam características semelhantes aquelas aqui estudadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas estruturais em aço

Desde a antiguidade, o homem vem desenvolvendo sistemas construtivos que satisfaçam suas necessidades, buscando novos materiais e métodos construtivos. Neste sentido, o primeiro material siderúrgico empregado na construção foi o ferro fundido, na construção de pontes em arco ou treliçadas, entre 1780 e 1820, com elementos em ferro fundido trabalhando em compressão. Em fins do século XVIII o ferro laminado já fora utilizado na construção de pontes suspensas. Ainda hoje, devido à boa resistência à corrosão desse metal, várias obras desse tipo de material se encontram em perfeito estado de conservação. Em meados do século XIX declinou o uso do ferro fundido em favor do ferro laminado, que oferecia maior segurança. Entretanto, devido ao grande número de acidentes que ocorreram mesmo em obras que utilizaram este material, entre os anos de 1850 e 1880, partiu-se em busca de um material com melhores características. Desta forma, o aço, conhecido desde a antiguidade, passou a substituir o ferro fundido e o laminado na indústria da construção, graças aos estudos realizados pelo inglês Henry Bessemer, que inventou, em 1856, um forno que permitiu a produção de aço em longa escala, tornando-o assim um material com custo competitivo com os demais materiais empregados na época.

Até o ano de 1950, utilizava-se quase exclusivamente o aço-carbono com resistência a ruptura de cerca de 370 MPa. A partir desta data, começou-se a introduzir no mercado materiais de maior resistência. Entre 1960 e 1970 difundiu-se o emprego de aços de baixa liga, sem ou com tratamento térmico. Estruturas modernas, de grande porte, utilizam aços de diferentes categorias, aplicando aqueles mais resistentes nos pontos de maiores solicitações.

No Brasil, a indústria siderúrgica foi implantada somente após a Segunda Guerra Mundial, com a construção da Usina Presidente Vargas da CSN, em Volta Redonda, no Estado do Rio de Janeiro. Atualmente, o país dispõe de modernas e equipadas siderúrgicas, capazes de produzir estruturas de grande porte. Com o desenvolvimento da ciência das construções e da metalurgia, as estruturas metálicas adquiriram formas funcionais e arrojadas,

constituindo-se em verdadeiros trunfos da tecnologia. Como exemplo, no Brasil pode-se citar a ponte Rio-Niterói (Figura 01), uma estrutura mista que possui vãos laterais de 200m e vão central de 300m.



Figura 1 - Ponte Rio-Niteroi (Fonte: <http://www.nitvista.com/galeria/ponte.jpg>)

Na construção civil, são utilizados quase que exclusivamente os aços estruturais, que possuem características como resistência, ductilidade, fadiga, entre outros, tornando-se capazes de suportar diferentes tipos de cargas. Estas propriedades, ditas mecânicas, são as mais importantes deste tipo de aço.

“As propriedades mecânicas definem o comportamento dos aços quando sujeitos a esforços mecânicos e correspondem as propriedades que determinam a sua capacidade de resistir e transmitir os esforços que lhe são aplicados, sem romper ou sem que ocorram deformações sucessivas” (DIAS, 1998, p. 24).

Os aços estruturais são produzidos sob diversas formas, como chapas, barras, perfis laminados, fios trefilados, cordoalhas e cabos. Podem também ser obtidos através do dobramento de chapas e por associação de chapas através de solda. São, de maneira geral, classificados de acordo com sua forma de obtenção, podendo ser designados como “perfis laminados ou conformados a quente”, “perfis de chapa dobrada ou conformados a frio” e “perfis soldados”.

As indústrias siderúrgicas nacionais produzem inúmeros tipos de perfis, dentre os quais se destacam, conforme Figura 2:

- (a) Cantoneira de abas iguais;
- (b) Cantoneira de abas desiguais;

- (c) Perfil H ou duplo Tê;
- (d) Perfil I ou duplo Tê;
- (e) Perfil T;
- (f) Perfil U, ou canal;
- (g) Barra redonda;
- (h) Barra chata;
- (i) Tubo circular;
- (j) Tubo quadrado ou retangular.

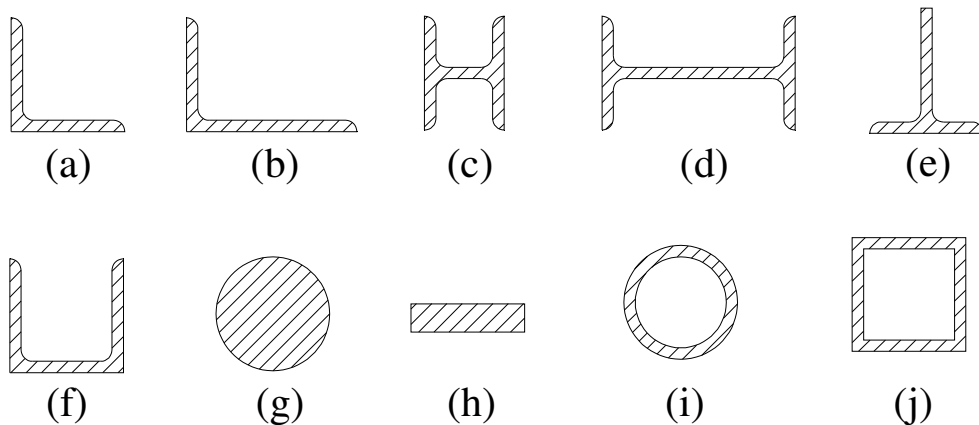


Figura 2 - Perfis produzidos nas indústrias siderúrgicas (Fonte: PINHEIRO, 2003, p. 02)

As indústrias metalúrgicas produzem perfis compostos de chapas dobradas ou chapas soldadas, sendo os mais comuns os abaixo discriminados e identificados na Figura 3:

- (a) Perfil U, canal ou C;
- (b) Perfil U enrijecido;
- (c) Cantoneira;
- (d) Perfil cartola;
- (e) Perfil Z;
- (f) Chapas trapezoidais;

(g) Tê soldado

(h) Duplo Tê soldado.

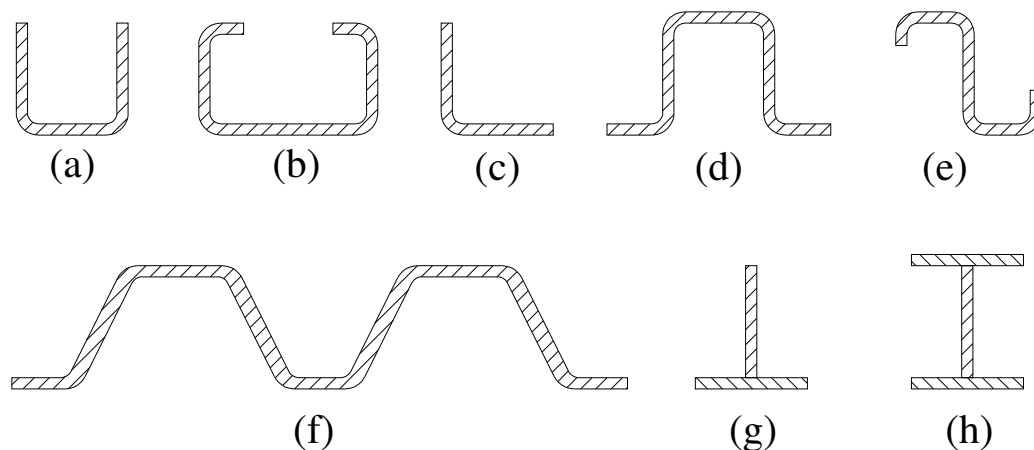


Figura 3 - Perfis produzidos nas indústrias mecânicas (Fonte: PINHEIRO, 2003, p. 02)

Para garantir a qualidade, as características mecânicas e químicas dos materiais produzidos nas diferentes indústrias (siderúrgicas e metalúrgicas), bem como as metodologias para o cálculo estrutural e o detalhamento em nível de projeto executivo, existem entidades normativas que determinam estes fatores.

No Brasil adota-se o SI, e a entidade normativa para a atividade que envolva estruturas metálicas é a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. A norma técnica utilizada é a NB 14/NBR 8800 (ABNT, 1986). Existem normas complementares utilizadas no dimensionamento estrutural, dentre elas a NBR 8681 (ABNT, 1984); NBR 6120 (ABNT, 1980) e NBR 6123 (ABNT, 1988).

A estrutura é a parte de uma edificação que tem a função de resistir às cargas atuantes sobre a mesma, sendo que deve resistir aos esforços incidentes, transmitindo os mesmos até o solo, por meio de vínculos que unem cada componente estrutural.

Os principais elementos estruturais metálicos podem ser definidos como elementos lineares alongados, denominados de hastes ou barras, e ainda como elementos bidimensionais, geralmente denominados elementos planos, constituídos por placas ou chapas. As chapas são elementos de espessura pequena em relação à largura e ao comprimento, e são utilizadas isoladamente, ou ainda como elementos constituintes de sistemas planos ou espaciais.

As hastes formam elementos cujas dimensões transversais são pequenas em relação ao comprimento, e podem, de acordo com as solicitações predominantes, ser classificadas em tirantes, colunas, vigas ou eixos. Estes elementos, quando combinados, formam os sistemas lineares, e constituem as estruturas portantes das construções civis. Podem formar treliças, grelhas ou pórticos.

As treliças (Figura 04) são sistemas utilizados tipicamente em coberturas de edifícios industriais (galpões). Nelas, as hastes trabalham a tração ou compressão simples.

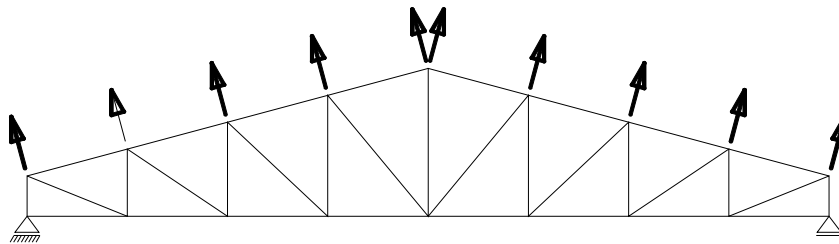


Figura 4 - Treliça inglesa ou Howe (Fonte: PFEIL, 2000, p.26)

A grelha plana (Figura 05) é formada por dois feixes de vigas, ortogonais ou oblíquas, suportando conjuntamente cargas atuando na direção perpendicular ao plano da grelha. São usadas em pisos de edifícios e superestruturas de pontes.

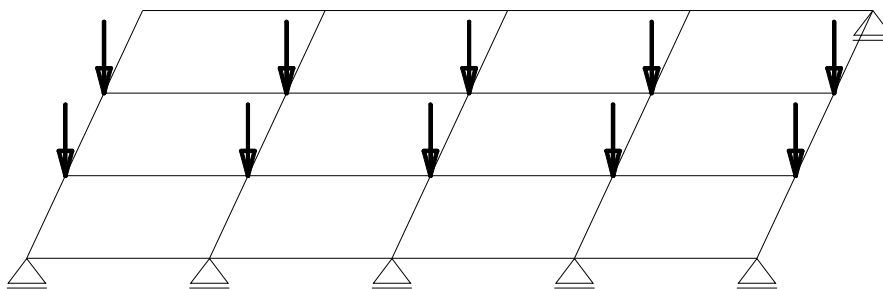


Figura 5 - Grelha plana (Fonte: PFEIL, 2000, p.26)

Os pórticos são formados por associação de hastes retilíneas ou curvilíneas com ligações rígidas entre si. A Figura 06 apresenta um sistema estrutural em pórtico típico de edificações.

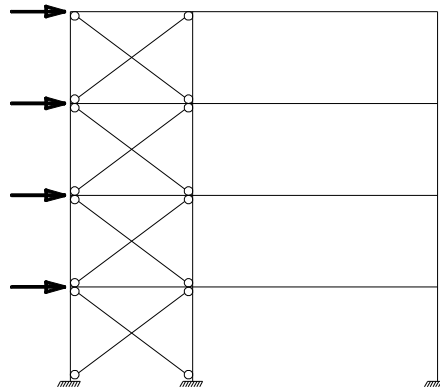


Figura 6 - Pórtico típico de edificações (Fonte: PFEIL, 2000, p.26)

Na Figura 7 pode-se identificar os principais componentes que formam um galpão metálico. O sistema portante principal é formado pela associação rígida da treliça de cobertura e duas colunas verticais. As terças são vigas longitudinais dispostas nos planos da cobertura, com função de transferir a treliça de cobertura às cargas atuantes naqueles planos. Sistemas de contra-ventamento são geralmente barras associadas em “X”, formando sistemas treliçados, com objetivo de fornecer estabilidade espacial ao conjunto e melhor distribuir as cargas de vento.

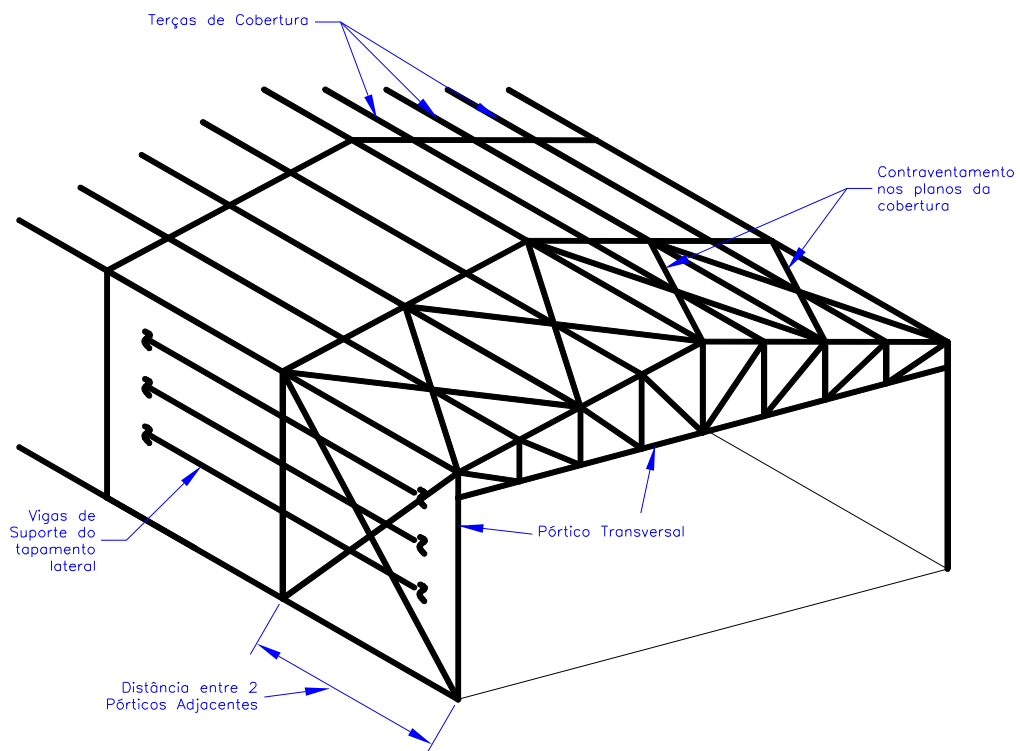


Figura 7 - Esquema tridimensional de um galpão metálico (Fonte: PFEIL, 2000, p.27)

Os sistemas planos de elementos bidimensionais são constituídos por chapas dobradas ou reforçadas por enrijecedores soldados, sendo muito utilizadas como lajes em pontes de grandes vãos, para reduzir o peso próprio da estrutura.

Segundo Pinheiro (2003), em relação aos demais sistemas construtivos, as estruturas metálicas possuem algumas vantagens e desvantagens, sendo:

- Vantagens:
 - Fabricação das estruturas com precisão milimétrica, possibilitando um alto controle de qualidade do produto acabado;
 - Garantia das dimensões e propriedades dos materiais;
 - Material resistente a vibração e choques;
 - Possibilidade de execução de obras mais rápidas e limpas;
 - Em caso de necessidade, possibilita a desmontagem das estruturas e sua posterior montagem em outro local;
 - Alta resistência estrutural, possibilitando a execução de estruturas leves para vencer grandes vãos;
 - Possibilidade de reaproveitamento dos materiais em estoque, ou mesmo, sobras de obra.

- Desvantagens:
 - Limitação de execução em fábrica em função do transporte até o local de sua montagem final;
 - Necessidade de tratamento superficial das peças contra oxidação devido ao contato com o ar atmosférico;
 - Necessidade de mão-de-obra e equipamentos especializados para sua fabricação e montagem;
 - Limitação de fornecimento de perfis estruturais.

Desta forma, pode-se definir que as estruturas metálicas, possuem uma enorme variedade de aplicações onde podem lograr êxito, como em telhados, pontes e viadutos, escadas, mezaninos, torres, edifícios comerciais e industriais, passarelas, indústria naval, guindastes, hangares, entre outros.

2.2 Vigas em treliças

Treliças são estruturas de barras ligadas entre si por nós articulados, que formam uma configuração geométrica estável, de forma triangular, cujas cargas se aplicam nesses mesmos nós. Com isso, resultam como esforço solicitante nas barras unicamente forças normais. Devido a este fato, deve-se garantir que as articulações nodais sejam articuladas. Todas as barras devem concorrer somente em um único ponto, para evitar, teoricamente, o surgimento de momentos solicitantes nas barras. As treliças podem ser isostáticas (estaticamente determinada) ou hiperestáticas (estaticamente indeterminada).

As treliças têm campo de aplicação muito vasto: são usadas nas estruturas de cobertura, desde vãos pequenos a médios, como nas edificações residenciais e industriais, até grandes vãos, como nas coberturas de estádios, de estações metroviárias; são também usadas nas pontes rodoviárias e ferroviárias.

Do ponto de vista estrutural elas podem ser planas ou espaciais, e são constituídas usualmente de madeira, aço e, em menor grau, de concreto armado ou protendido.

A Figura 8 apresenta os principais elementos que compõem uma treliça plana.

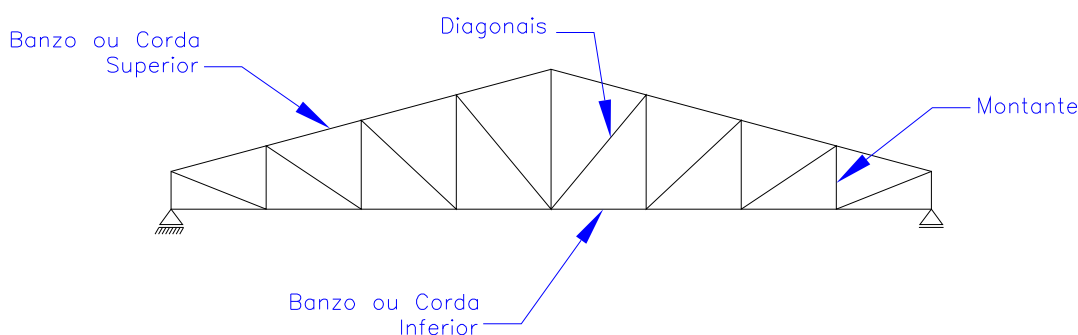


Figura 8 - Elementos de uma treliça (Fonte: Adapt. PFEIL, 2000, p.194)

Em geral, treliças utilizadas em coberturas possuem o banzo superior inclinado, e as utilizadas em apoios de pisos e pontes possuem banzos paralelos. As configurações geométricas mais utilizadas são:

a) Treliça Pratt, mostrada na Figura 9, onde as diagonais são tracionadas e os montantes comprimidos;

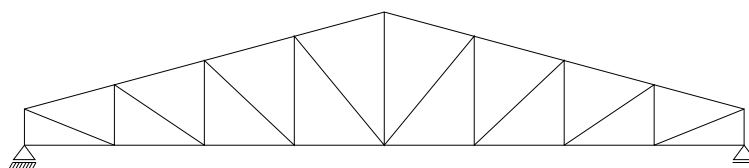


Figura 9 - Treliça Pratt

b) Treliça Howe, apresentada na Figura 10, onde os montantes são tracionados e as diagonais comprimidas;

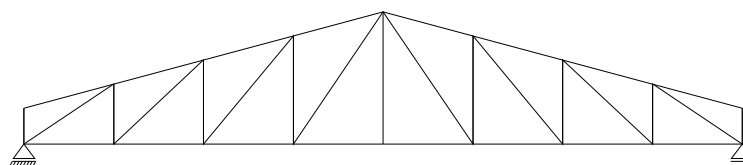


Figura 10 - Treliça Howe

c) Treliça Warren, formada por triângulos isósceles, como pode ser visto na Figura 11. Neste tipo de treliça não existem montantes verticais.

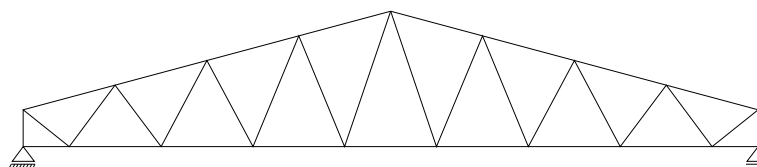


Figura 11 - Treliça Warren

Existem ainda diversas outras configurações que podem ser utilizadas, como a treliça Fink, treliça francesa, treliça em tesoura e as vigas treliçadas. Também podem formar peças estruturais, substituindo as vigas de alma cheia, sejam de eixo curvo, como nos arcos

treliçados, ou de eixo reto. Nestes casos, normalmente existem tirantes que auxiliam a resistir aos esforços, como apresentado na Figura 12.

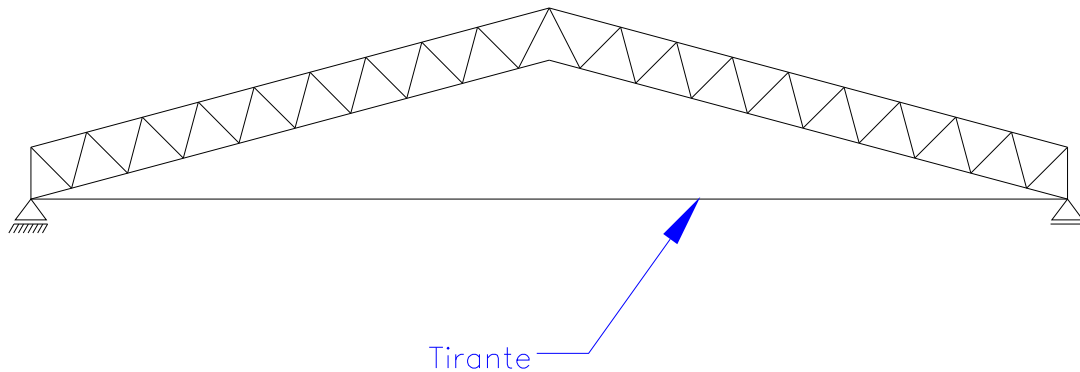


Figura 12 - Viga treliçada de eixo reto com tirante

As treliças, de maneira geral, são constituídas de perfis laminados, que podem ser dispostos de forma única, ou agrupados. Os perfis normalmente utilizados são cantoneiras, Perfil “U”, Perfil “T” e ainda de tubos, que podem ser compostos por solda ou parafusos.

Normalmente, pode-se considerar como treliças leves aquelas formadas por perfis simples, já aquelas que são formadas por perfis duplos são consideradas treliças médias. Com quatro perfis, obtêm-se treliças com maior capacidade. Em pontes são utilizadas as treliças pesadas, constituídas de perfis “T” soldados ou perfis fechados.

Em geral, são utilizadas treliças leves, que possuem um baixo consumo de material. De qualquer forma, em pontes ou coberturas de edificações, deve-se contraventar às mesmas para garantir a segurança destes elementos.

As barras das treliças são presas, formando os nós, através de chapas, denominadas de “gussets”, conforme Figura 13.

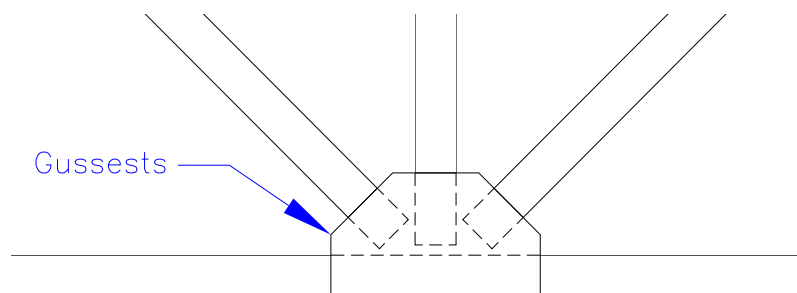


Figura 13 - Ligação de nós de treliça com chapa “gusset”

2.3 Métodos de análise para treliças isostáticas

Normalmente, no modelo de cálculo utilizado em treliças, as cargas são aplicadas nos nós e as ligações entre barras são rotuladas, permitindo a rotação entre as barras e evitando a transmissão de momentos fletores. Construtivamente, utilizavam-se pinos na ligação dos nós, o que tornava a estrutura cara e, ainda assim, havia a produção de atrito, que acabava impedindo o funcionamento da rótula proposta.

Atualmente, eliminaram-se os pinos de ligação, e todos os nós são rígidos. Esta aplicação pode ser considerada de boa precisão, apesar de o cálculo levar em conta os nós como articulados. Isto é possível devido ao baixo peso próprio das barras, que é transposto para os nós de forma estaticamente equivalente, e, apesar deste sistema causar momentos fletores nestas barras, devido ao fato das estruturas serem esbeltas, possuem pequena rigidez a flexão, tornando estes momentos baixos e possíveis de serem desprezados, desde que não exista efeito de fadiga.

Estes momentos causam as tensões secundárias nas barras. Para garantir que estas tensões sejam baixas, é necessário que os eixos das barras sejam dispostos de modo a concorrerem nos respectivos nós, onde devem ser aplicadas as cargas.

Em casos onde existe excentricidade nas ligações dos nós, ou ainda ocorra à existência de uma carga aplicada entre os nós, é necessário considerar os efeitos destes momentos. Além disso, devido à existência de compressão nas barras que compõem as treliças, deve-se ter o cuidado em combater também a ocorrência de instabilidade por efeito da esbeltez destas barras comprimidas, que pode ser flambagem local no plano da treliça, ou ainda flambagem lateral da treliça como um todo.

Em geral, em casos de treliças usuais, onde não há problemas com fadiga, em que não existe excentricidade nas ligações dos nós, adota-se o modelo tradicional de treliça para cálculo de esforços axiais. Nestes casos, o comprimento de flambagem entre os nós é considerado ideal, $K=1$, e os momentos fletores devido à rigidez dos nós não são considerados.

O dimensionamento das barras que compõem as treliças deve ser feito considerando os critérios de barras tracionadas ou barras comprimidas, de acordo com a solicitação imposta no elemento a ser analisado.

Existem diversos métodos de análise que podem ser utilizados em estruturas treliçadas isostáticas, dentre os quais podem ser citados o método de equilíbrio dos nós, o método de Ritter, também conhecido como método das seções e o método de Cremona. Para uma dada situação deve ser elaborado um estudo de forma adotar o método que melhor se encaixe nas condições existentes.

2.4 Segurança: Método dos Estados Limites

Para garantir a segurança, a NB 14/NBR 8800 (ABNT, 1986) adota para o dimensionamento das estruturas de aço, o método dos estados limites. Pode-se definir como estado limite, aquele em que a estrutura passa a não mais satisfazer alguma das condições impostas à mesma. Definem-se dois tipos de estados limites, sendo:

- Estados limites últimos: aqueles associados à ocorrência de cargas excessivas e conseqüentemente ao colapso da estrutura.
- Estados limites de utilização: são aqueles associados a carga em serviço, como a ocorrência de deformações ou vibrações excessivas, provocando efeitos incompatíveis com as condições de uso das estruturas.

No método dos estados limites últimos, tem-se que a solicitação de cálculo S_d deve ser menor que a resistência de cálculo R_d .

$$S_d \leq R_d$$

A resistência de cálculo R_d é definida através da minoração da resistência nominal R_n do material, sendo obtida pela equação:

$$R_d = \phi R_n,$$

onde ϕ é o coeficiente de minoração da resistência do material.

A solicitação de cálculo S_d é obtida através da majoração das cargas nominais decorrentes das diversas ações a que a estrutura está sujeita, onde:

$$S_d = \gamma S,$$

onde γ é o coeficiente de ponderação das ações.

As ações que atuam sobre a estrutura são estipuladas pelas normas apropriadas e são conseqüência das condições estruturais, podendo ser classificadas em:

- Ações permanentes (G) – Peso próprio, revestimentos, equipamentos, etc.;
- Ações variáveis (Q) – sobrecarga de ocupação, vento em coberturas, mobília, variação da temperatura, entre outros;
- Ações excepcionais (E) – explosões, choques de veículos, abalo sísmico, etc.

Nos casos normais e durante a construção, a solicitação de cálculo S_d deve ser obtida pela combinação:

$$S_d = \sum \gamma_g G + \gamma_{q1} Q_1 + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_j Q_j),$$

onde γ_g é o coeficiente de ponderação da ação permanente, γ_q o coeficiente de ponderação da ação variável predominante e ψ um fator de combinação, que é um fator estatístico que leva em conta a freqüência da ocorrência simultânea de cargas.

Quando houver carga excepcional, deve-se considerar a combinação:

$$S_d = \sum \gamma_g G + E + \sum (\gamma_q \psi Q),$$

onde γ_g é o coeficiente de ponderação da ação permanente, γ_q o coeficiente de ponderação da ação variável predominante e ψ um fator de combinação, que é um fator estatístico que leva em conta a freqüência da ocorrência simultânea de cargas.

2.5 Otimização estrutural

Segundo Novotny et al. (2001), classicamente, no processo de concepção de um novo produto o projetista tem se amparado, quase que unicamente, na própria intuição e experiência adquiridas na solução de outros problemas caracterizando, portanto, um processo de tentativa e erro onde a evolução é extremamente lenta. Processos mais modernos buscam a utilização de uma metodologia que possa sistematizar as atividades de projeto. As técnicas de otimização, em relação a este aspecto, são muito atraentes, uma vez que permitem formular matematicamente um problema de busca da melhor solução dentre todas as possíveis. No caso de projetos de estruturas, o problema pode ser definido como encontrar a geometria ótima, sua forma e/ou topologia, de acordo com alguma medida de desempenho, normalmente em função do custo.

Souza Jr. (2005, p. 09) define que “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”.

De fato, a otimização estrutural é uma necessidade do engenheiro projetista, uma vez que certamente é através dela que o mesmo poderá determinar uma estrutura aceitável as limitações de deslocamentos e solicitações nas barras, e também a mais econômica possível.

Segundo Azevedo et al. (2002), em uma treliça, existem três formas de otimização:

- Otimização de seções transversais: a topologia e geometria dos elementos estruturais são fixas, sendo dimensionadas apenas as seções transversais das barras;
- Otimização da forma: são feitos estudos de desempenho da estrutura, utilizando diferentes topologias pré-definidas, podendo ainda ser feita a modificação das seções transversais das barras;
- Otimização da topologia: nesse sistema, existe uma total liberdade na escolha da solução estrutural, sendo possível definir o número de barras e sua distribuição geométrica da forma que melhor convir.

Também Imai & Schmit (1981) apud Prudente (1998, p.01), consideram que no processo de otimização estrutural, relativamente à estrutura, podem ser analisados a topologia, a configuração, o tipo de material e o dimensionamento dos elementos estruturais. A topologia e a configuração se referem à forma da estrutura, ou seja, qual o melhor tipo de estrutura a ser usado e qual a melhor disposição das barras, nós e apoios, para determinadas solicitações na estrutura. Já o tipo de material a ser usado interfere diretamente nos métodos de cálculo a serem empregados. O dimensionamento dos elementos estruturais está relacionado a determinação das características geométricas necessárias.

Devido à dificuldade em se trabalhar com todos os fatores envolvidos no processo de otimização estrutural, normalmente isto é feito considerando somente a hipótese de se trabalhar um deles, mantendo os demais pré-definidos.

Dentro da realidade atual, tanto nacional como mundial, é extremamente importante a otimização de sistemas estruturais, como forma de reduzir os custos, através de economia de material, mas também em função disto diminuir a extração da matéria prima do aço, material este retirado das reservas naturais de minério, e que, portanto, podem vir a tornarem-se escassas num futuro próximo.

Também o processo de padronização, gera qualidade e eficiência para os processos construtivos, gerando assim mais uma vez economia.

Para obtenção de uma real economia no projeto da estrutura, que é o fator de busca consensual entre todos os projetistas, deve-se buscar um conjunto de parâmetros, envolvendo material, geometria, distribuição uniforme de tensões e sistemas de ligações, que tenha a melhor eficiência.

2.5.1 Emprego de software no processo de otimização estrutural

Em estruturas de aço isostáticas, a determinação dos esforços que atuam nas barras não depende das suas características geométricas, o que facilita o cálculo de otimização. Já no processo de cálculo de estruturas hiperestáticas, os esforços variam de acordo com as características geométricas das barras que compõem a estrutura. Nestes casos, é efetuada uma pré-solução, confrontando as resistências e solicitações de cada barra, alterando-se as seções e

repetindo este processo sucessivamente, até a obtenção de uma estrutura adequada, mas não necessariamente ótima.

Em estruturas mais complexas, este processo torna-se bastante oneroso, daí a necessidade da intervenção de ferramentas computacionais que auxiliem o projetista.

Em meados do século XIX, começaram a se desenvolver os processos matemáticos de otimização, mas, somente no último século, com o advento dos computadores, iniciou-se o desenvolvimento de metodologias numéricas.

As técnicas numéricas, abordadas através de ferramentas computacionais de análise numérica e dinâmica de estruturas, contribuíram muito para o avanço dos métodos de otimização. Segundo Braga (1998) apud SOUZA JR (2005, p.14), 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 desempenho.

Souza Jr. (2005) ressalta também que, dentre as vantagens que o emprego de sistemas computacionais traz, as principais são:

- 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.

Mas, como todo o processo, o uso da otimização estrutural possui algumas desvantagens em relação a sua aplicação, que são:

- Aumento do tempo computacional;
- As funções envolvidas são descontínuas ou de lenta convergência;

- Presença de muitos mínimos locais;
- Programas de análise não adequados.

2.5.2 Algumas aplicações da otimização

A otimização possui grande importância nos projetos atualmente desenvolvidos, pelo fato de as condições de custos de um projeto, seja ele qual for, estão diretamente relacionadas com seu valor final de produção. O simples fato de se elaborar um projeto, buscando um melhor desempenho por um custo mais acessível, já é um processo de otimização. Desta forma, muitas são as áreas de aplicação deste processo dentro do âmbito das engenharias, sendo que dentre elas, pode-se citar:

- Otimização de estruturas metálicas em geral;
- Otimização de estruturas de concreto armado;
- Otimização de estruturas mistas;
- Otimização de máquinas e equipamentos;
- Otimização de sistemas elétricos e computacionais;
- Otimização de instalações em geral.

Existem muitas outras áreas, que para citar todas, seria necessário a realização de um trabalho acadêmico paralelo, o que não é o objetivo deste estudo.

3. METODOLOGIA

3.1 Classificações do estudo

Pode-se classificar este estudo como sendo quantitativo, por utilizar dados numéricos para diferenciar os desempenhos das estruturas analisadas; no caso em questão, o peso de aço envolvido nas estruturas.

3.2 Planejamento da pesquisa

Esta pesquisa foi desenvolvida em três etapas, quais sejam:

- Identificação das topologias mais utilizadas nas estruturas de cobertura de pavilhões industriais na região e análise estrutural destas estruturas identificadas para os vãos adotados;
- Identificação da estrutura com melhor eficiência e menor peso em cada caso analisado;
- Otimização da estrutura com melhor eficiência (menor peso).

3.2.1 Identificação das topologias e verificação do desempenho

Através da verificação das topologias das estruturas em pavilhões já existentes na região, verificou-se a predominância de 12 modelos topológicos. Excetuando-se os casos em que a imposição do projeto arquitetônico ou da utilização deve ser considerada, verifica-se que, na grande maioria, não existe um motivo específico para a adoção do modelo topológico em questão, sendo o mesmo escolhido aleatoriamente pelo responsável pelo projeto. Assim,

na Figura 14, pode-se verificar quais são as doze distribuições topológicas, cada uma delas com 5 tipos de comprimento, por sua vez para dois casos de inclinação (Tabela 1), gerando 105 modelos de análise, sendo que as topologias com banzo superior em arco são consideradas apenas uma vez para cada vão, enquanto as topologias com banzo superior inclinado são consideradas duas vezes, uma para inclinação de 10° e uma para inclinação de 15° .

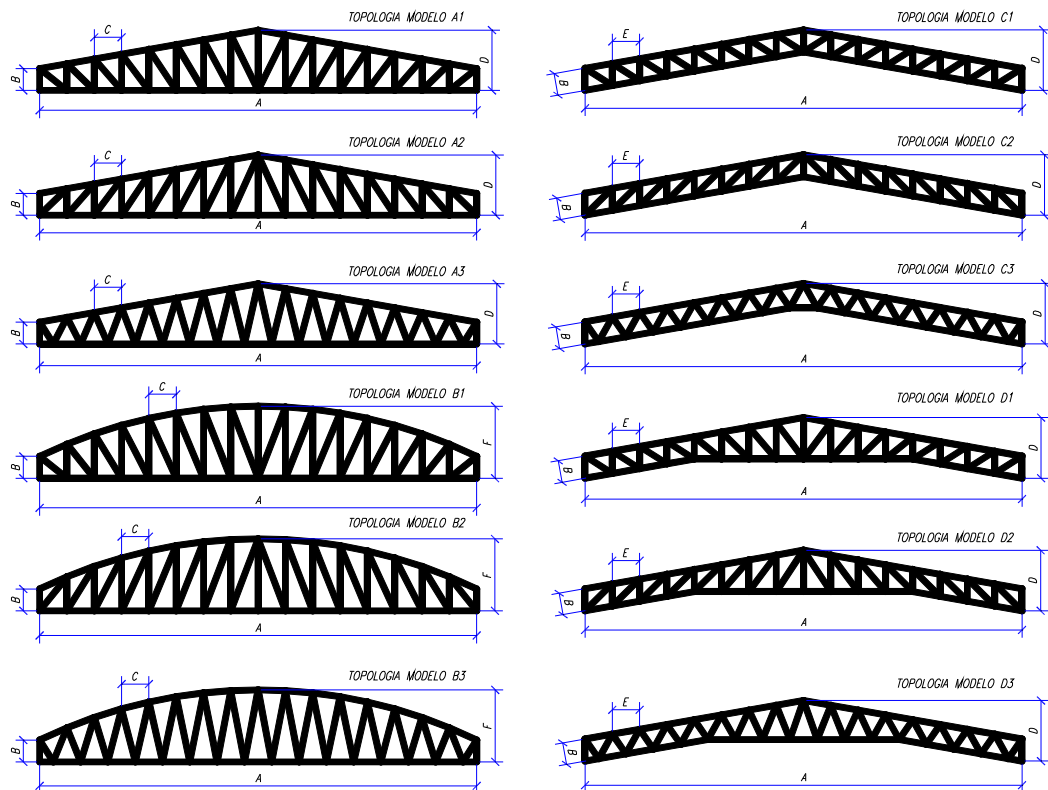


Figura 14 - Topologias estudadas

Tabela 1 - Dados geométricos das topologias estudadas

MODELO (vão livre/inclinação)	A (m)	B (m)	C (m)	D (m)	E (m)	F (m)
5,0m/10°	5,0	0,25	0,625	0,70	0,313	0,83
10,0m/10°	10,0	0,50	0,625	1,38	0,625	1,66
15,0m/10°	15,0	0,75	0,625	2,07	0,625	2,50
20,0m/10°	20,0	1,00	1,25	2,76	1,25	3,33
25,0m/10°	25,0	1,25	1,25	3,45	1,25	4,16
5,0m/15°	5,0	0,25	0,625	0,92	0,313	--
10,0m/15°	10,0	0,50	0,625	1,84	0,625	--
15,0m/15°	15,0	0,75	0,625	2,76	0,625	--
20,0m/15°	20,0	1,00	1,25	3,68	1,25	--
25,0m/15°	25,0	1,25	1,25	4,60	1,25	--

Foi possível, ainda, verificar a escassez de muitos parâmetros ou referências que sirvam como base para a definição das dimensões destas topologias, como, por exemplo, os afastamentos entre os banzos, alturas das extremidades, distância entre os montantes, diagonais, entre outras. Em geral, o projetista é quem define, a partir de dados como distância entre as terças de suporte das telhas, do vão livre e da inclinação, aliado ainda com a experiência em projetos anteriores, os demais dados da estrutura.

Assim, os dados constantes na Tabela 1, referentes às dimensões gerais das estruturas analisadas, e que podem ser identificadas também na Figura 14, foram definidos a partir dos seguintes critérios:

- Vão livre (A) : adotou-se vãos livres de 5,0; 10,0; 15,0; 20,0 e 25,0m, pois acredita-se que estas sejam, em geral, as dimensões mais utilizadas (ou mais próximas) na construção de pavilhões industriais;
- Altura das extremidades (B): segundo Magalhães e Malite (1998), a altura de uma treliça espacial, no Brasil, costuma-se estar situada entre $\frac{l}{15}$ a $\frac{l}{20}$, sendo “*l*” o vão livre da estrutura. Sabe-se que no estudo em questão, não está sendo trabalhado este tipo de treliça, no entanto, devido à falta de outra referência, adotou-se como parâmetro de partida, o valor de altura das extremidades de $\frac{l}{20}$.
- Interterças (C): é a distância entre os montantes da estrutura. Definiu-se a distância entre interterças em função do afastamento das terças que prendem as telhas da cobertura.
- Inclinação da cobertura (D): A inclinação da cobertura foi adotada considerando as inclinações mais utilizadas neste tipo de edificação, que variam entre 10° e 15°. Desta forma, adotaram-se estes dois valores, buscando abranger assim a maior parte das estruturas. No caso das estruturas em arco, Santos (1981?) define que, para este tipo de topologia, não se deve partir da inclinação para a cobertura, pela dificuldade de se fazer isto. Deve ser considerada a altura da flecha da mesma, sendo esta aproximadamente $\frac{l}{6}$, onde *l* é o vão livre da estrutura. Assim, os resultados das estruturas em arco serão apresentados juntamente com os

resultados das estruturas com inclinações de 10° e 15°, apenas para fins de comparação.

Além dos parâmetros acima citados, considerou-se ainda que, para fins de cálculos dos esforços nas estruturas, o pé direito e o afastamento entre pórticos sejam de 6,0m.

Os coeficientes eólicos dos esforços devido à ação do vento na edificação são baseados na consideração de que as estruturas analisadas sejam de pavilhões situados em uma área industrial na região de Ijuí, sendo calculados de acordo com a NBR 6123 (ABNT, 1988) – Forças devidas ao vento em edificações. Estes cálculos podem ser identificados no Apêndice 01 e os resultados estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes eólicos

Coeficientes	Vão livre (m) e inclinação da cobertura (°)									
	5,0 10°	10,0 10°	15,0 10°	20,0 10°	25,0 10°	5,0 15°	10,0 15°	15,0 15°	20,0 15°	25,0 15°
Barlavento	-1,1	-1,1	-1,2	-1,2	-1,2	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
Sotavento	-0,6	-0,6	-0,4	-0,4	-0,4	-0,6	-0,6	-0,4	-0,4	-0,4
Vento longitudinal	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
Pressão interna	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sucção interna	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Vel. característica (Vk) (km/h)	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115

Após a definição dos dados acima, foi feita a modelagem das estruturas no software AutoCAD. Em seguida, a análise estrutural de cada modelo, utilizando-se para isto o software comercial ENGMET 99, desenvolvido pela empresa Metaldada Engenharia e Processamento Ltda.

Foram modeladas 9 topologias com inclinação de 10°, 9 topologias com inclinação de 15° e 3 topologias distintas em arco, totalizando 21 modelos para cada um dos vãos estudados. Como temos 5 vãos diferentes (5, 10, 15, 20 e 25m), conclui-se que foram trabalhados 105 modelos diferentes de estruturas.

Num primeiro momento foram analisadas as distribuições dos esforços e as deformações em cada estrutura considerada. Utilizando-se o módulo adicional do software ENGMET 99, foi feito o pré-dimensionamento da estrutura, etapa em que o programa atribuiu um perfil geométrico necessário para resistir aos esforços solicitados em cada componente da mesma (banzos, montantes e diagonais). A partir deste pré-dimensionamento, realizou-se o dimensionamento final, caracterizado pela padronização dos componentes, observando, além dos esforços solicitantes, a questão construtiva, onde se procura garantir a possibilidade de execução da estrutura.

Os perfis atribuídos pelo software no pré-dimensionamento e no dimensionamento final dos elementos, cujos resultados podem ser identificados no Apêndice 02, foram selecionados de acordo com os perfis disponibilizados no catálogo de produtos fornecido pela Comercial Gerdau, visto que esta é a principal fornecedora de perfis estruturais em aço da região, sendo que a designação dos mesmos pode ser verificada no Apêndice 03. Foram estabelecidos perfis U de chapa dobrada para os banzos superior e inferior e perfis de Cantoneira Laminada para o treliçamento interno, visto que estes são os tipos de perfis mais utilizados.

Em seguida, gerou-se a relação de materiais de cada estrutura analisada, onde, conseqüentemente, consta também o peso de aço total necessário para fabricação da estrutura. Também se extraiu dos resultados gerados pelo programa, a eficiência ponderada de cada um dos dimensionamentos, que é a média das eficiências (volumétricas) das barras de todas as peças, ponderadas com os comprimentos totais de cada uma destas peças e as respectivas áreas de suas seções, e o consumo de aço por metro, em cada uma das estruturas calculadas.

A seqüência completa dos procedimentos para a realização da análise e do dimensionamento estrutural está descrito no Capítulo 4 – Procedimentos para análise e dimensionamento estrutural, deste estudo.

De maneira geral, o procedimento de trabalho pode ser esquematizado graficamente através do fluxograma apresentado na Figura 15.

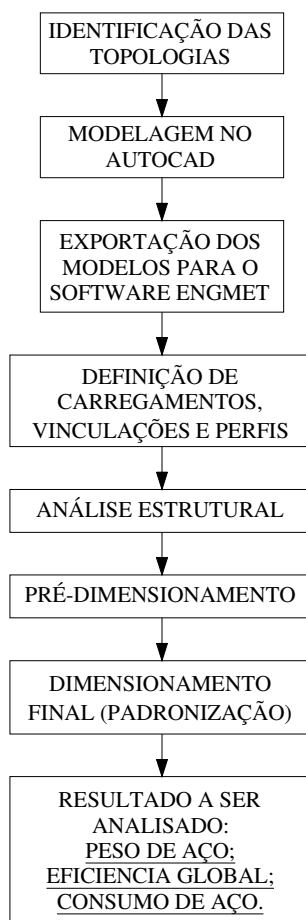


Figura 15 - Fluxograma de procedimento de trabalho

3.2.2 Identificação da estrutura com melhor eficiência e menor peso

Em função dos cálculos estruturais realizados no software ENGMET 99, da relação de materiais obtida a partir destes e da eficiência do dimensionamento, foi possível verificar o peso de aço, as eficiências globais e o consumo de aço por metro de cada topologia, para cada um dos vão estudados.

Assim, foi possível fazer uma análise geral entre a eficiência do dimensionamento e o peso de aço das estruturas, realizado automaticamente pelo software no pré-dimensionamento, onde são atribuídos perfis que atendam aos esforços atuantes nas barras, com a eficiência e o peso de aço das estruturas, após o dimensionamento final, atendendo aos esforços atuantes e garantindo a viabilidade construtiva da estrutura.

Estes resultados estão todos apresentados graficamente no Capítulo 5 deste estudo, e

também estão tabelados no Apêndice 02, contendo inclusive a relação de perfis, peso e eficiência de cada topologia.

3.2.3 Otimização da estrutura com melhor eficiência e menor peso

Após a identificação da topologia com o menor peso e melhor eficiência, ou seja, que necessitou da menor quantidade de aço para ser construtivamente viável e atender aos esforços atuantes na estrutura, foram analisadas as distribuições dos esforços desta topologia, e realizadas algumas alterações na estrutura interna do modelo, permanecendo inalterável a estrutura externa (banzos superior e inferior), buscando encontrar uma nova topologia que possua um comportamento ainda melhor do que o modelo original.

Os resultados encontrados estão dispostos no Capítulo 5, sendo que os detalhes dos estudos realizados podem ser identificados no Apêndice 04.

3.3 Materiais e/ou equipamentos utilizados na pesquisa

Durante a pesquisa foram utilizados, freqüentemente, os seguintes materiais:

- Software de análise e dimensionamento de estruturas metálicas ENGMET 99;
- Manual do usuário do software ENGMET 99;
- NBR 6123 (ABNT, 1988) – Forças devidas ao vento em edificações;
- NB 14/NBR 8800 (ABNT, 1986) – Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios;
- Software AutoCAD 2004;
- Software Microsoft WORD 2003 e EXCELL 2003;
- Computador PENTIUM 4 – 3.0 GHz com 512 MB de Ram e seus demais acessórios.

4. PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

4.1 Descrição do software ENGMET 99

Com o surgimento dos microcomputadores a análise estrutural recebeu um importante impulso para um melhor entendimento dos comportamentos estáticos das estruturas. O software ENGMET 99, desenvolvido pela Metaldata Engenharia e Processamento Ltda, situada na cidade de Porto Alegre/RS, é um sistema de software comercial que objetiva uma análise rápida e segura do comportamento das estruturas treliçadas planas com o intuito de possibilitar, não somente a análise estrutural, mas fundamentalmente sua utilização em termos econômicos. Isto é possível visto que o tempo gasto na solução de uma determinada estrutura é geralmente centena ou milhares de vezes menor do que feito manualmente. Portanto, através de simulações sucessivas, pode-se, não só determinar os esforços de uma estrutura, bem como definirmos a melhor forma geométrica que se adapte ao caso estudado.

O ENGMET 99 é um software composto de diversas rotinas cujo objetivo é a análise estática de estruturas planas compostas de barras. A metodologia utilizada pelo software baseia-se no Método da Rigidez (ou Método dos Deslocamentos). Para o sistema executar a tarefa de análise de uma estrutura, é necessário inicialmente fornecer alguns dados que caracterizam a estrutura, que, basicamente são:

- Geometria de estrutura;
- Constantes elásticas de suas barras;
- Rótulas internas das barras, se houver;
- Vinculações nodais;
- Cargas nodais;
- Cargas de barras;

- Hipóteses de carregamentos desejadas.

Após o processamento dos dados fornecidos, o ENGMET 99 fornecerá como resultados todos os dados necessários para uma rápida interpretação do funcionamento da estrutura, bem como elementos de análise visual do comportamento da estrutura. Entre os resultados fornecidos, salientam-se:

- Deformações nodais;
- Reações;
- Esforços das barras;
- Croquis de deformações da estrutura;
- Relação dos máximos esforços de tração e compressão em cada barra (envoltória dos esforços);
- Movimento de translação do desenho da estrutura original ou deformada;
- Identificação das zonas críticas e zonas de esforços brandos;

Para o dimensionamento e verificação das estruturas metálicas, o ENGMET 99 possui um módulo específico, que trabalha associado a cadastros de seções transversais típicas. São cadastros que geram automaticamente as constantes geométricas das seções transversais típicas. Estes cadastros são pré-definidos conforme as especificações técnicas de cada perfil, mas existe a possibilidade do usuário criar novas seções de acordo com suas necessidades.

Ao término do dimensionamento e verificação, é possível gerar, em arquivos CAD, os dados construtivos da estrutura, como suas dimensões, pesos, comprimentos, etc. Ainda é possível obter um relatório com as variações da eficiência das barras, variação de eficiência das peças e, também, a variação da eficiência da estrutura.

4.2 Procedimentos para análise estrutural

Para o cálculo das diferentes topologias propostas, foi utilizado o software ENGMET 99, cujas definições e características foram anteriormente apresentadas. Abaixo está demonstrado, sucintamente, o roteiro de cálculo estabelecido para cada uma das estruturas analisadas. A topologia que será utilizada no processo descrito abaixo pode ser identificada na Figura 16.

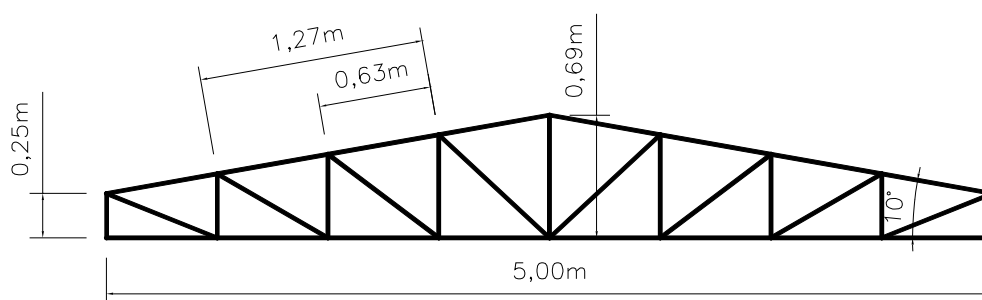


Figura 16 - Tesoura Inglesa - Vão de 5,0m

Antes de iniciar os cálculos com o software específico, foram calculados os coeficientes eólicos para todos os vãos a serem estudados, sendo que os resultados para cada vão em questão podem ser visualizados na Tabela 2. Os cálculos correspondentes estão disponíveis no Apêndice 01. Neste ponto vale ressaltar, que, mesmo o dimensionamento da estrutura estando de certa forma automatizando, é imprescindível efetuar os cálculos referentes aos coeficientes eólicos antes de começar o lançamento da estrutura no software, uma vez que cada estrutura apresenta, conforme sua geometria, disposição, etc., coeficientes diferentes, e que devem ser introduzidos no início do processo de dimensionamento. Em outras palavras, o software considera a ação do vento em seu dimensionamento, mas os cálculos dos coeficientes eólicos devem ser feitos em separado pelo calculista.

Iniciando-se o software ENGMET 99, o primeiro passo é a modelagem da estrutura, definindo os dados gerais do elemento, suas características geométricas, as cargas que irão atuar sobre a estrutura e, ainda, as hipóteses de carregamento existentes. O modelo estrutural empregado para esta estrutura é a “tesoura inglesa”, que se caracteriza por ter as diagonais convergindo para baixo. Na Figura 17, podem-se identificar os dados que foram incluídos para definir as características da estrutura.

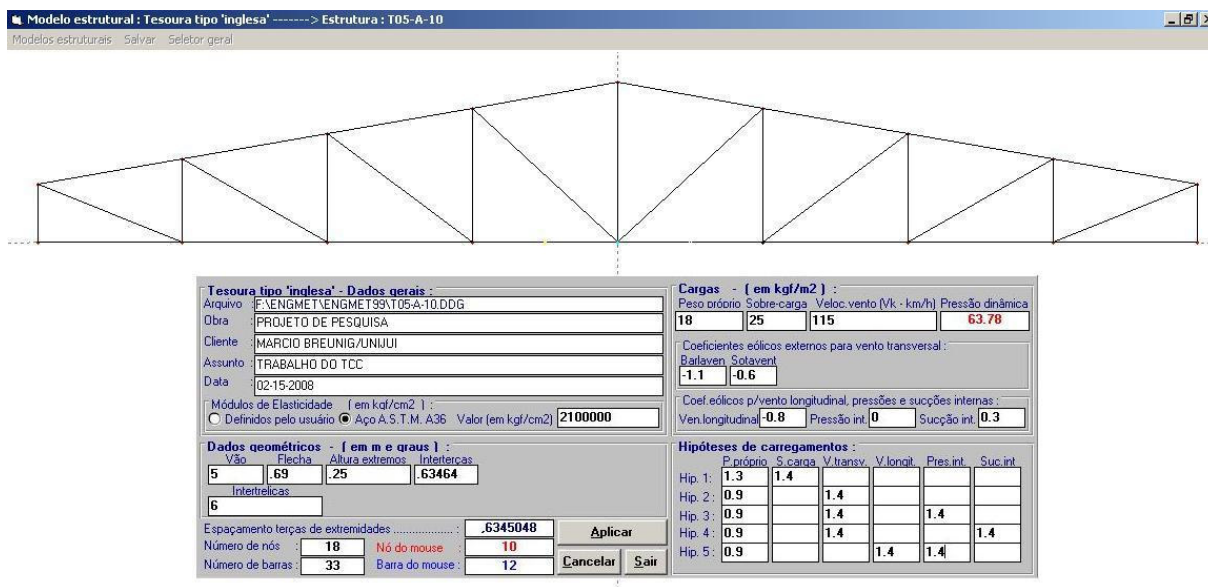


Figura 17 - Entrada de dados inicial

No campo “Tesoura tipo inglesa – dados gerais” se entra com os dados da obra, como tipo de obra, cliente, data, etc. Em seguida, tem-se o campo “Módulos de Elasticidade”, onde é definido o material a ser utilizado na estrutura. Neste estudo, o material das estruturas será de Aço A.S.T.M. A36. O campo “Dados geométricos” define a geometria da estrutura e o espaçamento entre estas (intertrilhas). O software desenhará automaticamente a estrutura quando preenchidos estes campos. Neste exemplo, a estrutura a ser calculada possui um vão de 5,0 metros, com uma flecha central de 0,69m e a extremidade possui altura de 0,25m. As intertrilhas estão afastadas aproximadamente 0,635 m e as intertrilhas (espaçamentos entre os pórticos) é de 6,0m.

Em “Cargas”, considera-se a carga distribuída do peso próprio (18 kgf/m²) e da sobrecarga (25 kgf/m²). O peso próprio refere-se aos componentes como telhas, terças e elementos de fixação, entre outros, enquanto a sobrecarga considerada é aquela estabelecida pela norma. A pressão dinâmica que será usada é automaticamente definida pelo campo “Veloc. Vento”. É importante salientar que esta é a velocidade característica do vento (Vk), e não a velocidade básica da região. Utiliza-se a velocidade calculada anteriormente e apresentada na tabela 2, que é de 32,06 m/s, aproximadamente 115 km/h.

Os “coeficientes eólicos externos para vento transversal” referem-se a Barlavento e Sotavento, sendo, respectivamente, -1,10 e -0,60 para a estrutura a ser calculada. Para cada vão específico, devem ser utilizados os coeficientes específicos anteriormente calculados e demonstrados na Tabela 2.

Os “coeficientes eólicos para vento longitudinal, pressões e sucções internas” definem os valores para vento longitudinal, pressão interna e sucção interna, sendo, respectivamente

-0,80; 0 e 0,30; valores estes que também já foram calculados anteriormente e estão apresentados na tabela 2.

No campo “Hipóteses de cargas” são definidos o majoramento e as combinações das diversas ações que estarão atuando sobre a estrutura, para satisfazer os critérios de ponderações das ações prescritas pela norma de estrutura metálica. Os carregamentos gerados pelo software, a partir da entrada dos dados anteriormente apresentados, devidamente majorados, serão multiplicados pelo valor intertreliças e transformados em cargas lineares. Os carregamentos atuantes serão:

- Peso próprio: pesos distribuídos por metro quadrado de toda a cobertura. É uma carga vertical, com sentido para baixo, distribuído ao longo do banzo superior.
- Sobrecarga: é uma carga vertical, com sentido para baixo, e distribuída na projeção da cobertura;
- Vento transversal: o vento é admitido agindo da esquerda para a direita. Gera duas cargas lineares (Barlavento e Sotavento), perpendiculares aos banzos, com sentidos dependentes dos sinais destes coeficientes;
- Vento longitudinal: são ações do vento perpendiculares ao plano da treliça. Seu coeficiente eólico é admitido constante ao longo de todo o banzo superior. Gera duas cargas lineares perpendiculares aos banzos e simétricas, com sentido dependente do sinal de seu coeficiente;
- Pressão interna: são ações internas do vento. Gera duas cargas lineares perpendiculares aos banzos e simétricas, cujas forças tem sentidos “de dentro para fora”, e não dependem do sinal do respectivo coeficiente (o software lhe admite sinal positivo);
- Sucção interna: são ações internas do vento. Gera duas cargas lineares perpendiculares aos banzos e simétricas, cujas forças tem sentidos “de fora

para dentro”, e não dependem do sinal do respectivo coeficiente (o software lhe admite sinal positivo).

Assim, conforme demonstrado na Figura 17 tem-se 05 hipóteses de carregamentos. Utilizando os critérios da NBR 8800 (ABNT, 1986) com coeficientes de ponderação de 1,3 para as hipóteses sem a ação do vento, 0,9 para as que possuem esta ação e 1,4 para as sobrecargas e ações do vento, tem-se que as 05 hipóteses reais utilizadas no dimensionamento das estruturas serão as apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 - Hipóteses de carregamentos

Hipóteses	Peso próprio	Sobrecarga	Vento transversal	Vento longitudinal	Pressão interna	Sucção interna
01	1,3	1,4	0	0	0	0
02	0,9	0	1,4	0	0	0
03	0,9	0	1,4	0	1,4	0
04	0,9	0	1,4	0	0	1,4
05	0,9	0	0	1,4	1,4	0

Desta forma, o carregamento de cada uma das hipóteses acima será obtido através da multiplicação escalar de todas as cargas de cada carregamento pelo seu fator de ponderação e pela soma vetorial dos cinco carregamentos resultantes. Vale ressaltar que o software considera a pressão e sucção interna como um conjunto único de cargas radiais.

Definidas todas as características construtivas, os coeficientes e as hipóteses de carregamento, inicia-se, efetivamente, o dimensionamento da estrutura. O método da rigidez exige que cada barra possua definidos as áreas e momentos de inércia dos perfis para obtermos uma solução estrutural. Desta forma, atribuem-se algumas seções transversais aos componentes da estrutura, com o intuito apenas de gerar a elasticidade das barras. Vale ressaltar que quanto mais próxima a elasticidade atribuída as barras for da elasticidade das barras dimensionadas, mais otimizado será o cálculo. Isto pode ser garantido corrigindo-se as elasticidades após o dimensionamento e refazendo a solução estrutural novamente, até obter valores adequados. Na Figura 18, vê-se a tela do programa no momento da atribuição das

seções transversais as barras. Nesta primeira hipótese, consideraram-se os banzos de UDC, e o treliçado da tesoura de cantoneira laminada.

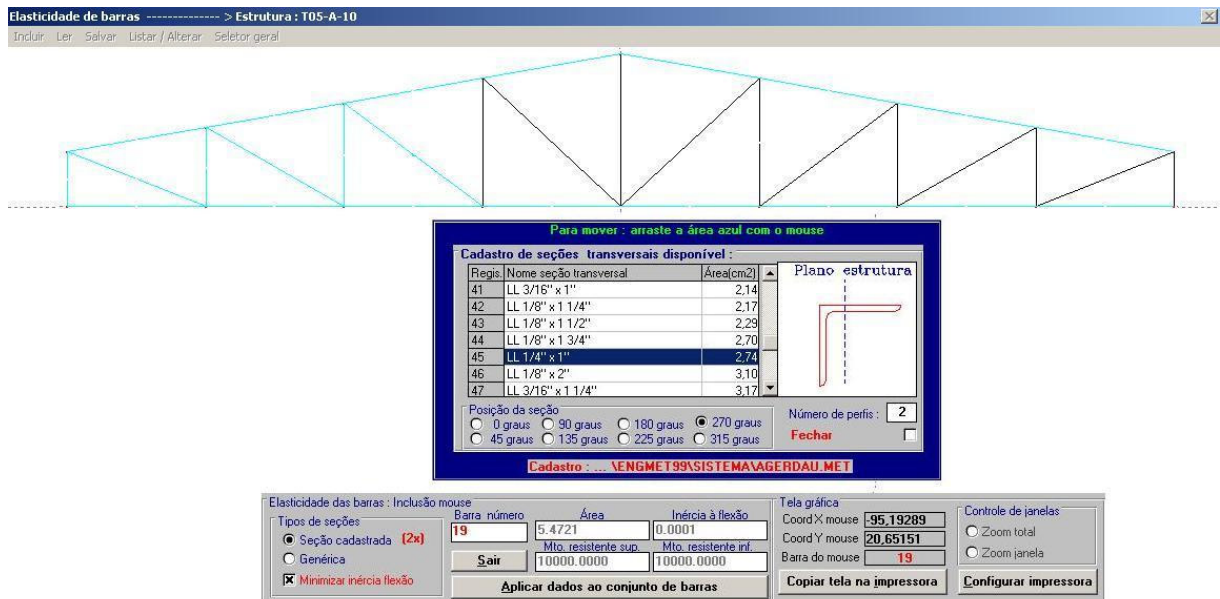


Figura 18 - Aplicação de seções transversais às barras

Em seguida, são definidas as vinculações entre a tesoura e os pilares. Pode-se definir 3 tipos de vinculações (apoio em X, apoio em Y e engaste em Z). A Figura 19 demonstra as vinculações aplicadas, onde se considerou a estrutura com as 3 vinculações citadas, devido ao sistema de fixação a ser adotado. No centro da tesoura, há uma restrição de engaste na direção Z, uma vez que normalmente há uma viga de interligação entre os pórticos, que fará o engaste neste sentido, nos locais restritos.

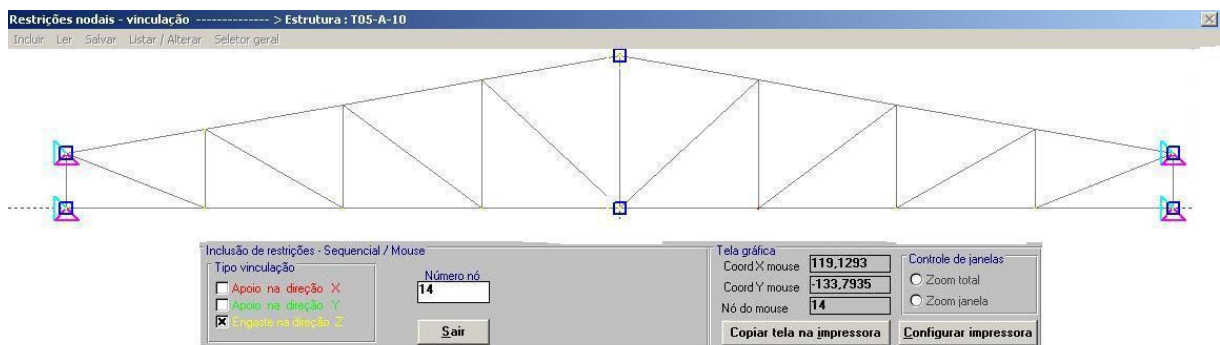


Figura 19 - Aplicação da vinculação e restrições na estrutura

Como não existem outros carregamentos a serem considerados na estrutura, como pontes rolantes, engaste de outras estruturas, entre outros, parte-se para a análise da solução estrutural. A solução estrutural é efetuada através da resolução das hipóteses vetor de cargas,

deslocamentos nodais, reações e esforços extremos das barras e ainda das ações em barras, fornecendo, assim, resultados que permitem uma perfeita análise numérica e gráfica do comportamento da estrutura.

Os resultados da solução estrutural gerados após a análise são:

- Deslocamentos;
- Reações;
- Esforços normais, cortantes e momentos fletores;
- Envoltória dos esforços;
- Tensões normais de primeira ordem.

Além de todas estas informações acima citadas, que podem ser úteis para verificar e analisar os pontos críticos, facilitando um melhor entendimento do que está ocorrendo com a estrutura examinada, existe ainda um “gráfico de deformações”, que permite visualizar a deformação que a estrutura sofre, em qualquer uma das hipóteses de carregamento criadas. Na Figura 20 encontra-se a representação do comportamento da estrutura em questão, para a hipótese de carregamentos 02, com um fator de escala de 50 vezes maior do que a deformação real.

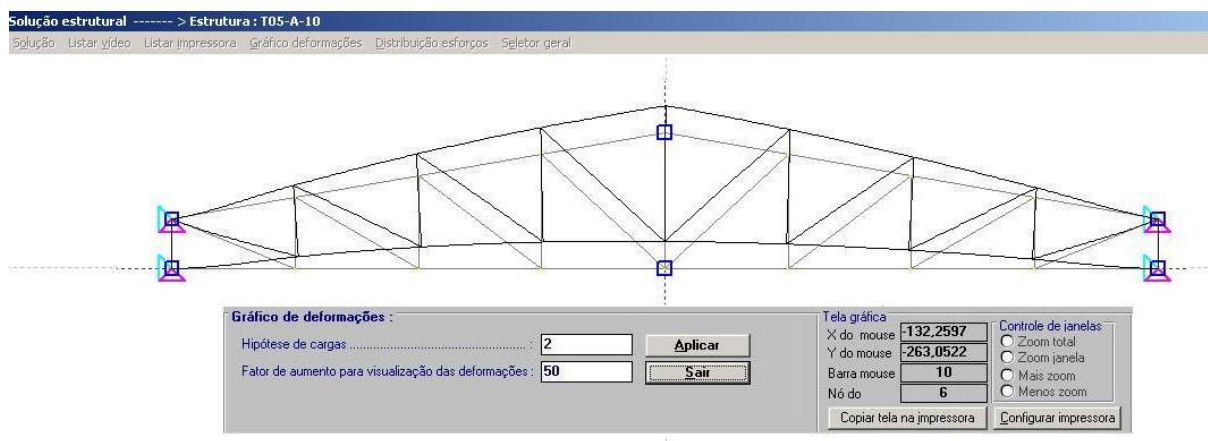


Figura 20 - Gráfico de deformações

Através da rotina “distribuição de esforços”, tem-se acesso as distribuições de esforços e de tensões na estrutura através de um aspecto cromático, sendo apresentada na Figura 21 a distribuição de esforços para a hipótese de carregamento 02. Caso a estrutura

apresentasse esforços e ou tensões extremas de maneira generalizada, dever-se-ia readequar o perfil geométrico da mesma, para poder distribuir melhor os esforços. Pelo fato de se estar aqui apenas considerando, num primeiro momento, o comportamento de topologias pré-definidas, não se trabalhará diretamente com a adequação e redistribuição dos esforços atuantes.

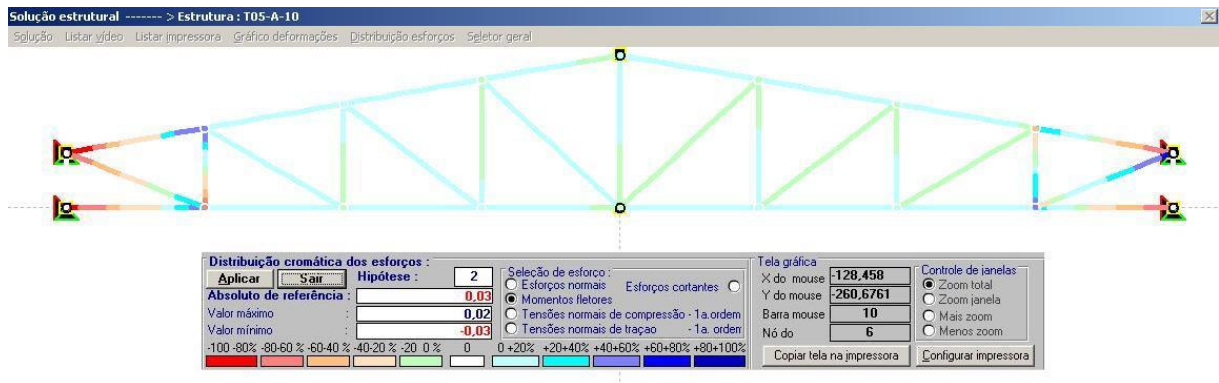


Figura 21 - Distribuição cromática dos esforços

Todos os resultados gerados após a solução estrutural podem ser impressos na forma de relatórios. Caso seja necessário, também é possível obter, de quaisquer pontos da estrutura, os valores dos deslocamentos, dos esforços atuantes, da envoltória dos esforços e das tensões normais de 1ª ordem. Como este estudo busca identificar, para cada vão, dentre diversas topologias pré-definidas, aquela que possa ser considerada ideal para resistir aos esforços atuantes, e esta definição será a partir do peso de aço necessário para este fim, não será necessário realizar, num primeiro momento, nenhuma análise mais aprofundada referente aos resultados fornecidos pelo software após a execução da solução estrutural. No entanto, estes resultados serão de extrema importância para os estudos de otimização da topologia que apresentar menor peso.

4.3 Dimensionamento do pórtico com o ENGMET 99

Depois de efetuada a análise do comportamento estrutural do pórtico, inicia-se o dimensionamento da estrutura. Para isso, é utilizado um módulo adicional do software, capaz de dimensionar e verificar as estruturas metálicas. Uma de suas características importantes é o fato de trabalhar associado a cadastros de seções transversais, que geram automaticamente as constantes geométricas das seções transversais típicas cadastradas.

Primeiramente, são definidos os tipos de peças, mais precisamente, as características geométricas dos perfis, sem considerar as prováveis dimensões. Na figura 22, é possível identificar a tela de definição de perfis do software.

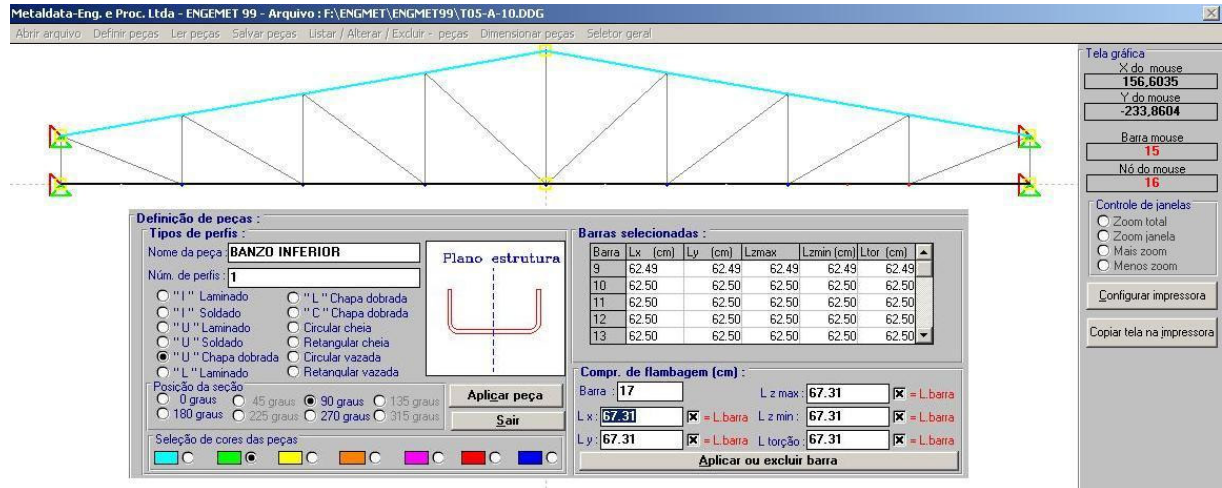


Figura 22 - Definição do tipo de perfil das peças

Em seguida, executa-se o pré-dimensionamento dos elementos, para que o software retorne as dimensões necessárias para cada perfil, de cada peça. Na Tabela 4 e na Figura 23 estão apresentados os resultados retornados para os componentes da estrutura analisada.

Tabela 4 - Resultado do pré-dimensionamento

Peça	Material Atribuído
Banzo superior	UCD 2,00 x 25 x 50 x 25 (mm)
Banzo inferior	UCD 2,00 x 25 x 50 x 25 (mm)
Treliçado	LL 4,75 x 25,4 (mm)

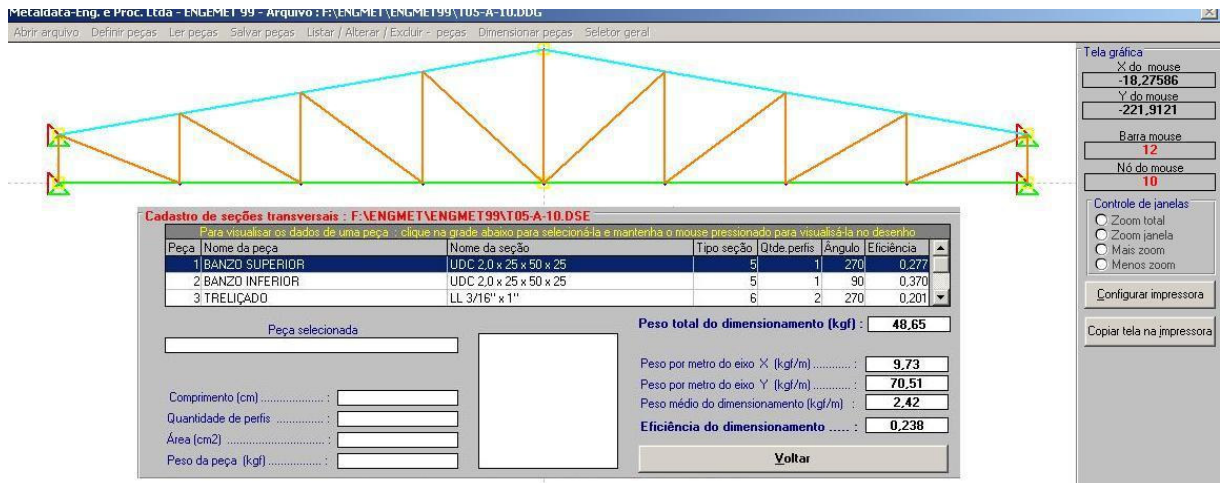


Figura 23 - Resultado do pré-dimensionamento

Após a análise, é possível verificar uma série de informações referentes ao pré-dimensionamento, e, entre elas, é possível analisar a cromatografia da eficiência dos perfis pré-dimensionados para a estrutura, ou seja, através de cores, verifica-se o espectro de distribuição da eficiência, através da relação percentual entre o esforço da barra e a capacidade do perfil. Na Figura 24, está apresentada a tela referente à estrutura calculada, onde as barras na cor azul demonstram que o perfil está praticamente sem sofrer solicitação de sua capacidade resistente, e, quanto mais se afasta desta cor, em direção a coloração vermelha, demonstram que o perfil está sendo usado com sua capacidade mais solicitada. Existem algumas barras que não estão sendo solicitadas, o que teoricamente poderia fazer com que fosse diminuída a seção utilizada, ou, até mesmo, eliminada tal seção, fazendo uma redistribuição da geometria interna, reduzindo assim custos com material. Devido ao fator construtivo, a variação excessiva de perfis em uma mesma estrutura não é recomendada, pois dificulta o trabalho de montagem, podendo facilmente vir a ocorrer erros.

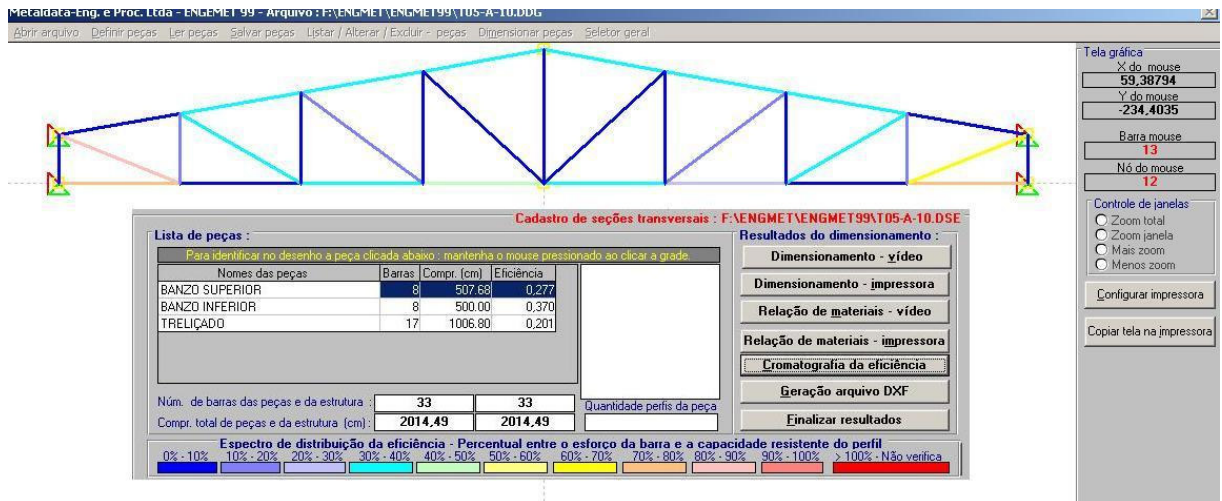


Figura 24 - Cromatografia da eficiência

Analisando os perfis atribuídos no pré-dimensionamento, é possível verificar que não há como executar a estrutura em questão, uma vez que a largura interna do UDC é menor que o necessário para a colocação das duas cantoneiras pré-dimensionadas, conforme apresentado na Figura 25.

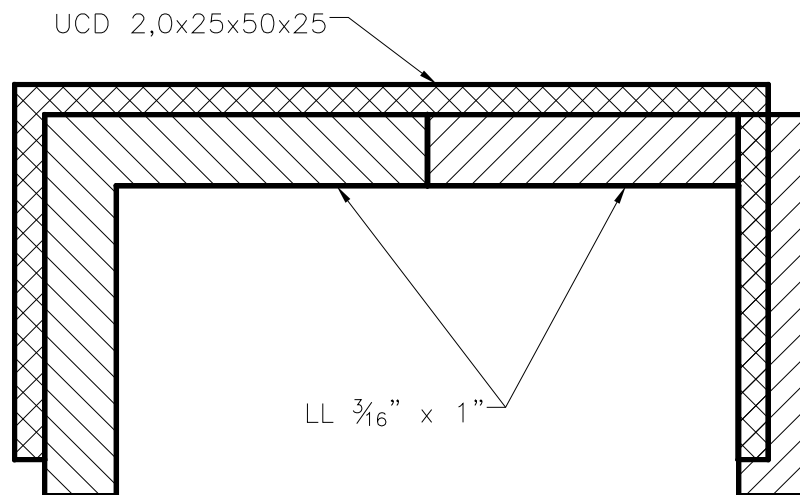


Figura 25 - Detalhe da impossibilidade construtiva que ocorre no pré-dimensionamento

Para possibilitar a viabilidade construtiva da estrutura, evitando problemas conforme o acima citado, parte-se para o dimensionamento final, onde é feita a padronização dos perfis e a verificação do comportamento dos mesmos, verificação esta realizada em outro módulo do software, específico para a verificação de perfis, no entanto, seguindo os mesmos passos efetuados no pré-dimensionamento. A diferença é que neste dimensionamento final, atribuem-se os perfis com as dimensões dos elementos padronizadas a partir dos resultados obtidos no pré-dimensionamento. A tabela 5 apresenta as situações testadas e os resultados obtidos.

Tabela 5 - Padronização dos elementos estruturais

Situação 01		
<i>Banzos (mm)</i>	<i>Treliçado(mm)</i>	<i>Condição</i>
UDC 2,0 x 38 x 75 x 38	LL 3,175 x 25,4	<u>Treliçado não resiste</u>
Situação 02		
UDC 2,0 x 38 x 75 x 38	LL 4,76 x 25,4	<u>Dimensionamento OK</u>

Na Figura 26, é possível verificar como fica distribuída a eficiência da estrutura com a padronização dos perfis, na situação 02.

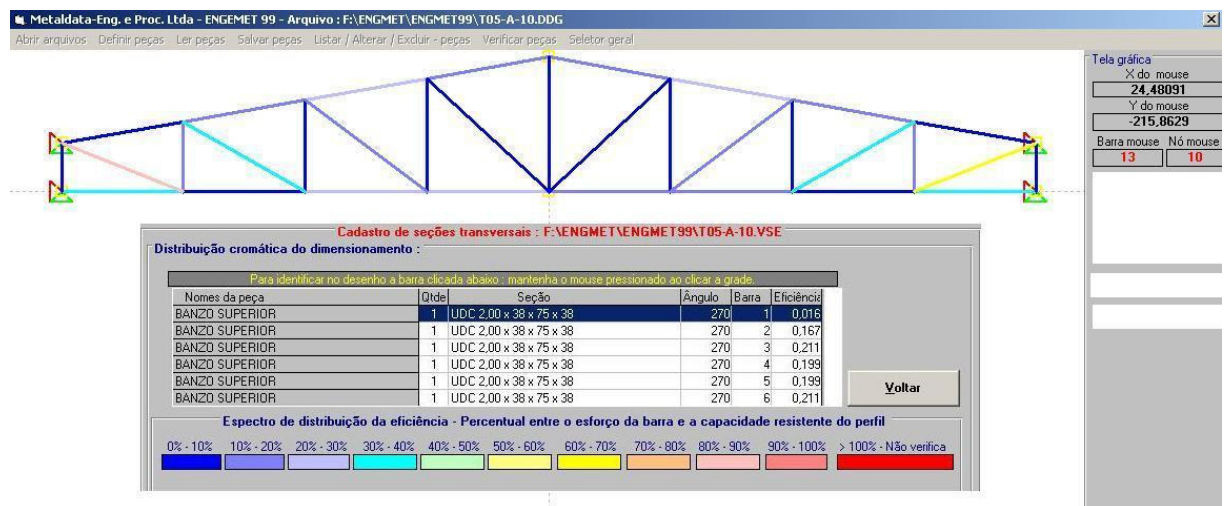


Figura 26 - Eficiência da estrutura com perfis padronizados

A partir destes resultados, pode-se obter a relação de materiais necessários para a execução da estrutura calculada. Na Tabela 6, estão apresentados os perfis e o peso de aço total necessário para que a estrutura com as características apresentadas na Figura 16 resista

aos esforços atuantes sobre a mesma e seja construtivamente viável. O Apêndice 05 apresenta o formato da saída dos dados do software ENGEMT 99 para um programa CAD, onde constam diversos dados relevantes para garantir a aquisição de materiais e a fabricação das estruturas analisadas.

Tabela 6 - Resultado do dimensionamento final

Posição	Perfil (mm)	Comp. Total (m)	Peso Total (kg)
Banzo superior	UCD 2,0 x 38 x 75 x 38	5,08	11,50
Banzo inferior	UCD 2,0 x 38 x 75 x 38	5,0	11,35
Treliçado	LL 4,76 x 25,4	20,14	33,87
Peso Total (kg)			56,72

5. RESULTADOS DA ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

A partir da análise estrutural e do dimensionamento das estruturas, conforme foi descrito no capítulo anterior, foi possível extrair diversos resultados, sendo que os principais utilizados neste estudo são o peso de aço total, a eficiência global da estrutura e o consumo de aço de cada uma das 105 topologias estudadas. Neste capítulo são apresentados estes resultados, seguidos de uma interpretação dos mesmos.

O peso de aço é obtido tanto no pré-dimensionamento como no dimensionamento final, e varia em função das características dos perfis atribuídos e do comprimento das barras que compõem cada um dos elementos (banzos e treliçado) da estrutura.

A eficiência da estrutura analisada é a média das eficiências (volumétricas) das barras de todas as peças, ponderadas com os comprimentos totais de cada uma destas peças e as respectivas áreas de suas seções. Estas eficiências variam de zero a um. Quando são nulas, indicam que o componente não possui esforços. Valores próximos de zero indicam um superdimensionamento do componente, enquanto que valores próximos de 1 (um), mas inferiores, indicam um bom dimensionamento. Quando são iguais a 1 (um), indicam que a resistência do componente é igual ao esforço determinante, ou seja, possui dimensionamento ótimo. Já quando os valores estão acima de 1 (um), indicam a existência de um esforço determinante maior do que a resistência do componente, ou seja, o mesmo está sub-dimensionado.

É importante salientar que a eficiência máxima de uma estrutura, composta por várias barras, só é atingida se for definida uma peça para cada barra, fazendo com que cada barra ou componente atue com o máximo de eficiência. No entanto, construtivamente isto dificilmente é praticável. No Apêndice 06, para fins didáticos, encontram-se os resultados de um dimensionamento objetivando a máxima eficiência global da estrutura, onde é possível verificar os perfis atribuídos em cada barra, seu comprimento, peso e eficiência.

O consumo de aço por unidade de comprimento (m) é o resultado da relação entre o peso total da estrutura e o comprimento total das barras dimensionadas.

Para facilitar a análise dos resultados, as diferentes topologias estão divididas em 04 grupos, sendo:

- Grupo A – Estruturas tipo “tesoura”, com banzo superior inclinado e banzo inferior horizontal;
- Grupo B – Estrutura tipo “tesoura” em arco, com banzo superior em arco e banzo inferior horizontal;
- Grupo C – Estrutura de banzos paralelos, com banzo superior e inferior inclinados;
- Grupo D – Estrutura mista, sendo nas extremidades de banzo paralelo e na parte central, tipo tesoura.

Dentro destes quatro grupos, as topologias do tipo 1 (A1, B1, C1 e D1) possuem as diagonais convergindo para baixo e os montantes posicionados verticalmente (Treliça Pratt), as do tipo 2 (A2, B2, C2 e D2) possuem diagonais convergindo para cima e montantes posicionados verticalmente (Treliça Howe). Já as topologias do tipo 3 (A3, B3, C3 e D3), não possuem montantes, apenas diagonais que convergem alternadamente para cima e para baixo (Treliça Warren). Estas características podem ser visualmente verificadas na figura 14.

Vale ressaltar que as topologias do grupo B, como possuem os banzos superiores em arco, não possuem sua flecha em função da inclinação, e sim, em função do vão livre, conforme já citado no item 3.2.2, do capítulo 3 deste estudo. Por este motivo, estas topologias serão calculadas apenas uma vez, mas, serão apresentadas tanto nos resultados das topologias com inclinação de 10° e nas topologias com inclinação de 15°, com o objetivo de comparação.

Os resultados referentes ao peso de aço, a eficiência global e ao consumo de aço estão apresentados em figuras, sob a forma de gráficos de barras. Nestas figuras estão os dados retirados do pré-dimensionamento e do dimensionamento final de cada uma das topologias, sendo possível assim a comparação de resultados em todos os casos dentro de um mesmo vão e inclinação. Os valores estão referenciados percentualmente em função da estrutura com maior peso ou com maior eficiência.

5.1 Análise das topologias para vão de 5,0m

5.1.1 Peso de aço

A Figura 27 apresenta o peso de aço das diferentes topologias para vencer um vão de 5,0m, com inclinação da cobertura de 10°.

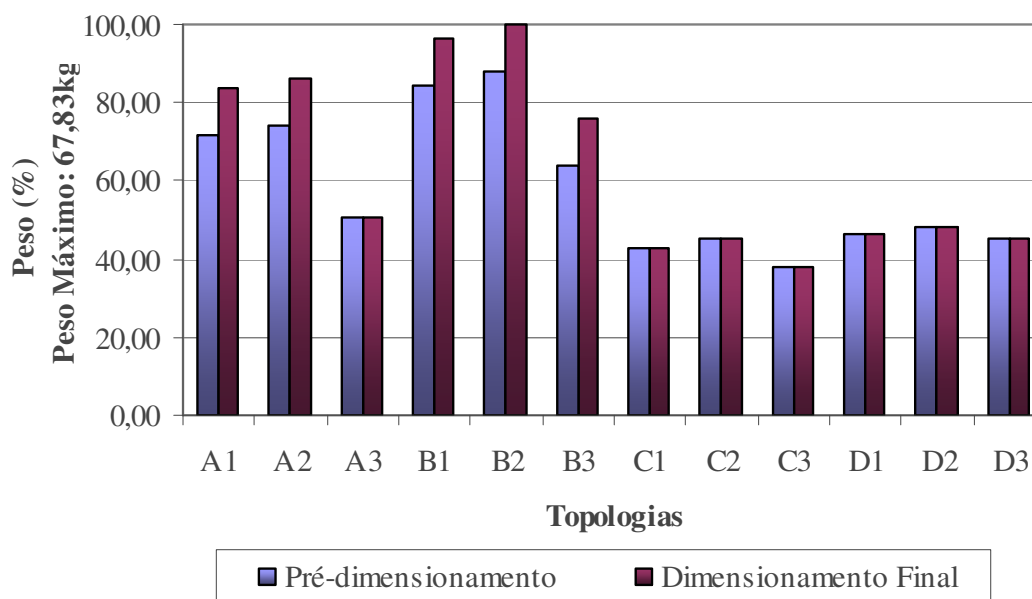


Figura 27 - Pesos das topologias – Vão livre de 5,0m; inclinação 10°

Nota-se que em alguns casos o peso de aço das estruturas no pré-dimensionamento é idêntico ao peso de aço das estruturas no dimensionamento final. Isto ocorre pelo fato de que as estruturas em questão, devido ao baixo vão livre a vencer, apresentam esforços não muito elevados, onde já no dimensionamento o próprio software atribui perfis que garantem a viabilidade construtiva da estrutura, dispensando assim a padronização de perfis realizada no dimensionamento final.

Nas demais topologias, o peso de aço do dimensionamento final é maior do que no pré-dimensionamento, pois, com evidências simples de se entender, no momento de efetuar o dimensionamento final os perfis devem ser padronizados, sendo que, geralmente, ao menos um dos perfis tem sua seção aumentada.

Outra análise interessante é a verificação de que o comportamento das topologias que compõem cada um dos grupos estudados, segue uma tendência semelhante, apesar dos valores

serem diferentes. Verifica-se que, em todos os grupos a topologia do tipo 03 (A3, B3, C3 e D3), que possui o treliçado interno baseado nas treliças “Warren”, é a mais leve de cada grupo, seguida pelas topologias do tipo 01 (A1, B1, C1 e D1), cujo treliçado interno é baseado nas treliças “Pratt”, e ainda tendo como topologia mais pesada, dentro de cada grupo específico, aquelas onde o treliçado interno foi baseado nas treliças “Howe”, que são as do tipo 02 (A2, B2, C2 e D2). O grupo que apresentou topologias mais leves foi o grupo “C”, que possui os banzos paralelos e inclinados. Já as topologias do grupo “B”, que possuem o banzo superior em arco, foram as mais pesadas.

Assim, dentre todas as topologias, a mais pesada foi a B2, com 67,83kg, e a mais leve foi a do tipo C3, pesando aproximadamente 62% menos do que a B2.

Na Figura 28, são apresentados os pesos das topologias para vão de 5,0m e inclinação de 15°.

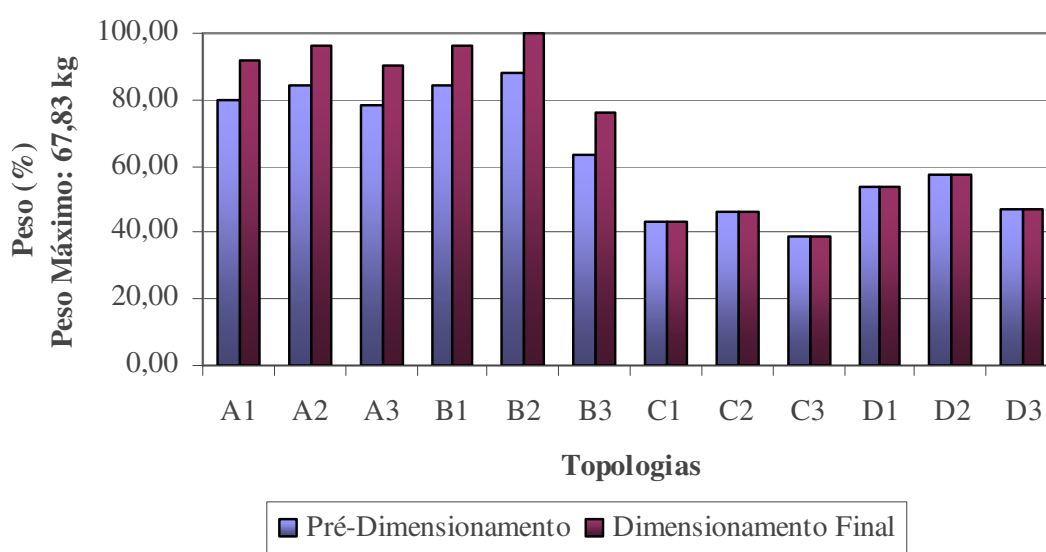


Figura 28 - Pesos das topologias – Vão livre de 5,0m; inclinação 15°

Para inclinações de 15°, o comportamento das topologias é semelhante ao comportamento das topologias de 10°. Vale ressaltar que a topologia mais pesada continua sendo a do tipo B2, pesando 67,83kg, e a mais leve foi a do tipo C3, que, assim como no caso das inclinações de 10°, pesa aproximadamente 62% menos do que a estrutura do tipo B2.

5.1.2 Eficiência global

A Figura 29 apresenta a eficiência global da estrutura, para um vão de 5,0m e inclinação da cobertura de 10°. Nota-se que no caso das topologias do grupo A e do grupo B, as estruturas com maior eficiência foram justamente aquelas que possuem menor peso de aço envolvido, ou seja, a eficiência é, nestes dois casos, o inverso do peso. Isto indica que quanto maior o peso da estrutura, menor a utilização da capacidade resistente da topologia em questão, ou seja, os perfis estão superdimensionados para os esforços atuantes, trabalhando com esforços muito abaixo dos que poderiam realmente suportar.

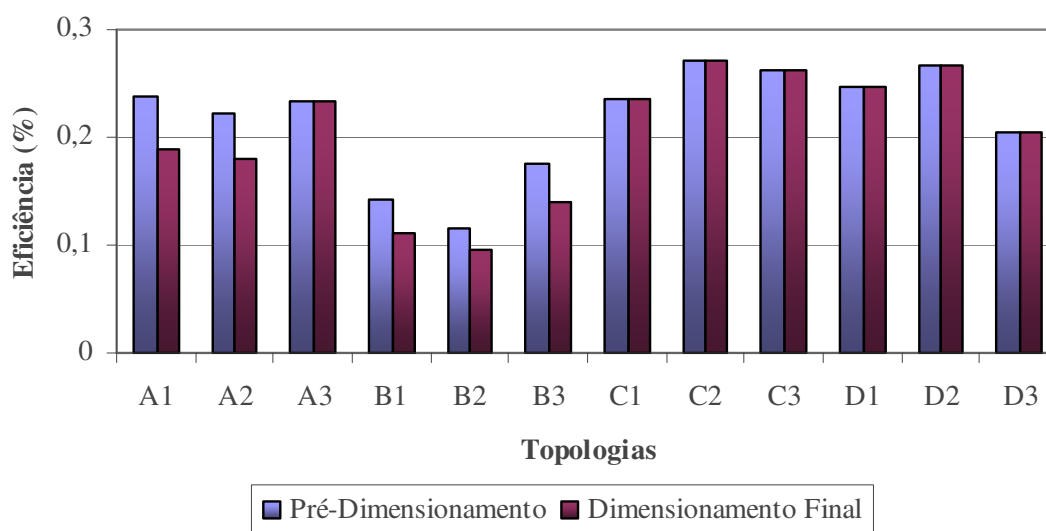


Figura 29 - Eficiência das topologias – Vão livre de 5,0m; inclinação 10°

Já no caso das topologias do grupo C e D, o comportamento foi idêntico ao comportamento que ocorre na questão do peso de aço, onde, dentro de um mesmo grupo, a estrutura com maior peso foi a que obteve a melhor eficiência. Esta situação indica que, ao contrário do que ocorre nas topologias do grupo A e B, os perfis atribuídos estão trabalhando com esforços mais próximos de sua capacidade resistente, apesar de que a eficiência continua sendo muito baixa, menor do que 0,30, quando comparada com a eficiência ideal igual a 1,0, onde a estrutura usaria sua máxima capacidade resistente. Isto ocorre pelo fato, já anteriormente comentado, de que esta máxima eficiência global só é possível de alcançar, ou ao menos ficar próxima dela, se a cada barra ou elemento fosse atribuído um perfil distinto. No entanto, isto é construtivamente inviável, uma vez que traria problemas no momento da

montagem, como o aumento do custo da mão de obra, problemas de compatibilidade de perfis e ainda a suscetibilidade a erros de fabricação, sendo que este último pode acabar levando a estrutura ao colapso quando em carga.

A Figura 30 apresenta a eficiência global da estrutura para as topologias com vão de 5,0m e inclinação de 15°.

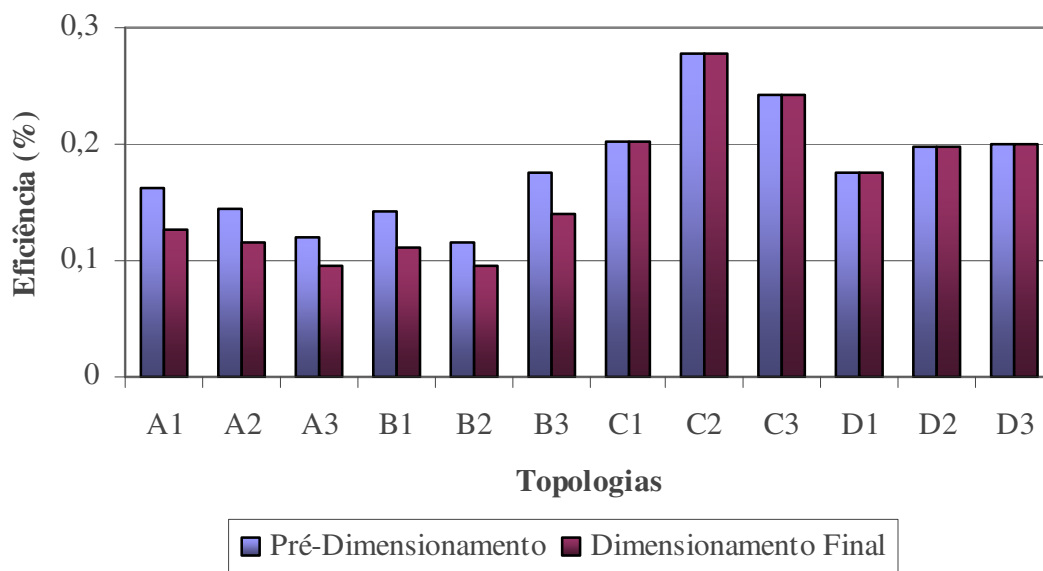


Figura 30 - Eficiência das topologias – Vão livre de 5,0m; inclinação 15°

No caso das inclinações de 15°, o comportamento da eficiência global das topologias é praticamente semelhante ao comportamento da eficiência das topologias com inclinação de 10°, mas, com algumas alterações, como no caso do grupo das topologias do grupo A, com eficiência muito menor. No entanto, cabem aqui as mesmas considerações feitas para os modelos topológicos com inclinação de 10°.

5.1.3 Consumo de aço

O consumo de aço é dado em função da relação entre o peso total e comprimento total das peças. Na Figura 31 é possível verificar o consumo de aço entre as diferentes topologias e inclinação. Pode-se perceber que a topologia com menor consumo de aço é a do

tipo C3, aproximadamente 58% menos do que a tipo B2, a de maior consumo, seguindo a mesma tendência encontrada na questão do peso das estruturas.

Um dos principais motivos desta diferença é devido ao fato de que as estruturas do grupo C possuem menor comprimento total de barras por ter seus banzos paralelos e inclinados. Já as estruturas do grupo B, que possuem os banzos superiores em arco, são as que possuem maior comprimento linear das barras que a compõem, principalmente do treliçado, e, desta forma, ocorre o maior consumo de aço. A relação completa dos perfis, pesos e comprimentos pode ser identificada no Apêndice 02.

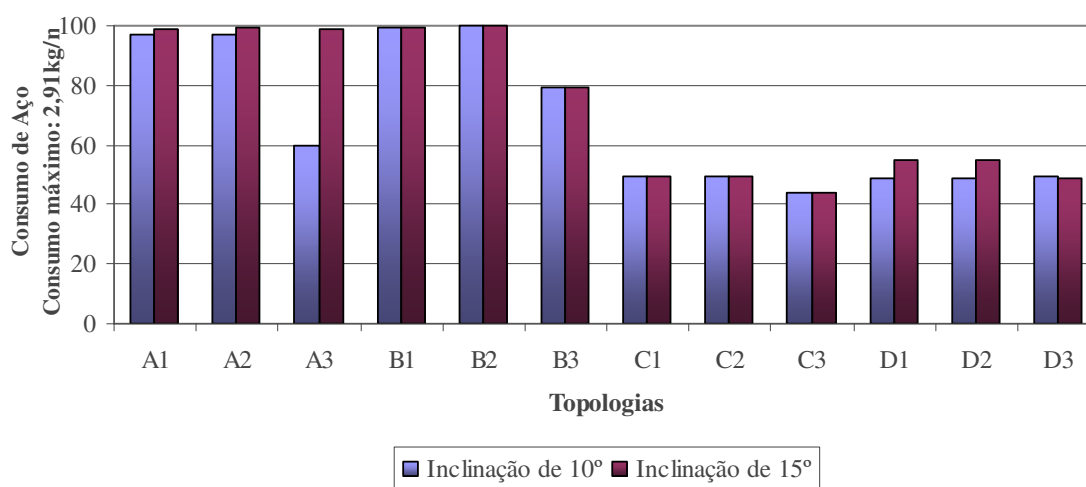


Figura 31 - Consumo de aço das topologias, para vão livre de 5,0m

Também é interessante verificar que, exceto para a topologia tipo A3, onde a topologia com inclinação de 10° consome aproximadamente 40% menos aço do que a mesma topologia com inclinação de 15°, a diferença entre o consumo de aço das topologias com inclinações de 10° é bastante semelhante ao consumo das topologias com inclinações de 15°, possuindo em alguns casos o mesmo valor. Isto demonstra que em um vão de 5,0m, a inclinação da cobertura não é tão relevante em termos de aumento do consumo.

No caso da topologia do tipo A3, o que ocorre é que os esforços atuantes na topologia com inclinação de 10° estão melhor distribuídos e mais próximos dos esforços resistentes dos perfis atribuídos, o que a torna mais eficiente e conseqüentemente mais leve. Já para a topologia com inclinação de 15°, possivelmente haja algum ponto em que os esforços solicitantes sejam maiores do que no restante da estrutura, exigindo a utilização de perfis mais robustos, o que torna a estrutura menos eficiente e aumenta o consumo de aço por metro linear de seus componentes, uma vez que na maioria dos pontos que compõem a

estrutura, os perfis devem estar super-dimensionados. Isto é possível verificar, através dos dados constantes no Apêndice 02, que demonstra que o perfil adotado no treliçamento do modelo com inclinação de 10°, é muito mais leve do que aquele adotado para o modelo com inclinação de 15°. O peso do treliçado para a topologia com inclinação de 15° é praticamente o dobro do peso do treliçado para a topologia com inclinação de 10°.

5.2 Análise das topologias para vão de 10,0m

5.2.1 Peso de aço

Nas Figuras 32 e 33 está apresentado o peso das topologias estudadas, para vãos de 10,0m e inclinação de 10° e 15° respectivamente.

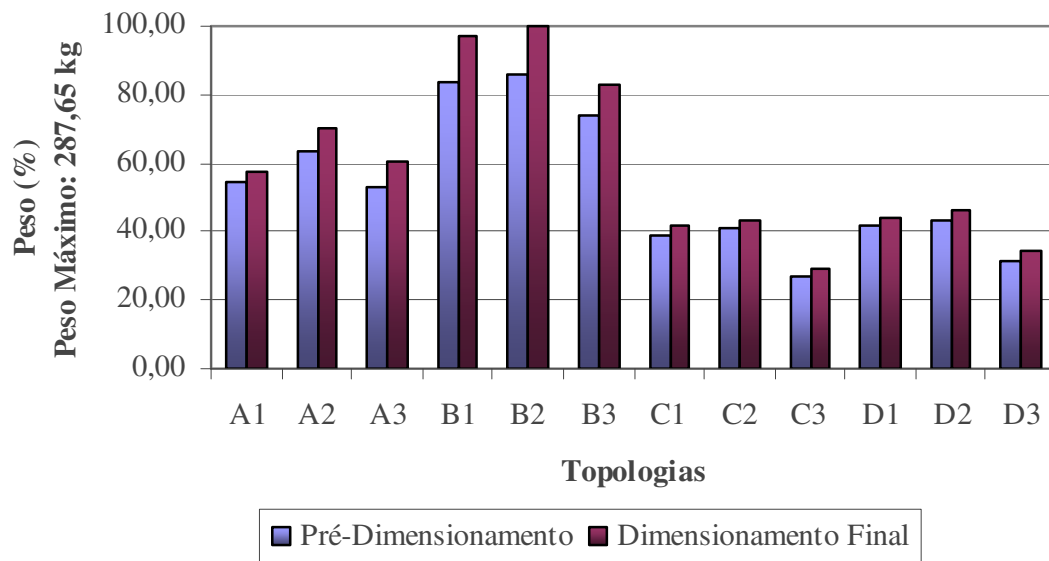


Figura 32 - Pesos das topologias – Vão livre de 10,0m; inclinação 10°

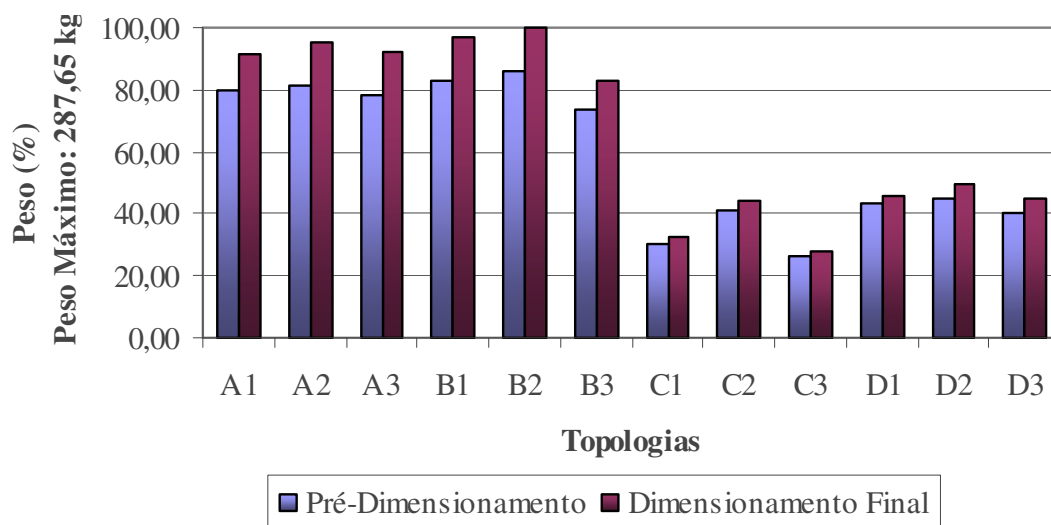


Figura 33 - Pesos das topologias – Vão livre de 10,0m; inclinação 15°

O comportamento das diferentes topologias segue o mesmo padrão já encontrado para as topologias anteriormente apresentadas, cujo vão livre a vencer é de 5,0m. Nos dois casos, a topologia com maior peso é a do tipo B2, pesando 287,65 kg, e a topologia mais leve é a do tipo C3, pesando aproximadamente 70% menos do que a do tipo B2. Importante salientar que os pesos máximos para as topologias com inclinação de 10° e 15° possuem o mesmo valor nos dois casos pelo fato de que estes valores são referentes às estruturas em arco, e, como anteriormente citado, este tipo de estrutura possui sua flecha definida pelo vão, e não pelo ângulo da cobertura, fazendo com que esteja apresentada nos dois casos somente para fins de comparação.

Também é possível perceber que nos dois casos agora apresentados, em todas as situações o peso do dimensionamento final foi maior do que o peso do pré-dimensionamento. Isto ocorre devido ao fato de que se tornou necessário, em todos os casos, efetuar o dimensionamento final para garantir a padronização dos perfis, uma vez que há uma maior variação de perfis adotados no pré-dimensionamento.

5.2.2 Eficiência global

A Figura 34 apresenta as eficiências globais das estruturas com inclinação de 10° para um vão livre de 10,0m.

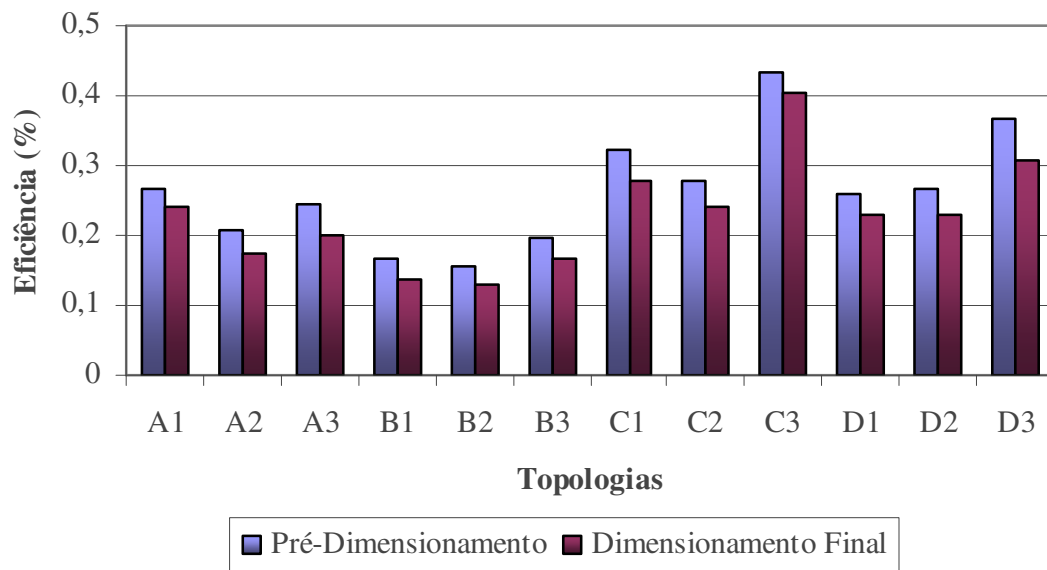


Figura 34 - Eficiência das topologias – Vão livre de 10,0m; inclinação 10°

Neste caso, a maior eficiência foi encontrada na topologia do tipo C3, sendo que o valor ficou acima de 0,4, demonstrando que nesse caso, os perfis estão atuando mais próximos de sua capacidade resistente. Na maioria das demais topologias este valor ficou abaixo de 0,3.

A Figura 35 demonstra o comportamento da eficiência global para as topologias estudadas para um vão de 10,0m e inclinação da cobertura de 15°. O comportamento é bastante semelhante aos demais apresentados, sendo que nesse caso, também a topologia com maior eficiência foi a do tipo C3, ficando em torno de 0,4.

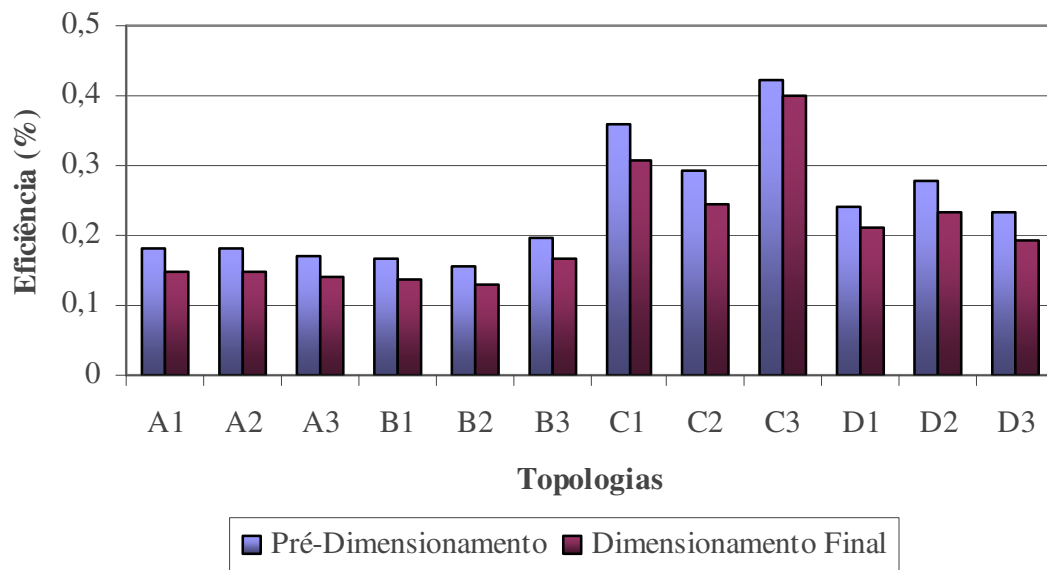


Figura 35 - Eficiência das topologias – Vão livre de 10,0m; inclinação 15°

5.2.3 Consumo de aço

Na Figura 36 tem-se informação a respeito do consumo de aço para as topologias estudadas, com vão livre de 10,0m e inclinações da cobertura de 10° e 15°. É possível identificar que a topologia que obteve um menor consumo foi a do tipo C3, sendo este valor aproximadamente 55% menor do que o consumo da topologia do tipo B1 e B2, que apresentaram o maior consumo de aço.

As topologias do tipo C1 e C3 possuem consumo de aço maior quando a inclinação da cobertura é de 10°, enquanto que no restante das topologias o consumo é maior quando a inclinação é de 15°, tendo inclusive, nas topologias do tipo B1, B2, B3, D1 e D2, consumo semelhante nos dois casos.

A maior diferença de consumo, entre estruturas com inclinação de 10° e 15° ocorre nas topologias do grupo A.

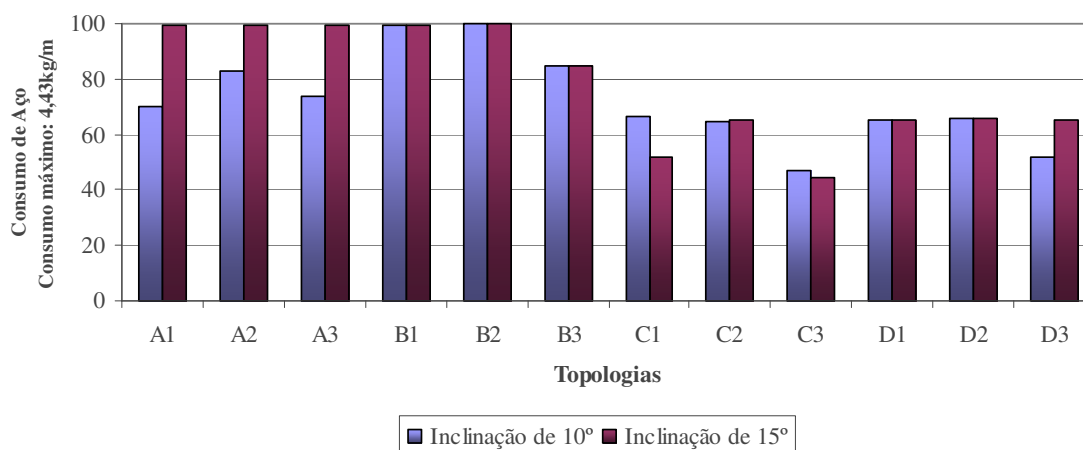


Figura 36 - Consumo de aço das topologias, para vão livre de 10,0m

5.3 Análise das topologias para vão de 15,0m

5.3.1 Peso de aço

A partir da análise da Figura 37, onde consta o peso de aço para as topologias com vão livre de 15,0m e inclinação de 10°, é possível verificar, à primeira vista, que nas topologias do grupo B o dimensionamento final não retornou valores de peso de aço. Isto ocorre pelo fato de que no pré-dimensionamento são atribuídos perfis com bitolas variadas, sem possibilidade construtiva. Ao padronizar estes perfis, de forma a garantir uma melhor construtibilidade da estrutura, bem como a resistência necessária para suportar os esforços atuantes sobre a mesma, é necessário aumentar o tamanho dos banzos, tanto o superior como o inferior, possibilitando assim a colocação dos perfis do treliçado em seu interior. Após executar o dimensionamento final, o software acusa que o índice de esbeltez dos perfis possíveis de serem utilizados para a padronização dos banzos é superior ao estabelecido por norma. Isto implica, num primeiro momento, que as topologias do grupo B não são indicadas para vãos de 15,0m e inclinação de 10°.

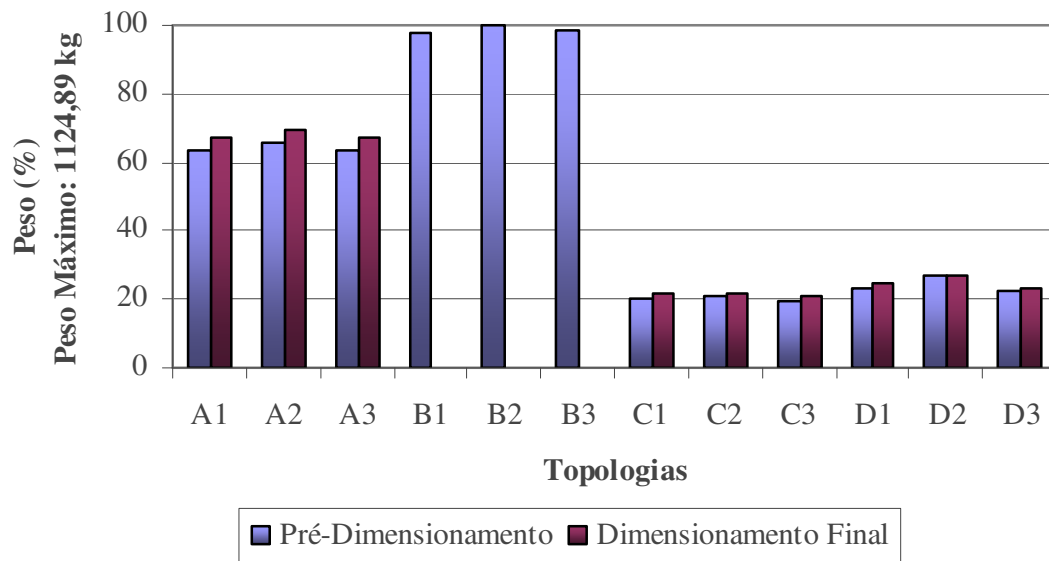


Figura 37 - Pesos das topologias – Vão livre de 15,0m; inclinação 10°

Ao se analisar a Figura 37 em relação ao peso das topologias possíveis de padronizar e garantir a viabilidade construtiva, percebe-se que, novamente, as topologias com menor peso são as do grupo C, sendo a do tipo C3 a mais leve de todas. As topologias do grupo D também ficaram bastante leves. Neste caso, as topologias pertencentes ao grupo A foram as mais pesadas, sendo a do tipo A2 a mais pesada de todas. No entanto, caso fosse possível padronizar as topologias do tipo B, estas seriam as mais pesadas.

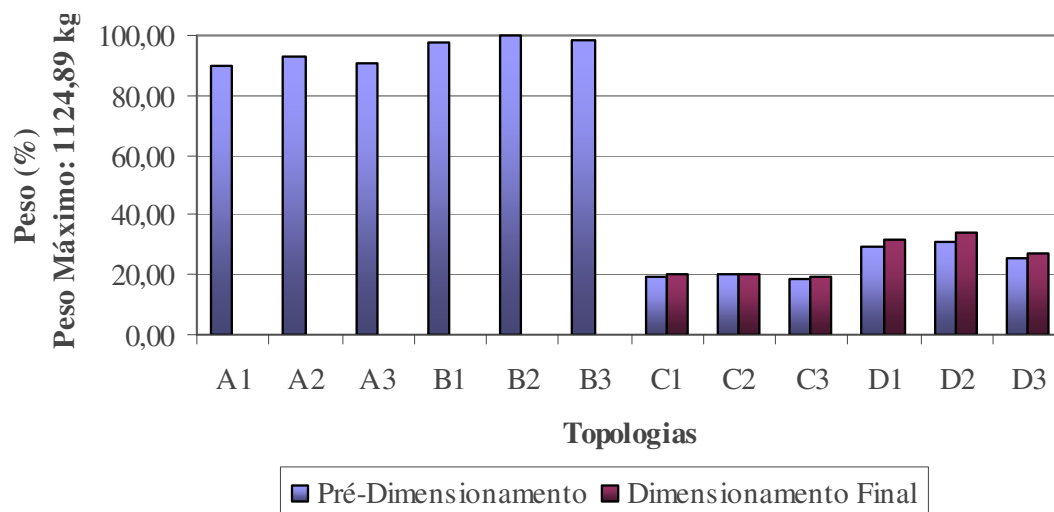


Figura 38 - Pesos das topologias – Vão livre de 15,0m; inclinação 15°

Já ao realizar a análise do peso das topologias para um vão de 15,0m e inclinação de 15°, cujos resultados encontram-se apresentados na Figura 38, verifica-se que neste caso além do problema referente ao índice de esbeltez elevado para os banzos no grupo B, também isto ocorre para as topologias do grupo A.

Seguindo o mesmo padrão já observado nos demais casos estudados, as topologias mais leves também são do grupo C, sendo novamente a topologia do tipo C3 a mais leve entre todas as estudadas para vãos de 15,0m e inclinação de 15°.

5.3.2 Eficiência global

A eficiência máxima alcançada, para vãos de 15,0m e inclinação de 10°, conforme se pode verificar na Figura 39, ficou em torno de 0,38, sendo que ocorreu para a topologia do tipo C2, enquanto que a topologia mais leve foi a do tipo C3, conforme visto anteriormente na Figura 37. Isto demonstra que não existe uma relação direta entre o peso de aço e a eficiência, ou seja, não significa que a estrutura com menor peso seja a mais eficiente, apesar destes valores tenderem para esta afirmação, uma vez que as maiores eficiência são obtidas nos grupos cujas topologias possuem o menor peso.

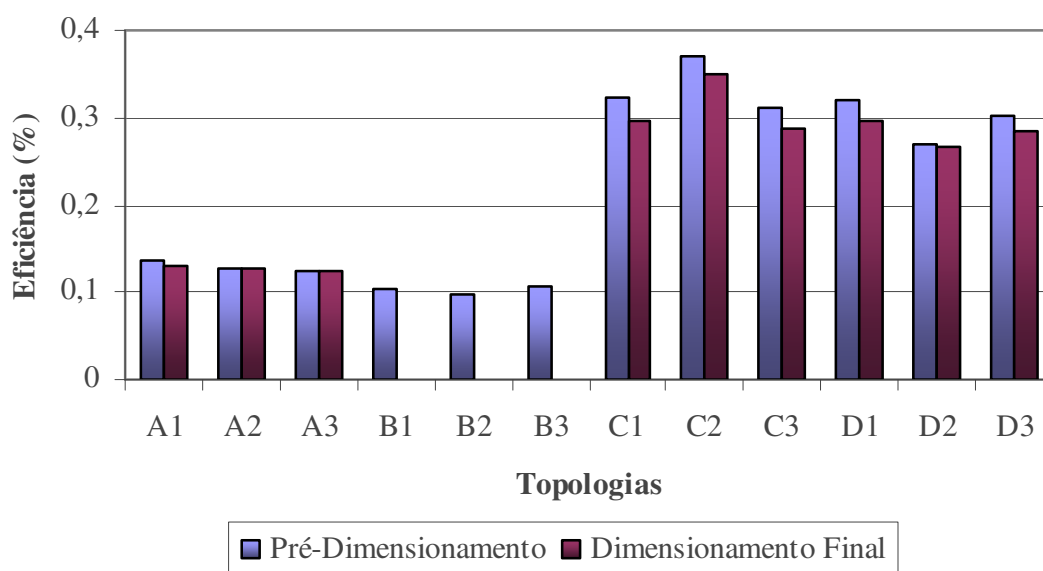


Figura 39- Eficiência das topologias – Vão livre de 15,0m; inclinação 10°

O mesmo fato ocorre ao analisar-se a Figura 40, que apresenta a eficiência global para as topologias com vão livre de 15,0m e inclinação de 15°. Neste modelo, a maior eficiência foi encontrada na estrutura C2, lembrando que para este caso o menor peso de aço foi obtido na topologia do tipo C3.

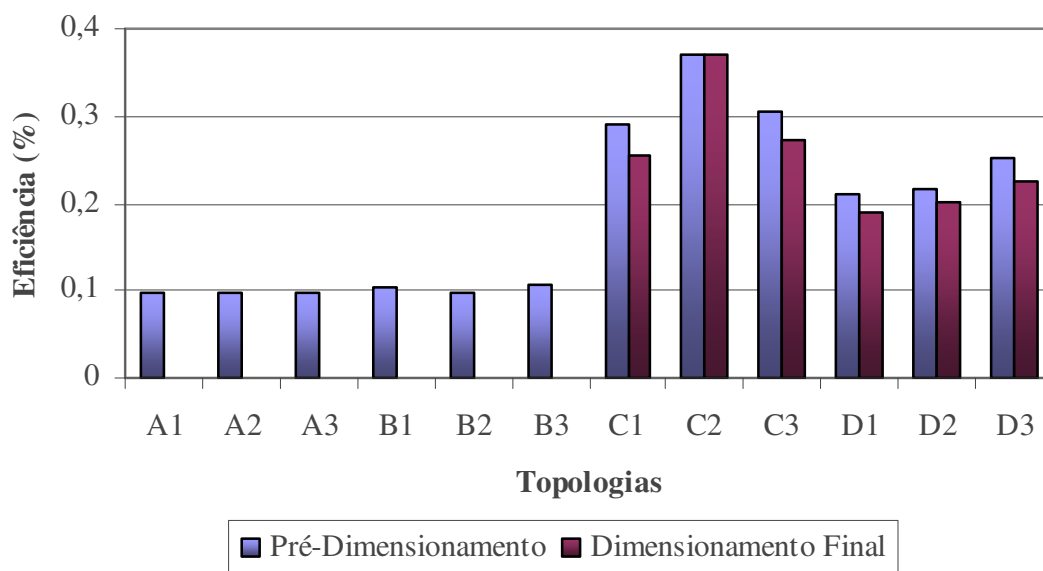


Figura 40 - Eficiência das topologias – Vão livre de 15,0m; inclinação 15°

A justificativa para isto é o fato que os esforços atuantes na estrutura com maior eficiência estão mais próximos da capacidade resistente global da mesma, enquanto que a estrutura que possui o menor peso fica menos solicitada do que sua capacidade resistente global. Por exemplo, na topologia tipo C2 está sendo utilizado em torno de 38% da capacidade resistente global da estrutura, enquanto que na estrutura do tipo C3, que é a mais leve, os esforços atuantes utilizam apenas 28% da capacidade global da estrutura. Partindo desta análise, poderia ser questionado que desta forma, esta estrutura estaria superdimensionada. No entanto, deve-se ter em mente que isto ocorre pela necessidade de padronização dos perfis adotados, para garantia da construtibilidade da topologia, não sendo possível, portanto, adotar perfis menores para satisfazer as necessidades estruturais em questão.

5.3.3 Consumo de aço

Conforme as informações da Figura 41, o maior consumo de aço ocorre nas topologias do grupo A, para inclinação de 10°. Para as topologias do grupo A com inclinação de 15°, assim como para as topologias do grupo B, tanto para 10° e 15°, não existe valor referente ao consumo de aço pelo fato de que estas topologias não puderam ser padronizadas, e, portanto, não são construtivamente viáveis.

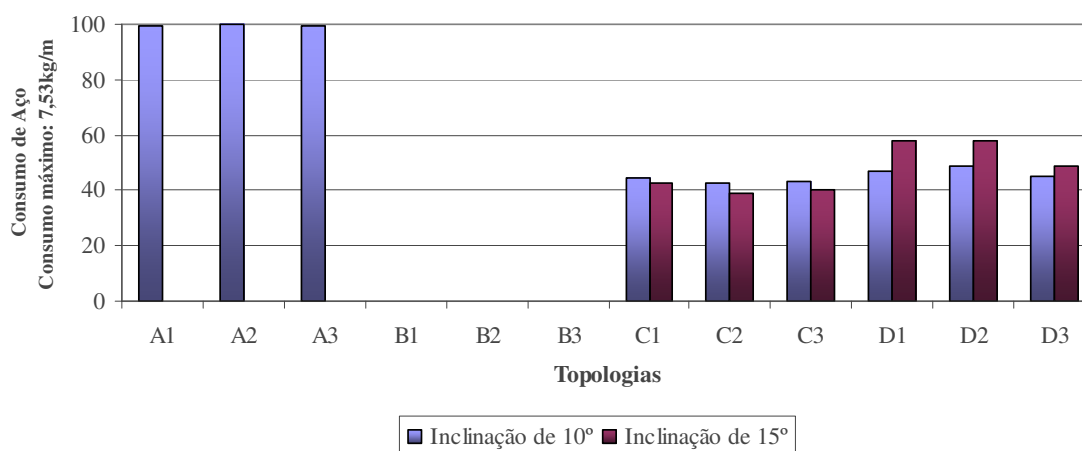


Figura 41 - Consumo de aço das topologias, para vão livre de 15,0m

As topologias com o menor peso de aço encontram-se no grupo C, sendo a topologia do tipo C2 a que menor quantidade de aço consome por metro linear dos componentes estruturais. Importante salientar que esta topologia em questão, apesar de não ter sido a mais leve, apresentou-se como a mais eficiente e com menor consumo de aço.

Relacionando estes dados, poderia ocorrer uma análise referente a questão de que por ter o menor consumo de aço e ser a mais eficiente, esta topologia deveria logicamente ser a com menor peso. Entretanto, isto não ocorre pelo simples fato de que o modelo geométrico desta topologia possui um comprimento linear de todos componentes que a compõem (banzos e treliçado) maior do que o comprimento linear da topologia do tipo C3, o que a torna mais pesada. Maior o comprimento linear dos componentes, maior o peso. Estes valores podem ser consultados no Apêndice 02.

5.4 Análise das topologias para vão de 20,0m

5.4.1 Peso de aço

Para vãos de 20,0m, com inclinação da cobertura de 10° ocorreu o mesmo problema já anteriormente mencionado, referente à questão do índice de esbeltez elevado para os banzos superior e inferior, durante a execução do dimensionamento final, para todas as topologias dos grupos A e B, conforme demonstrado na Figura 42. No entanto, é possível verificar, através da análise do peso de aço destas topologias obtido no pré-dimensionamento, que as mesmas são novamente as topologias mais pesadas dentre todas as analisadas, uma vez que se tem o conhecimento de que ao realizarmos a padronização dos perfis, ou seja, o dimensionamento final, a estrutura tende a ficar ainda mais pesada. Comprova-se isto verificando que, o peso da topologia mais leve - no caso a do tipo C3 - já padronizada, está em torno de 18% do peso da topologia B2, sem a padronização. Assim, novamente conclui-se que estas topologias não seriam as mais indicadas para vãos de 20,0m e inclinação da cobertura de 10°.

As topologias dos grupos C e D apresentaram praticamente o mesmo comportamento já verificado nos vãos anteriores. A topologia mais leve, conforme já mencionado, foi a do tipo C3, e, dentre as demais possíveis de padronizar através do dimensionamento final, a mais pesada foi a do tipo D1, salientando que a diferença de peso entre a estrutura mais pesada e a mais leve é de aproximadamente 100%.

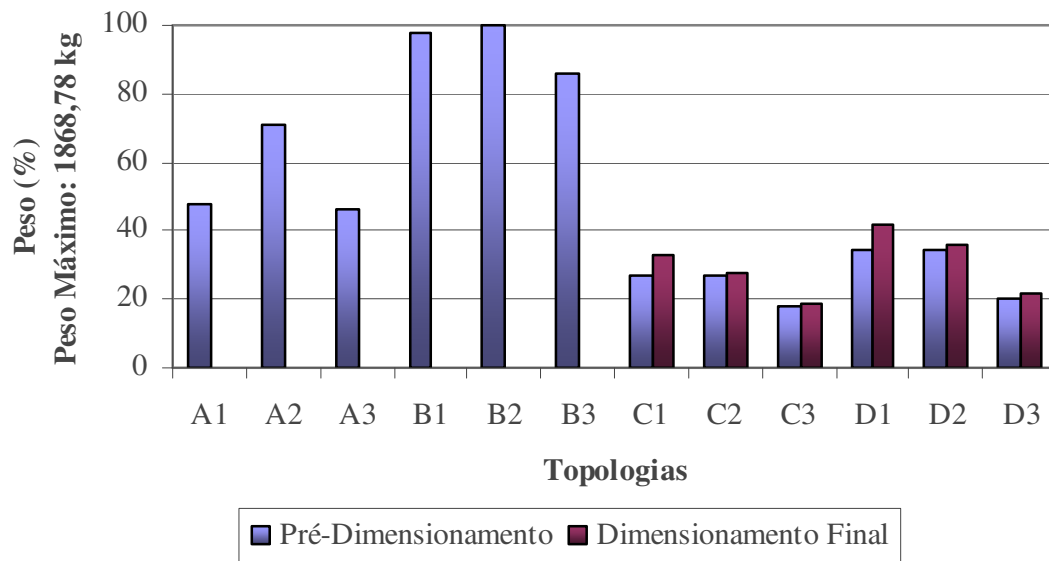


Figura 42 - Pesos das topologias – Vão livre de 20,0m; inclinação 10°

A Figura 43 demonstra a situação encontrada para as topologias estudadas que se destinam a cobrir vãos de 20,0m, com inclinação da cobertura de 15°.

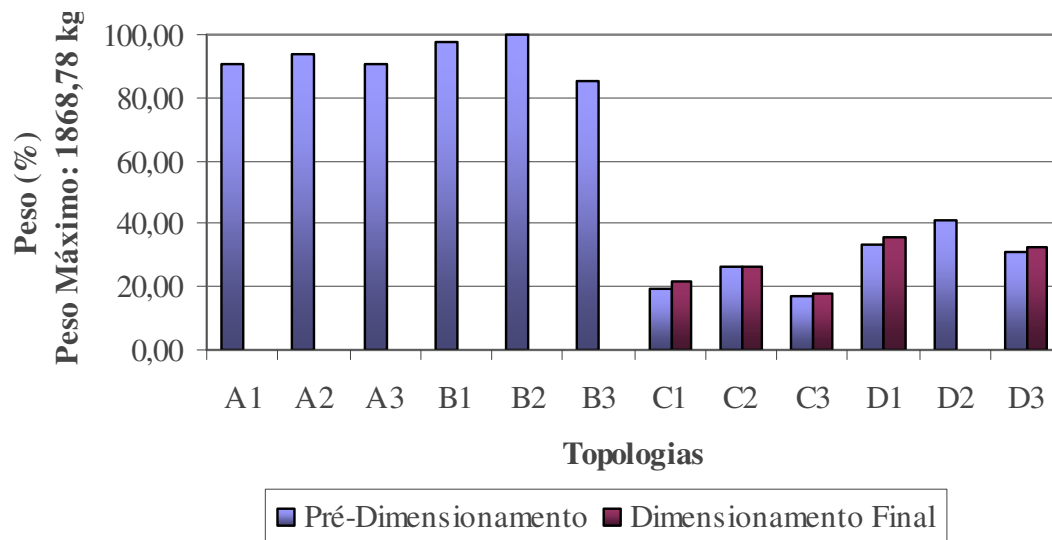


Figura 43 - Pesos das topologias – Vão livre de 20,0m; inclinação 15°

De maneira geral, o comportamento destas topologias é semelhante ao comportamento das topologias de mesmo vão e inclinação de 10°. No entanto, neste caso percebe-se que as topologias do grupo A tendem a ser mais pesadas em relação às mesmas topologias do caso anterior, com um peso muito próximo das topologias do grupo B, que

novamente apresentaram-se como as mais pesadas. Já as topologias do grupo C continuam sendo as mais leves, sendo que neste caso, a diferença entre os tipos C1, C2 e C3 foi muito baixa, mas, ainda assim, prevalecendo a do tipo C3 como a mais leve dentre todas estas. Já as topologias do grupo D, foram novamente as mais pesadas dentre as possíveis de padronizar, porém, a topologia do tipo D2 não obteve êxito no momento de efetuar o dimensionamento final, ocorrendo o mesmo problema encontrado para as topologias do tipo A e B.

5.4.2 Eficiência global

Na Figura 44 é possível identificar a eficiência global para as topologias destinadas a cobrir vãos de 20,0m com inclinação da cobertura de 10°, onde as topologias que apresentaram melhor eficiência global foram novamente as do grupo C, sendo que a topologia do tipo C3 obteve o melhor desempenho, ficando próximo a 0,4.

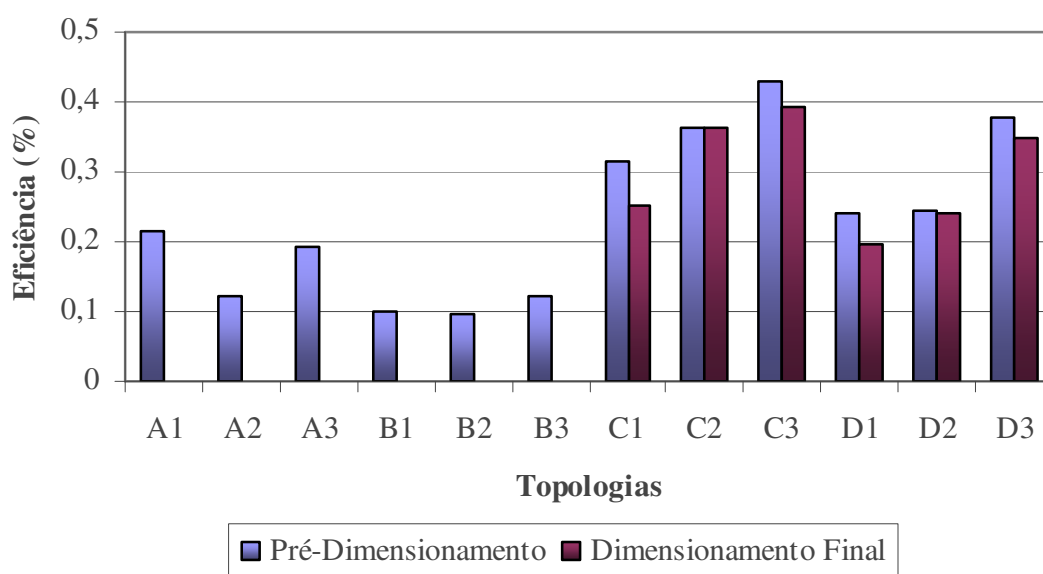


Figura 44- Eficiência das topologias – Vão livre de 20,0m; inclinação 10°

Para as topologias que se propõem a cobrir vãos de 20,0m e inclinação da cobertura de 15°, a Figura 45 demonstra as eficiências globais dos modelos possíveis de executar.

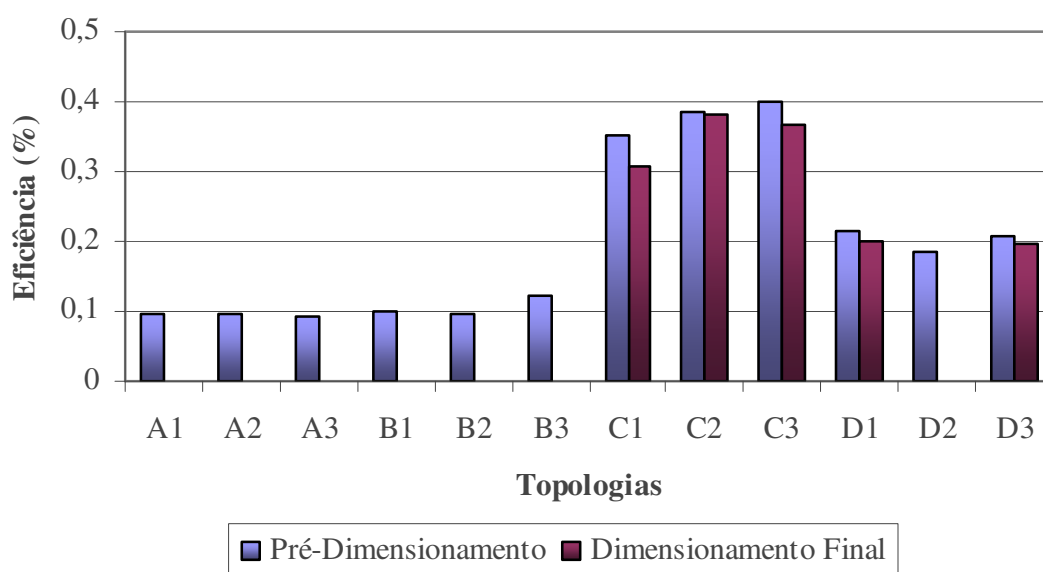


Figura 45 - Eficiência das topologias – Vão livre de 20,0m; inclinação 15°

Na Figura 45 é possível perceber que as topologias do grupo A e do grupo B, apesar de não terem sido possíveis de padronizar, possuem já no pré-dimensionamento, uma eficiência muito baixa, de um valor próximo a 0,1, enquanto que as topologias do tipo C3, que foram as mais eficientes, chegam a valores entre 0,3 e 0,4. Já as topologias do grupo D, tiveram eficiência intermediária, em torno de 0,2, apesar da topologia do tipo D2 não ter sido possível de padronizar seus perfis.

5.4.3 Consumo de aço

Conforme se verifica nos dados dispostos na Figura 46, a topologia com menor consumo de aço por metro linear de suas barras, para vãos de 20,0m, é a do tipo C3, com inclinação de 15°. A topologia com maior consumo foi a do tipo D2, com inclinação de 10°, uma vez que para inclinações de 15° não foi possível obter estes dados, pois a mesma não retornou resultados que permitissem sua padronização e conseqüente fabricação.

As topologias do tipo D1, C2 e C3 obtiveram um consumo de aço muito semelhante para os dois modelos de inclinação estudados, enquanto que na topologia do tipo C1, o consumo de aço foi aproximadamente 30% menor para inclinações de 15°, em relação às inclinações de 10°, o que ocorre praticamente ao contrário para topologias do tipo D3.

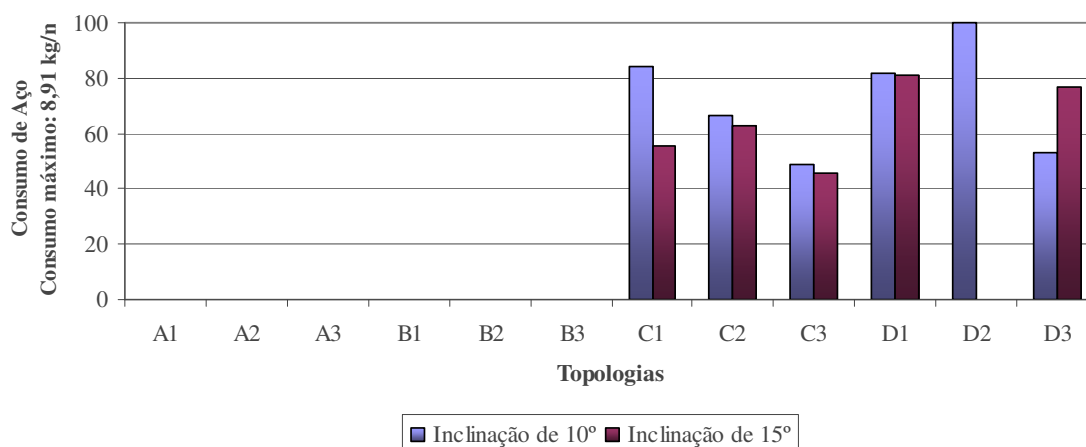


Figura 46 - Consumo de aço das topologias, para vão livre de 20,0m

5.5 Análise das topologias para vão de 25,0m

5.5.1 Peso de aço

Para os modelos de topologia cujo vão livre a cobrir é de 25,0m e inclinação da cobertura 10°, foi possível obter um resultado satisfatório, com perfis construtivamente viáveis, apenas para as topologias C1, C2, C3 e D3, conforme pode-se identificar na Figura 47. As demais topologias apresentaram problemas referentes ao índice de esbeltez muito elevado no momento de padronizar os perfis que as compõem estruturalmente.

A partir dos resultados encontrados, verifica-se que a topologia com menor peso é a do tipo C3, que, se relacionada com a do tipo B2, a mais pesada caso fosse possível sua padronização, apresenta aproximadamente 15% apenas do peso de aço desta topologia tipo B2. Isto demonstra claramente que as topologias do tipo C3 são as mais indicadas para vencer grandes vãos, ao contrário do que ocorre com o restante das topologias estudadas.

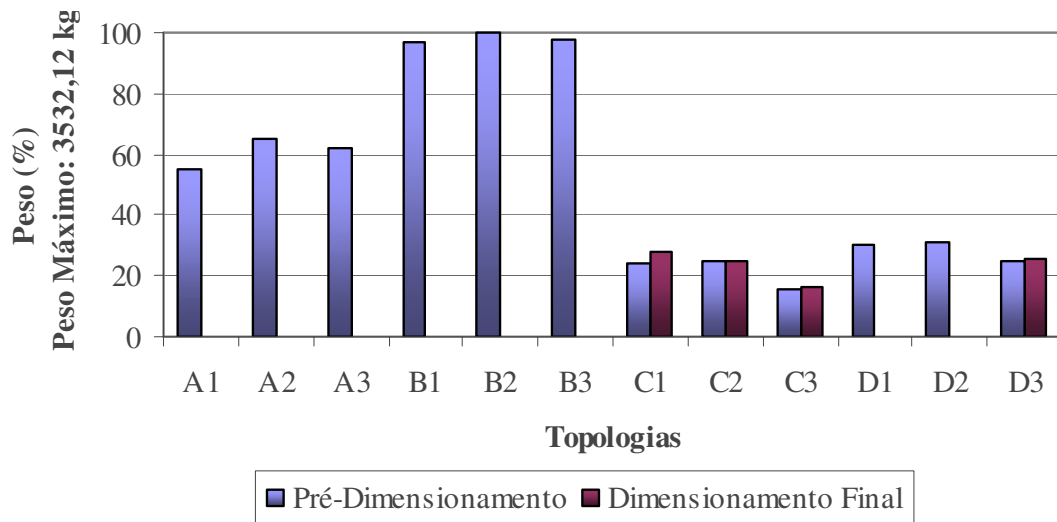


Figura 47 - Pesos das topologias – Vão livre de 25,0m; inclinação 15°

Já no caso das topologias em que o vão a vencer possui igualmente 25,0m, mas com inclinação da cobertura de 15°, seguindo a mesma tendência das topologias com inclinação de 10°, só é possível padronizar as topologias do grupo C, sendo que a topologia mais leve, dentre os três modelos existentes, é novamente a do tipo C3, conforme apresentado na Figura 48.

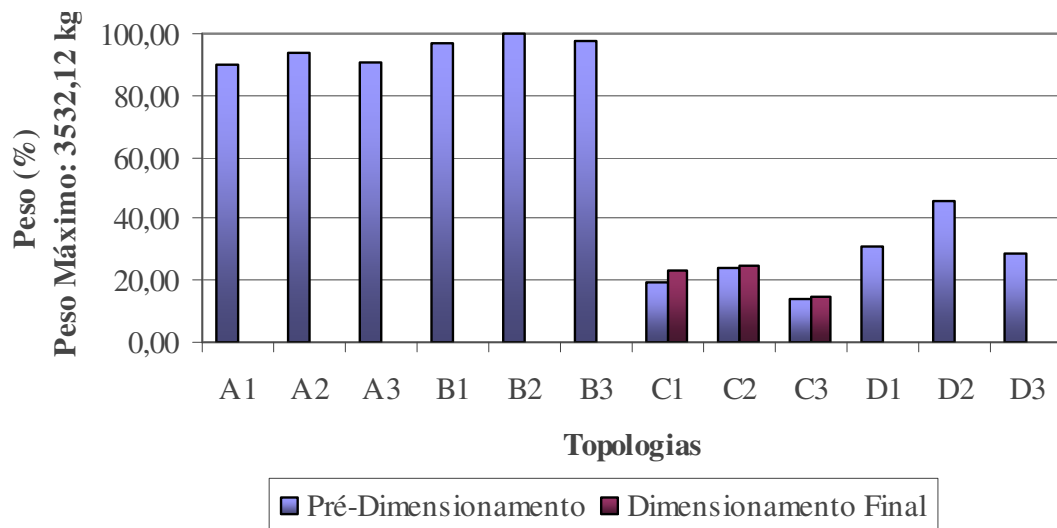


Figura 48 - Pesos das topologias – Vão livre de 25,0m; inclinação 15°

Analisando simultaneamente as Figuras 47 e 48, é possível verificar, também para este caso, assim como no caso das topologias com vão de 20,0m, que o peso dos modelos do

grupo A é muito próximo ao peso dos modelos do grupo B para inclinações de 15°, enquanto que no caso das inclinações de 10° este valor é mais afastado. Já entre as topologias do grupo C, os pesos entre os dois modelos de inclinações são bastante próximos.

5.5.2 Eficiência global

Conforme os dados que constam na Figura 49, para vãos de 25,0m e inclinação da cobertura de 10°, a topologia mais eficiente é a do tipo C3, que também é a de menor peso, conforme identificado na Figura 47, com coeficiente de eficiência acima de 0,4. Já as demais estruturas possuem eficiência entre 0,2 e 0,3, sendo que as eficiências das topologias do grupo A e B, obtidas apenas no pré-dimensionamento, giram em torno de 0,1. Como normalmente ao efetuar o dimensionamento final as topologias possuem sua eficiência reduzida, conclui-se que provavelmente estes dois grupos possuiriam uma eficiência muito reduzida, abaixo de 0,1, e portanto mesmo que fossem possíveis de padronizar e se tornassem construtivamente viáveis, não seriam indicadas para este tipo de aplicação.

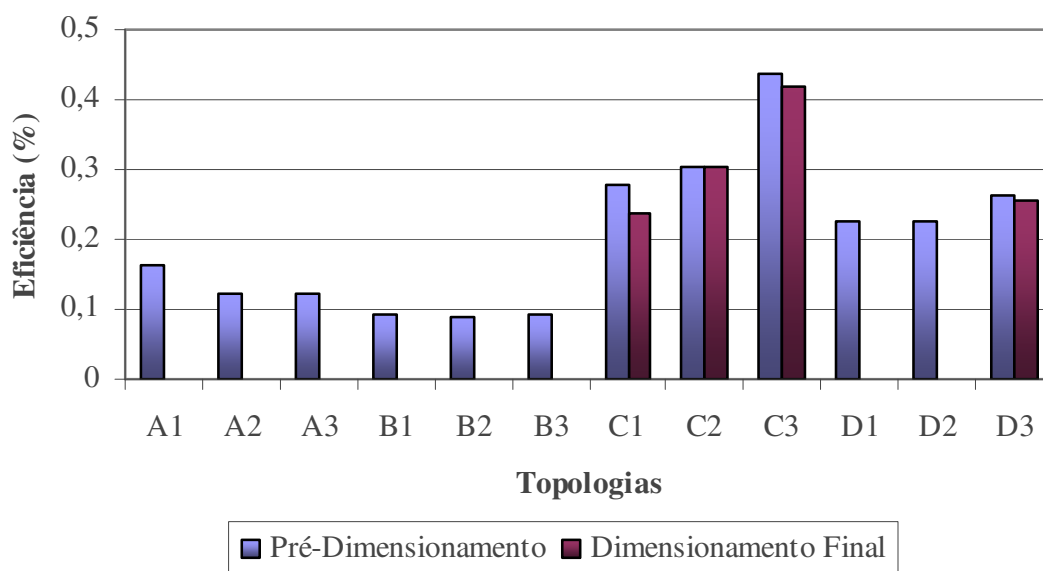


Figura 49 - Eficiência das topologias – Vão livre de 25,0m; inclinação 10°

O mesmo princípio descrito para as topologias com inclinação de 10° e vão de 25,0m, pode ser utilizado para descrever os resultados encontrados para as topologias com vão de 25,0m e inclinação de 15°, que se encontram na Figura 50. Os únicos modelos

dimensionados e construtivamente viáveis são os do grupo C, sendo a topologia com maior eficiência a do tipo C3, com aproximadamente 40% de sua capacidade resistente sendo utilizada.

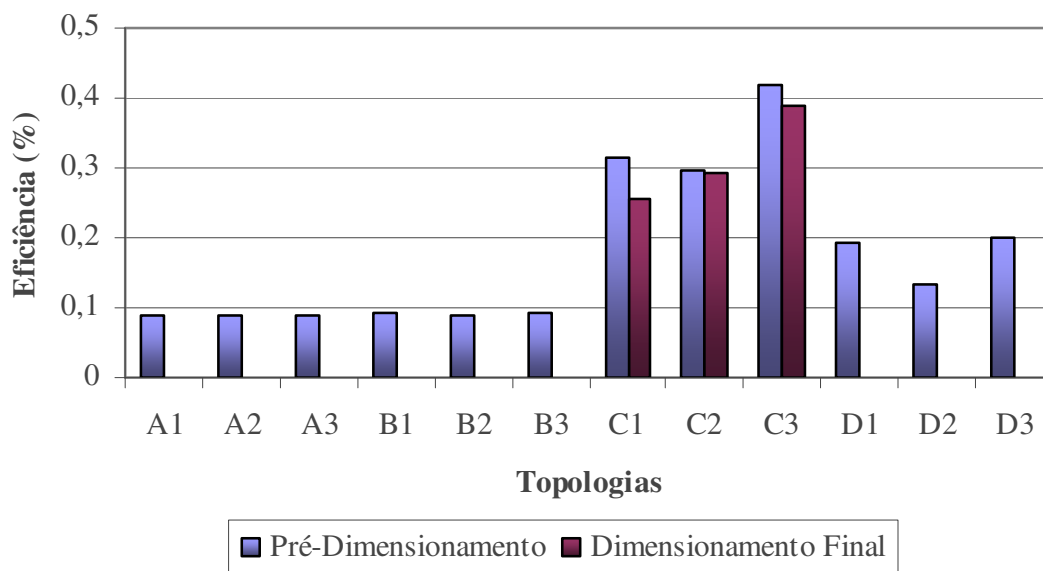


Figura 50 - Eficiência das topologias – Vão livre de 25,0m; inclinação 15°

5.5.3 Consumo de aço

Seguindo a mesma tendência das demais topologias, o menor consumo de aço para as topologias com vão de 25,0m e inclinação da cobertura de 15°, foi obtido na topologia do tipo C3, enquanto o maior consumo de aço foi obtido pelas topologias C1 (Figura 51).

As demais topologias que não apresentam resultado são justamente aquelas que não têm viabilidade construtiva, devido a problemas com índice de esbeltez elevado para os banzos superior e inferior, quando da padronização dos perfis que as compõem.

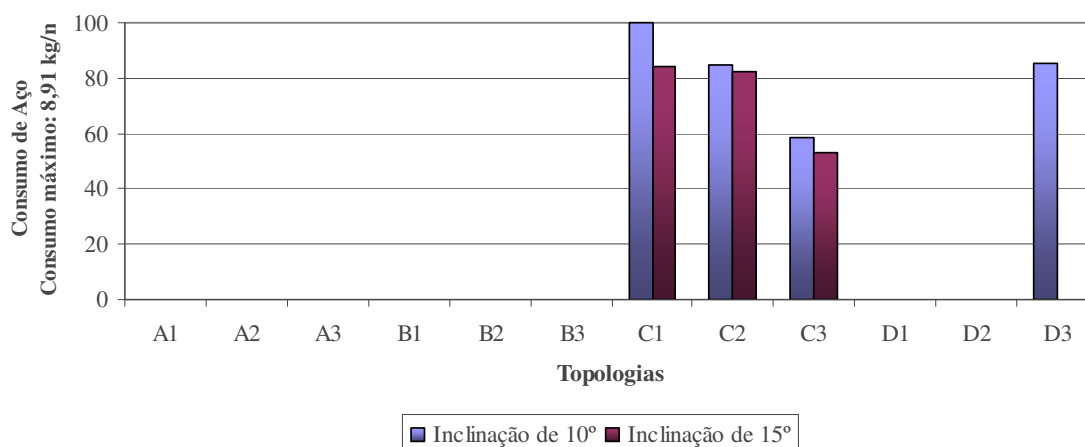


Figura 51 - Consumo de aço das topologias, para vão livre de 25,0m

5.6 Considerações gerais

Após analisar todos os resultados, é possível fazer algumas considerações referentes aos resultados encontrados. Num primeiro momento, é fato que as topologias do grupo C, que possuem os banzos paralelos e inclinados, de maneira geral, foram as mais leves. Também é possível verificar que dentre estas, a topologia do tipo C3 foi, em todos os casos, sem exceção, a mais leve das topologias estudadas.

Já as topologias do grupo B, com banzo superior em arco e banzo inferior horizontal, foram os modelos que apresentaram o maior peso, seguidas de perto pelas topologias do grupo A. As topologias do grupo D tiveram comportamento muito semelhante ao comportamento das topologias do grupo C, no que se refere ao peso das mesmas, mas, sempre ficando um pouco mais pesadas que estas.

Um fato interessante, que merece uma atenção específica, é que para os vãos maiores de 15,0m, no processo de padronização, durante o dimensionamento final, as estruturas começaram a apresentar problemas de índice de esbeltez elevado para os banzos superior e inferior, de tal forma que no caso das topologias para vão de 25,0m e inclinação de 15°, apenas as do grupo C puderam ser padronizadas. Justamente, as topologias do grupo C foram as únicas que não apresentaram problemas de índice de esbeltez elevado para seus banzos.

No entanto, nas primeiras considerações do estudo, estas topologias do grupo C foram planejadas com um tirante unindo os banzos inferiores, conforme apresenta a Figura 52. Ao processar as mesmas, o software atribuía perfis muito robustos em relação ao restante da estrutura, e, inclusive, não conseguia dimensionar estes tirantes para os vãos acima de 15,0m. Após diversas análises, constatou-se que apesar dos esforços de tração e compressão atuantes sobre estes tirantes serem relativamente baixos, os mesmos apresentavam deformação excessiva, o que causava a utilização destes perfis robustos. Assim, retirando estes tirantes, verificou-se que, apesar de aumentar os esforços atuantes sobre os banzos e treliçados que compõem as topologias, e conseqüentemente as dimensões dos perfis utilizados, as mesmas foram dimensionadas sem maiores problemas, tanto que se apresentaram como as topologias de menor peso dentre todas as estudadas.

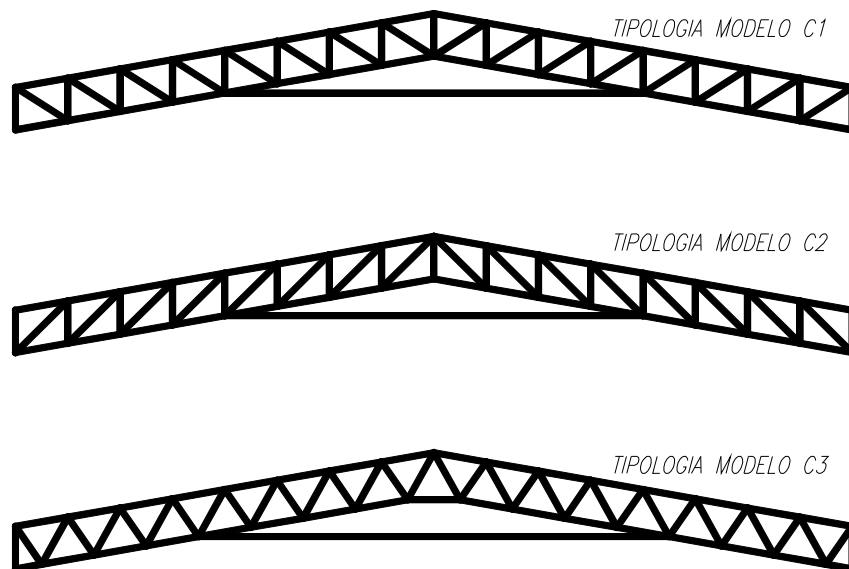


Figura 52 - Topologias do grupo C com tirantes

Quanto à eficiência das topologias, foi possível verificar que nem sempre a estrutura com menor peso teve a melhor eficiência global. Poder-se-ia esperar que as topologias com menor peso tivessem os perfis mais esbeltos, e por este motivo, trabalhariam mais próximas do limite de resistência de seus componentes, por uma relação direta. No entanto, apesar de se verificar que em todos os casos as estruturas tendem a este modelo, ocorre uma variação não dependente do peso, ou seja, em alguns casos as topologias mais leves não se apresentaram como as mais eficientes, mas, sempre estavam muito próximas disto, enquanto que as estruturas mais pesadas, muitas vezes não eram as menos eficientes, mas com valores muito próximos daquelas que se apresentavam menos eficientes.

Contudo, há de se convir que, através das análises dos resultados apresentados, as estruturas quanto mais peso possuem, ou seja, quanto maior o perfil de seus componentes, as mesmas tendem a uma eficiência muito baixa, sendo que o inverso também é verdadeiro.

Os resultados apresentados mostram que as estruturas que apresentam menor peso são também aquelas que obtiveram o menor consumo de aço, mas sem haver uma relação direta, em que a variação do consumo seja diretamente proporcional a variação do peso, ou até mesmo da eficiência global.

Desta forma, é possível dizer que não existe uma relação direta entre peso, eficiência e consumo de aço, mas se pode definir que quanto mais leve, a estrutura tende a ser mais eficiente e consumir menos aço para sua fabricação.

6. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

De maneira geral, pode-se afirmar que para todos os casos estudados, os grupos tiveram comportamento semelhante, sendo o grupo C aquele com menor peso, seguido pelo grupo D. O grupo A foi o terceiro mais leve, enquanto que as topologias do grupo B foram as que apresentaram maior peso. Entretanto, dentro destes grupos distintos ocorreram pequenas variações entre os componentes de um mesmo grupo, onde ora um tipo apresentava menor peso, ora outro. Mas, dentre todas estas características, verificou-se que em todos os casos estudados, indistintamente, a topologia com menor peso de aço e, portanto, com menor custo, é a do tipo C3.

A partir disto, partiu-se para uma análise mais criteriosa das características que compõem este tipo de estrutura, verificando o comportamento quando ocorrem variações na altura, no afastamento entre o treliçado interno e até mesmo na variação da disposição deste treliçado, buscando obter parâmetros que possam auxiliar na identificação de uma topologia ótima, absorvendo da melhor forma possível aos esforços que atuam sobre a estrutura e que tenha o menor peso.

Assim, a estrutura a ser otimizada, é a do tipo C3, para um vão de 15,0m e inclinação da cobertura de 10°.

6.1 Afastamento entre banzos

Para o dimensionamento da topologia do tipo C3, foram utilizados parâmetros recomendados por diversas literaturas da área, sendo que o afastamento entre banzos ficou estabelecido em $\frac{l}{20}$, onde l é o vão livre a vencer. Para verificar qual a relação que a altura possui com os esforços atuantes sobre a estrutura, realizaram-se cálculos com diversos afastamentos entre banzos, sendo estes valores de 0,50; 0,60; 0,70; 0,75; 0,80; 0,90 e 1,0m, sem, no entanto, modificar os afastamentos do treliçado interno.

Na Figura 53, é possível verificar a relação entre a altura e o peso de aço para este tipo de topologia. Todos os resultados obtidos, tanto no pré-dimensionamento, como no dimensionamento final, estão numericamente dispostos no Apêndice 04. Analisando os dados da Figura 53, percebe-se que quanto menor a altura, menor o peso da topologia em questão, sendo que a tendência ocorrida é, conforme se aumenta o afastamento entre os banzos, aumenta o peso da estrutura. Como isto, de certa forma, contradiz os parâmetros adotados, pois seria possível adotar um afastamento entre banzos menor do que 0,75m e ter, como consequência, uma estrutura mais leve, foram feitas verificações da relação entre as tensões absolutas de referência, de compressão e de tração, e o afastamento entre banzos. Os resultados obtidos encontram-se nas Figuras 54, 55, 56 e 57, divididos por hipóteses de carregamento, conforme a Tabela 3.

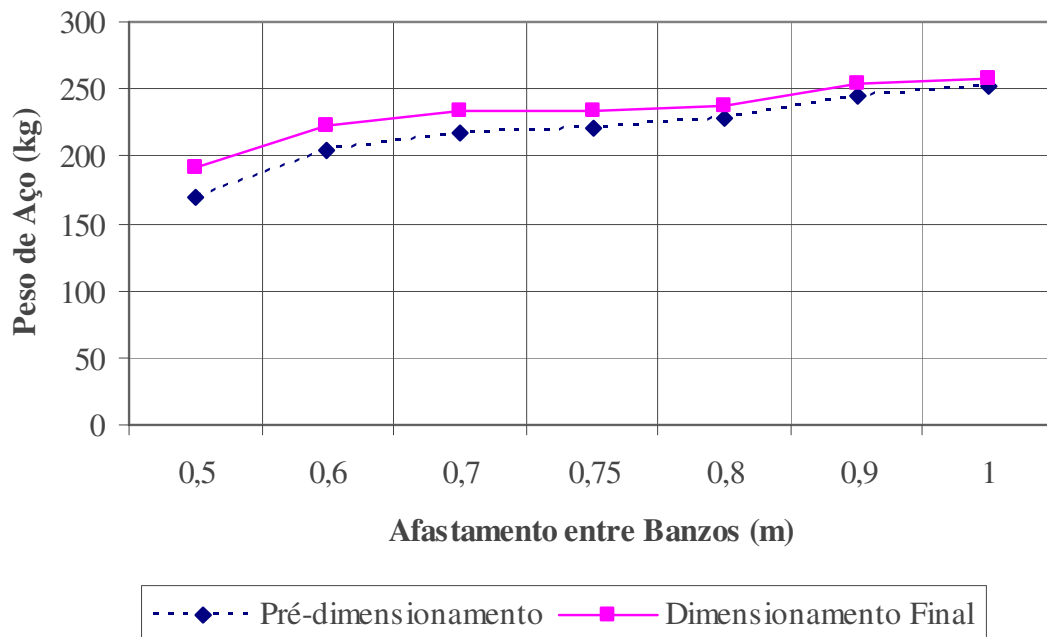


Figura 53 - Afastamento entre banzos X Peso de aço

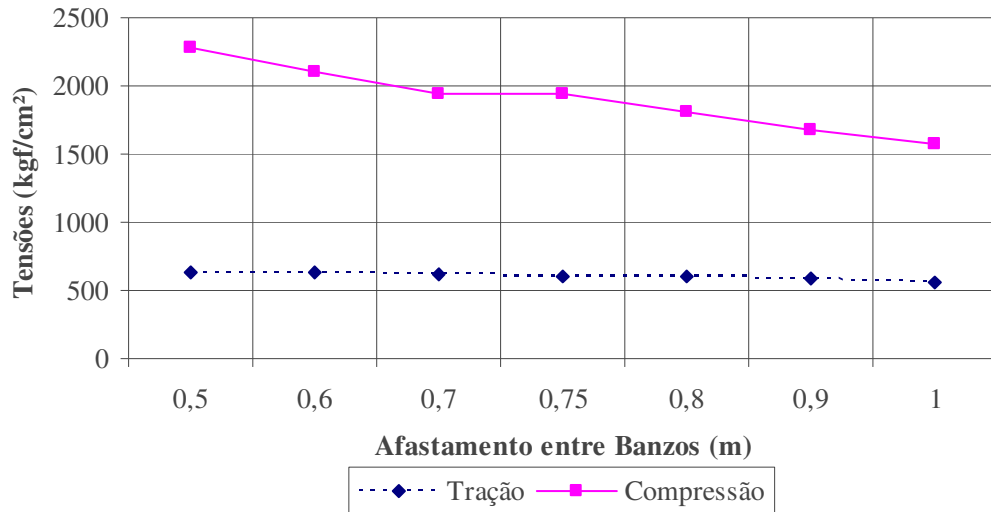


Figura 54 - Afastamento entre banços X Esforços atuantes - Hipótese 01

Na Figura 54, percebe-se que a tensão de tração mantém-se praticamente constante conforme ocorre a variação do afastamento entre banços, mas, no entanto, a tensão de compressão tende a diminuir quando se aumenta o afastamento entre os banços. Nesta hipótese ainda é possível perceber que os esforços de tração são menores do que os de compressão.

Já na Figura 55, relativa às hipóteses 02 e 03, as tensões de tração são maiores que as de compressão, e as mesmas tendem a diminuir ao aumentar o afastamento entre os banços. Este mesmo efeito ocorre para a hipótese 04, que pode ser vista na Figura 56.

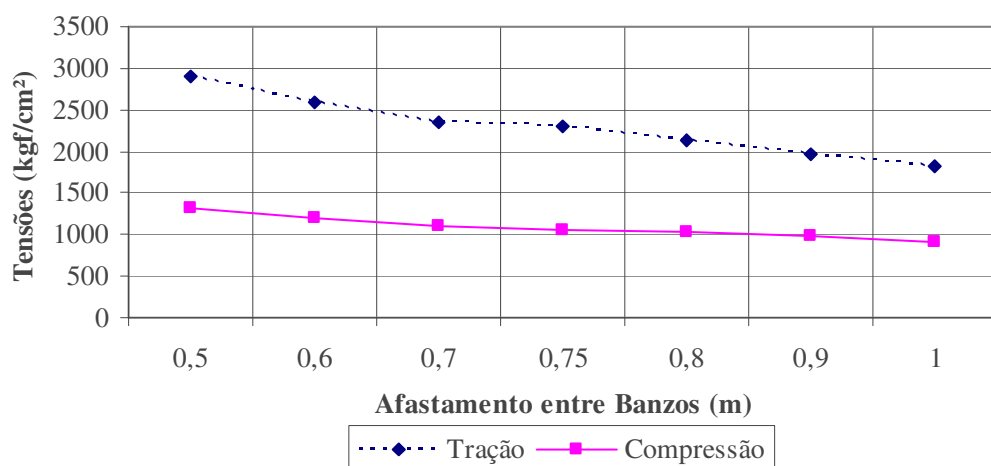


Figura 55 - Afastamento entre banços X Esforços atuantes - Hipótese 02 e 03

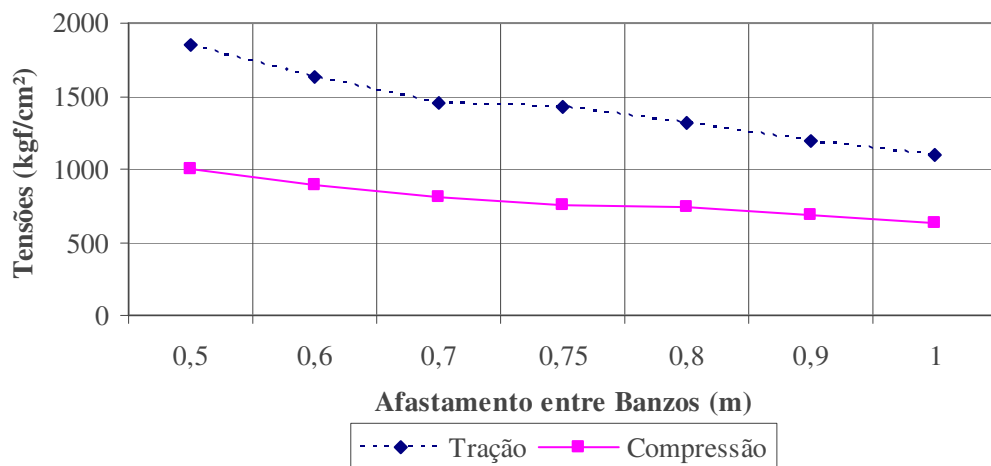


Figura 56 - Afastamento entre banzos X Esforços atuantes - Hipótese 04

Para a hipótese 05, apresentada na Figura 57, as tensões de tração continuam sendo maiores que as de compressão, mas, ao contrário do que ocorre para a hipótese 01, neste caso as tensões de tração tendem a diminuir conforme aumenta o afastamento entre banzos, enquanto as tensões de compressão permanecem praticamente constantes.

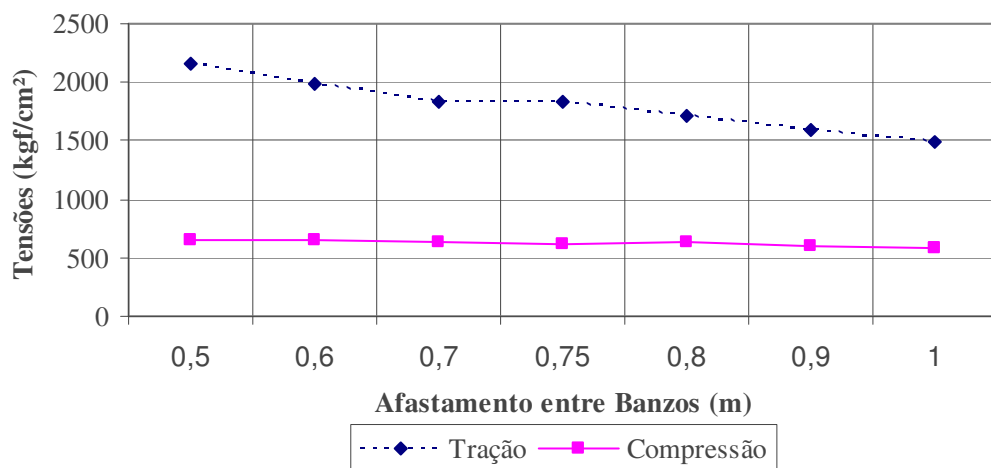


Figura 57 - Afastamento entre banzos X Esforços atuantes - Hipótese 05

Pela análise dos resultados acima descritos, é possível verificar que quanto menor o afastamento entre banzos, maiores os esforços que atuam sobre a estrutura. Portanto, ao aumentar este afastamento, reduzem-se os esforços atuantes, mas, em compensação, aumentam-se os comprimentos das peças que compõem a estrutura, sendo necessário, conseqüentemente um maior comprimento linear dos perfis, que apesar de se tornarem mais esbeltos conforme se aumenta o afastamento entre os banzos, acabam acarretando um maior

peso na estrutura. Desta forma, pode ser interessante, de acordo com a disponibilidade de perfis, trabalhar com estruturas cujo afastamento entre banzos seja menor do que o recomendado, pois o peso de aço necessário será menor do que aquele em que estes afastamentos são maiores, mesmo que os esforços atuantes sejam maiores, acarretando a utilização de perfis mais robustos.

6.2 Afastamento do treliçado interno (Interterças)

Assim como no caso do afastamento entre banzos, o afastamento do treliçado interno (interterças) também deve ser analisado para a verificação de sua influência sobre os esforços atuantes sobre a estrutura. Para fazer a análise da influência do treliçado sobre os esforços e o peso da estrutura, adotaram-se para o afastamento do treliçado interno os valores de 0,50; 0,625; 0,75; 1,0; 1,25, 1,50 e 1,875m, mantendo o afastamento entre banzos de 0,75m, e inclinação da cobertura de 10°.

Na Figura 58 estão dispostos os resultados encontrados nesta análise, onde é possível verificar que um afastamento de até 1,25m tende a reduzir o peso da estrutura, de forma aproximadamente linear, fato que ocorre devido ao menor comprimento linear das peças que compõem a estrutura, fazendo com que os materiais trabalhem mais próximos da sua eficiência total, o que pode ser visto na Figura 59.

Para interterças com afastamento a partir de 1,50m, o peso das estruturas tende a aumentar, pois são necessários materiais mais robustos para vencer os esforços atuantes. No entanto, é possível verificar que nestes casos, esta variação de peso ocorre quase exclusivamente devido a relação entre a capacidade resistente dos perfis e dos esforços atuantes, e não mais pelo comprimento linear de materiais envolvidos, pois apesar deste comprimento cada vez reduzir mais, os perfis adotados são maiores, o que acaba compensando a redução do comprimento linear. Também não é usual utilizar valores de interterças acima de 1,50m, uma vez que isto dificulta o posicionamento das terças que transferem as cargas da cobertura para os banzos.

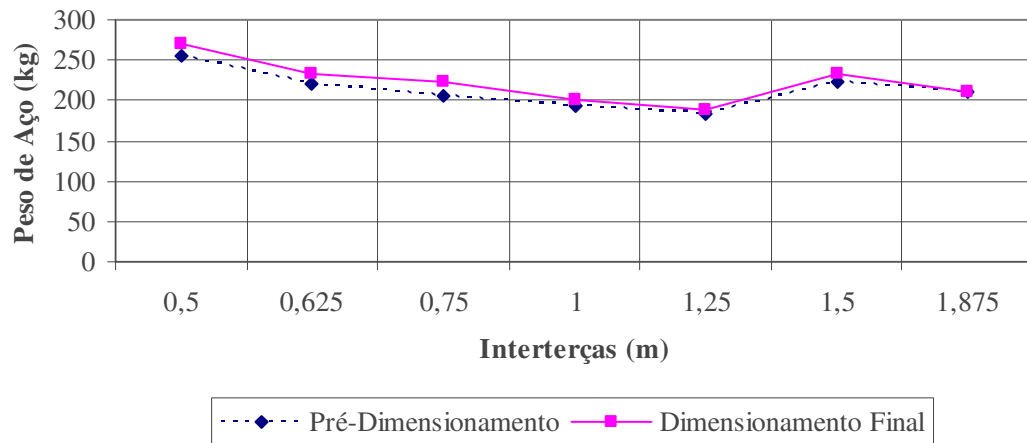


Figura 58 - Interterças X Peso de aço

A Figura 59 apresenta a eficiência global da topologia do tipo C1, apenas com a variação do afastamento das interterças. Percebe-se que há uma grande variação na eficiência, sendo que quanto maior o afastamento, maior a eficiência, seguindo a mesma lógica de que quanto maior o afastamento, maior os esforços atuantes sobre os componentes, que, conseqüentemente, trabalham mais próximos de sua capacidade resistente. No entanto, é importante ter em mente que uma maior eficiência, não significa um menor peso de aço, apesar de isto ocorrer para os casos com afastamento entre terças de até 1,25m.

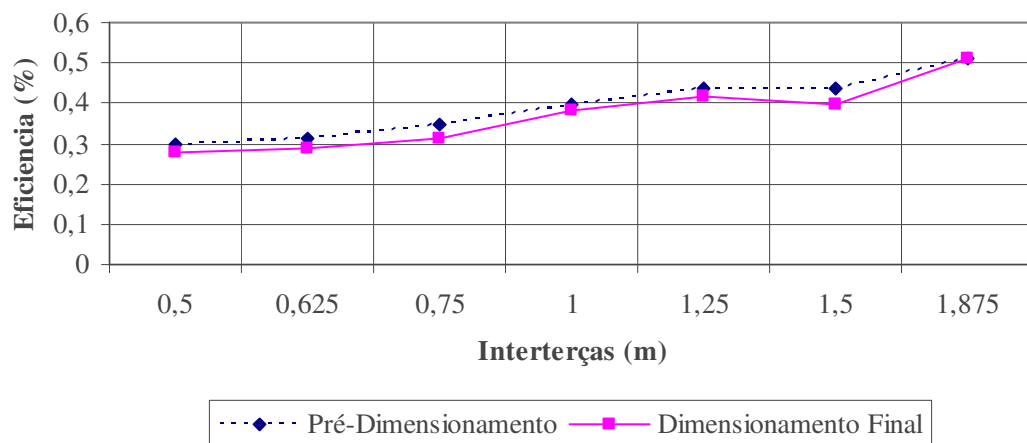


Figura 59 - Interterças X Eficiência global

Já ao se realizar a análise das tensões atuantes, relacionando-as com o afastamento das interterças, fica evidente, através da Figura 60, que aparentemente não existe uma relação direta entre estes dois fatores, pois a variação dos esforços não segue uma tendência, ao

contrário do que ocorre quando se relacionam os afastamentos entre os banzos e as tensões atuantes.

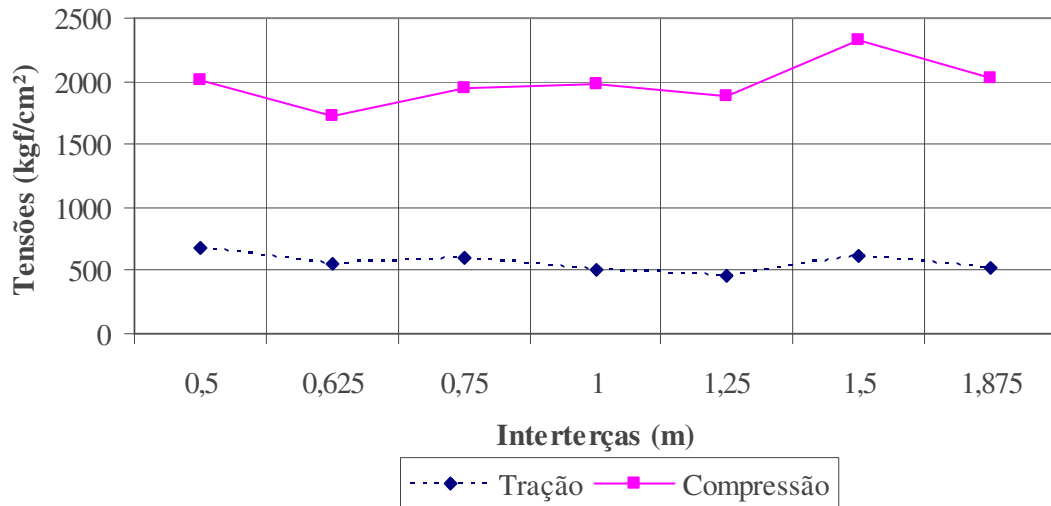


Figura 60 - Interferças X Esforços atuantes - Hipótese 01

Entretanto, ao relacionar as demais hipóteses estudadas, percebe-se através das Figuras 61, 62 e 63, um fato interessante, em que o comportamento, para todas as hipóteses estudadas, apesar dos valores diferentes, segue uma mesma tendência, ou seja, os resultados têm o mesmo comportamento.

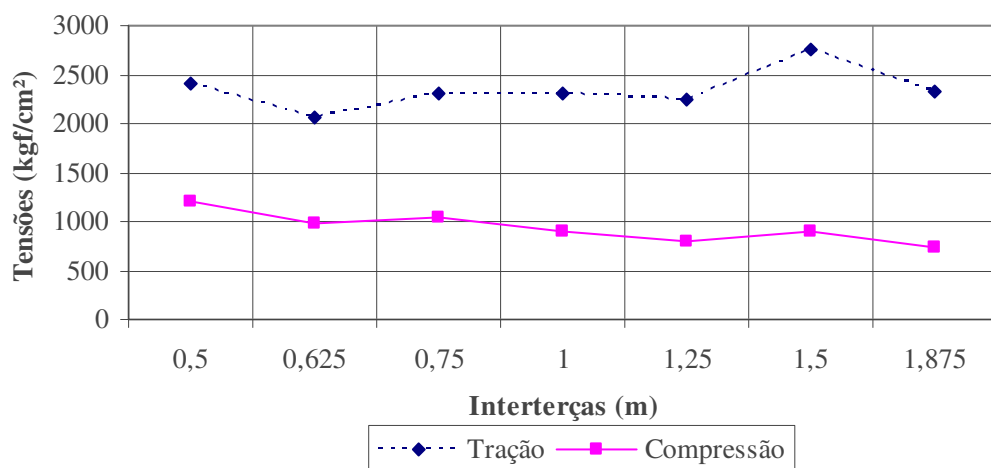


Figura 61 - Interferças X Esforços atuantes - Hipótese 02 e 03

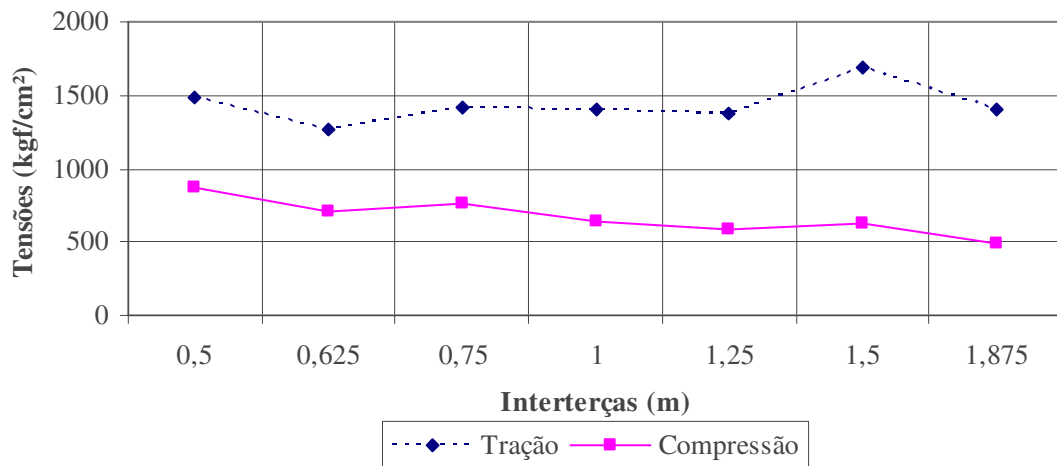


Figura 62 - Interterças X Esforços atuantes - Hipótese 04

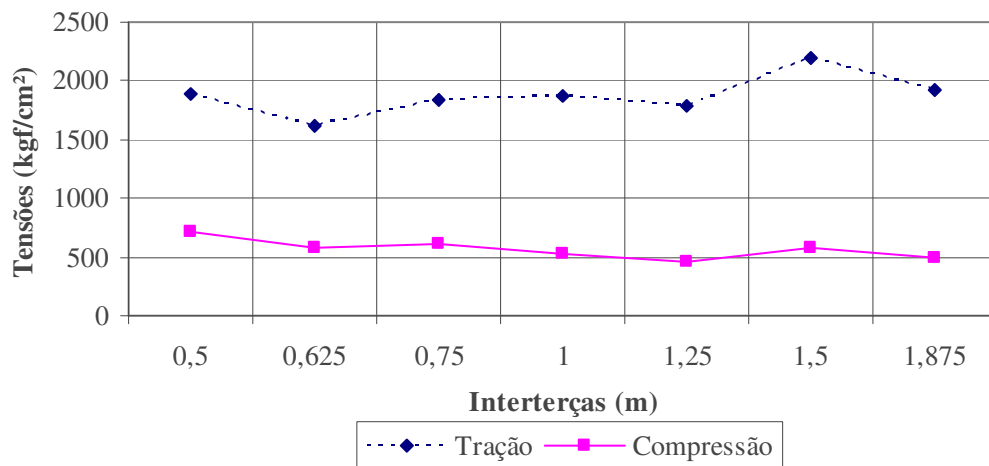


Figura 63 - Interterças X Esforços atuantes - Hipótese 05

Assim, é possível definir que as interterças, quanto mais próximas, maior o peso da estrutura, em virtude do maior comprimento linear de material necessário para confeccionar as mesmas, até um afastamento de 1,25m, valor este em que começa a ocorrer um aumento no peso das estruturas, apesar da diminuição do comprimento linear. Isto ocorre pelo fato de que os componentes tendem a resistir esforços maiores e, portanto, precisam de perfis mais robustos para sua confecção.

As interterças não possuem uma relação direta com os esforços atuantes na estrutura. O afastamento entre interterças não define uma tendência para que os esforços atuantes sejam maiores ou menores de acordo com o valor deste afastamento, apesar de haver uma tendência

direta entre o afastamento e a eficiência global da estrutura, que demonstra que quanto maior o afastamento maior a eficiência.

6.3 Inclinação dos banzos (Cobertura)

Também foi verificada a influencia que a inclinação dos banzos, ou seja, a inclinação da cobertura tem sobre a questão do peso da estrutura, a eficiência global e os esforços atuantes. Na Tabela 7, estão relacionados todos os coeficientes utilizados para a realização do calculo dos modelos com inclinação de 5°; 10°; 15° e 20°, para um vão livre de 15,0m. A estrutura interna, ou seja, o treliçado, bem como o afastamento entre banzos, permanecem com os mesmo valores do modelo original da topologia do tipo C3. Os cálculos destes coeficientes podem ser identificados, detalhadamente no Apêndice 01.

Tabela 7- Coeficientes de cálculo

Coeficientes	Vão Livre (m) e Inclinação da Cobertura (°)			
	15,0 5°	15,0 10°	15,0 15°	15,0 20°
Barlavento	-0,9	-1,2	-1,2	-0,4
Sotavento	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
Vento longitudinal	-0,8	-0,8	-0,8	-0,7
Pressão Interna	0	0	0	0
Sucção Interna	0,3	0,3	0,3	0,3
Vel. Característica (Vk) (km/h)	115	115	115	115

Na Figura 64, é possível analisar o comportamento do peso da estrutura conforme a variação da inclinação da cobertura. Percebe-se que a variação do peso é significativa entre as estruturas com cobertura de 5°, 10° e 15°, sendo que a partir da inclinação de 15°, o peso tende a se estabilizar, não ocorrendo grandes variações. O maior peso foi obtido para inclinação de 5°, sendo que o menor peso obtido foi na estrutura com inclinação de 20°, mas com um valor

muito próximo da estrutura com inclinação da cobertura de 15°. De maneira geral, pode-se deduzir que, quanto menor a inclinação, maior o peso da estrutura.

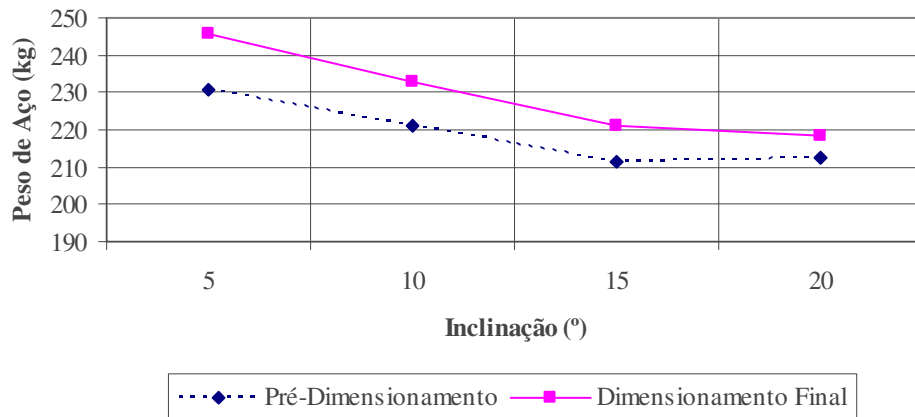


Figura 64- Inclinação dos banzos (Cobertura) X Peso de aço

Já com relação a eficiência global, pelo dados apresentados na Figura 65, percebe-se que a maior eficiência foi obtida para inclinações de 5°, diminuindo este valor praticamente de maneira linear, ao aumentar a inclinação da cobertura. A menor eficiência foi obtida justamente para as estruturas com inclinação da cobertura de 20°, confirmando a tese de que quanto maior a inclinação, menor a eficiência global da estrutura, ou seja, ao aumentar a inclinação, os esforços atuantes tendem a diminuir, fazendo com que os perfis atribuídos fiquem super-dimensionados.

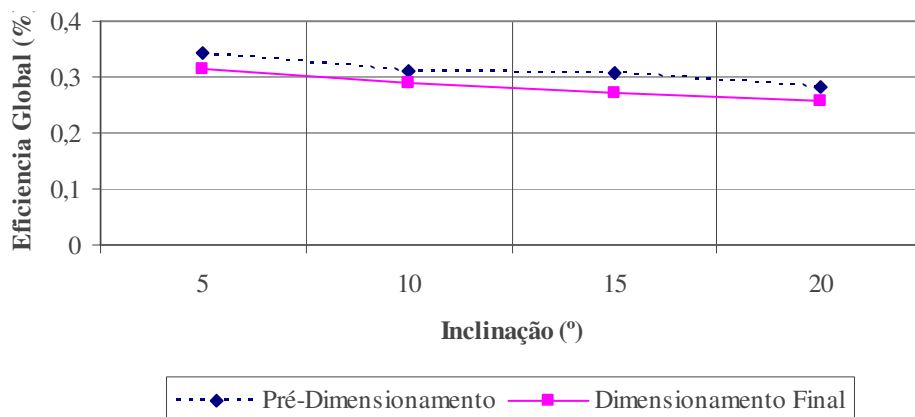


Figura 65 - Inclinação dos banzos (Cobertura) X Eficiência global

Desta forma, é possível verificar, nas Figuras 66, 67, 68 e 69, para as hipóteses 01, 02 e 03, 04 e 05, respectivamente, que conforme aumenta-se a inclinação da cobertura, reduz-se significativamente os esforços de tração e compressão atuantes sobre a estrutura.

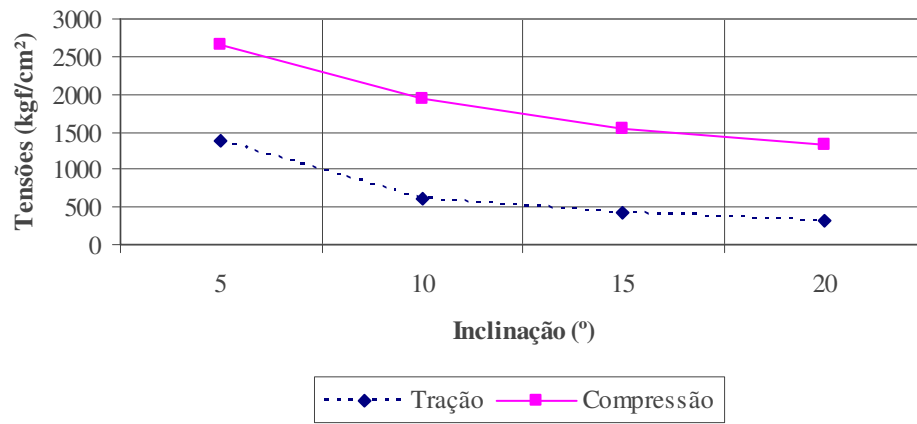


Figura 66 – Inclinação dos banzos (Cobertura) X Esforços atuantes - Hipótese 01

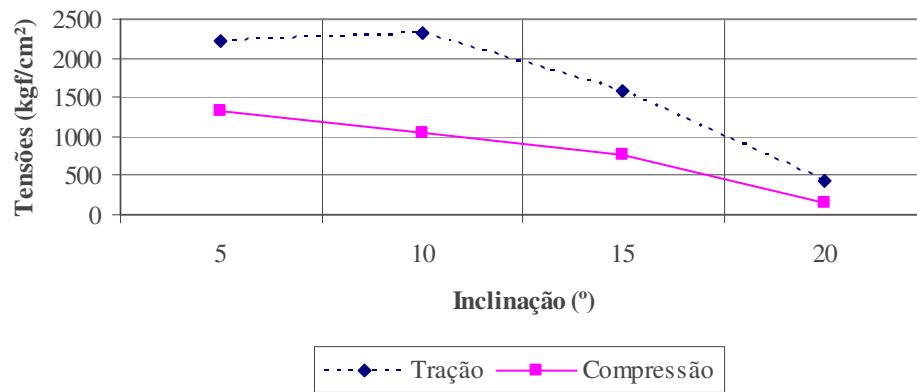


Figura 67 - Inclinação dos banzos (Cobertura) X Esforços atuantes - Hipóteses 02 e 03

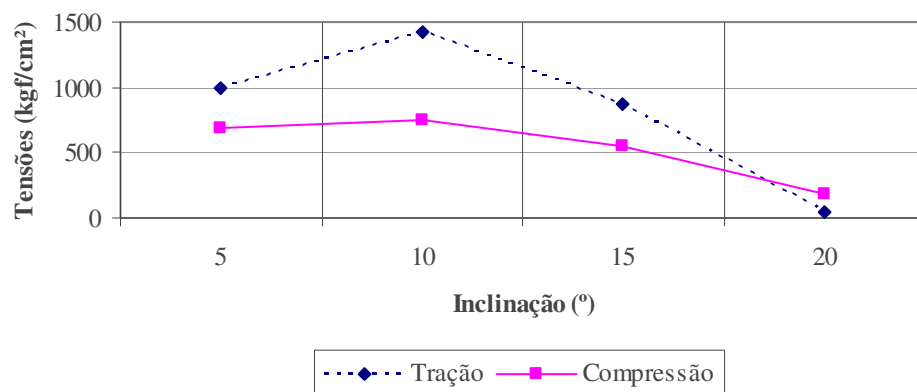


Figura 68 - Inclinação dos banzos (Cobertura) X Esforços atuantes - Hipótese 04

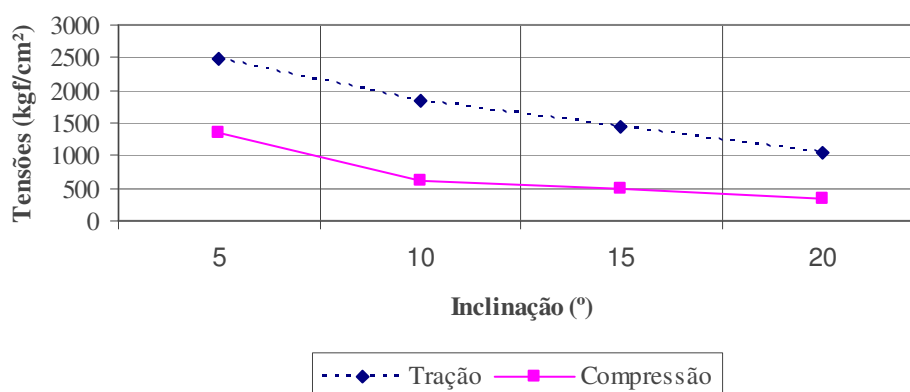


Figura 69 - Inclinação dos banzos (Cobertura) X Esforços atuantes - Hipótese 05

A partir da análise dos resultados acima obtidos, no que diz respeito a influência da inclinação dos banzos na questão do peso da estrutura, bem como relativo aos esforços atuantes, é possível identificar que a inclinação ideal está entre 15° e 20° graus, sendo que abaixo destes valores o peso total da estrutura tende a aumentar. Quanto aos esforços, verifica-se que quanto maior a inclinação, menor o esforço global atuante sobre a estrutura. Inclinações maiores não são recomendadas, pois apesar da tendência de diminuir os esforços atuantes, o que teoricamente diminuiria as dimensões dos perfis necessários para suportar estes esforços, ocorre um aumento significativo no comprimento linear das peças que compõem a estrutura, podendo aumentar o peso global, e também pelo fato de que os componentes para cobertura de pavilhões existentes no mercado, como as cumeeiras, não serem produzidas para inclinações acima de 20°.

6.4 Correlações

Após a análise dos resultados obtidos nos estudos da influência do afastamento entre banzos, do afastamento entre o treliçado interno e ainda da inclinação dos banzos sobre o peso e os esforços atuantes nas estruturas, foi possível realizar algumas correlações entre estes valores e o vão livre da estrutura, estabelecendo parâmetros que auxiliem na definição geométrica de estruturas metálicas treliçadas utilizadas em coberturas de pavilhões industriais. É importante salientar que estas correlações só podem ser consideradas válidas para estruturas que possuam como características de sua topologia, banzos inclinados e distribuição do

treliçado interno baseado nas treliças do tipo Warren, ou seja, que não possuem montantes e cujas diagonais convergem para cima e para baixo, alternadamente.

6.4.1 Afastamento entre banzos

Foi possível verificar que, para um afastamento de 0,50m, o peso da estrutura diminui, mas, no entanto, aumentam-se as dimensões dos perfis e os esforços atuantes são maiores. Já para um afastamento de 1,0m, os perfis adotados são mais leves, os esforços são menores, mas, pelo aumento do comprimento linear das peças, o peso é maior do que para afastamentos de 0,50m. Para que haja uma melhor combinação entre peso e esforços, é interessante manter um valor intermediário, sendo definido então o valor ótimo de 0,75m.

Analisando os estudos de Magalhães e Malite (1998), que determinam que o valor ótimo para o afastamento entre banzos está entre $\frac{l}{18}$ a $\frac{l}{20}$, percebe-se que a relação utilizada por estes dois autores é definida pela fórmula $\frac{l}{x} = Af$, onde “l” é o vão livre, “x” o parâmetro divisor e “Af” o afastamento entre banzos. Aplicando esta mesma relação, valendo-se do valor de afastamento entre banzos considerado ótimo por este estudo, obtém-se que $\frac{l}{x} = Af \therefore \frac{15,0m}{x} = 0,75m \therefore x = \frac{15,0m}{0,75m} \therefore x = 20$, onde se define que a equação geral para identificar o afastamento ótimo inicial, para as estruturas metálicas treliçadas utilizadas em coberturas de pavilhões industriais, cujos banzos sejam paralelos e inclinados, com distribuição do treliçado interno baseado nas treliças Warren, em função do vão livre a vencer, seja $\frac{l}{20}$.

Então, verificando o resultado obtido por este estudo e comparando o mesmo com as recomendações de Magalhães e Malite (1998), constata-se que o valor obtido neste estudo se enquadra nos parâmetros definidos por estes dois autores, que determinam que o afastamento ideal para os banzos, em função do vão livre a vencer, seja $\frac{l}{18}$ a $\frac{l}{20}$, onde “l” é o valor do vão livre.

6.4.2 Afastamento do treliçado interno (Interterças)

A análise dos resultados encontrados referentes a influência do afastamento do treliçado interno sobre o peso da estrutura, define claramente, através da Figura 58, que o menor peso é obtido quando se tem afastamentos situados entre 1,0 e 1,25m. Assim, é possível estabelecer que o valor do afastamento do treliçado ideal, em relação ao vão livre a vencer, pode ser

obtido pelas relações $\frac{l}{x} = Af \therefore \frac{15,0m}{x} = 1,0 \text{ m} \therefore x = \frac{15,0m}{1,0m} \therefore x = 15$ e ainda

$\frac{l}{x} = Af \therefore \frac{15,0m}{x} = 1,25 \text{ m} \therefore x = \frac{15,0m}{1,25m} \therefore x = 12$. Através da elaboração de um parâmetro mais

global, estabelece-se que, para qualquer vão deste tipo de estrutura que está sendo analisado, o afastamento do treliçado interno deve estar na ordem de $\frac{l}{12}$ e $\frac{l}{15}$, onde “ l ” é o valor do vão livre.

6.4.3 Inclinação dos banzos (Cobertura)

Os resultados referentes a influencia da inclinação dos banzos sobre o peso da estrutura demonstraram que a inclinação ideal, dentro dos valores estudados e normalmente utilizados na prática, está na ordem de 15° a 20°. Para estas inclinações, obteve-se o menor peso de aço e ainda, um menor esforço global atuantes sobre a estrutura.

6.5 Aplicação das correlações

No intuito de validar as correlações obtidas, foi desenvolvido um novo processo de cálculo, otimizando as estruturas conforme as correlações para o afastamento entre banzos, afastamento entre terças (interterças) e inclinação dos banzos (cobertura), sendo que os parâmetros adotados foram, respectivamente, $\frac{l}{20}$; $\frac{l}{15}$ e 15°. As dimensões podem ser

verificadas na Tabela 8, e os resultados detalhados deste estudo podem ser encontrados no Apêndice 07.

Tabela 8 - Principais dimensões das estruturas otimizadas

Vão livre (m)	Afastamento dos banzos (m)	Interterças (m)	Inclinação dos banzos (Cobertura)
5,0	0,25	0,333	15°
10,0	0,50	0,666	15°
15,0	0,75	1,000	15°
20,0	1,00	1,333	15°
25,0	1,25	1,666	15°

A Figura 70 apresenta os resultados referentes ao peso das estruturas inicialmente dimensionadas, para a análise do peso de aço, juntamente com o peso obtido com a otimização das estruturas após a aplicação dos parâmetros estabelecidos neste capítulo. Assim, é possível verificar que, exceto onde tem-se um vão livre de 25,0m, as estruturas otimizadas tem um comportamento ótimo, com pesos muito próximos e até mesmo abaixo dos pesos obtidos nas análises iniciais. Para as topologias com vão livre de 25,0m, os parâmetros indicados geraram pesos maiores do que nas topologias não otimizadas, o que indica que as relações aqui estabelecidas não são as mais apropriadas para estes vãos, devendo ser feita uma análise paralela para identificar quais os parâmetros ideais para vãos maiores de 20,0m.

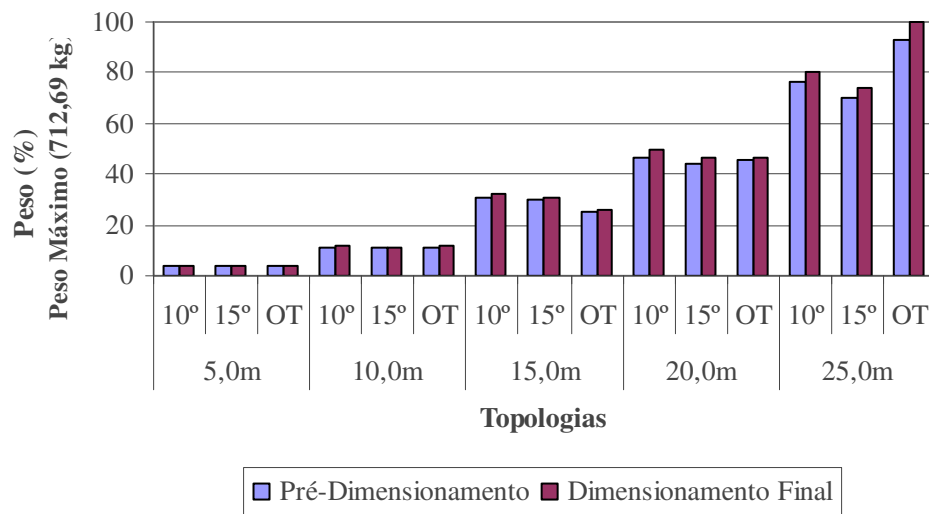


Figura 70- Análise de pesos na otimização

No que diz respeito a eficiência global da estrutura para as topologias otimizadas, é possível verificar na Figura 71 que, exceto para o vão de 25,0m, as eficiências globais apresentaram-se ligeiramente maiores do que as eficiências dos modelos inicialmente estudados, o que indica que os parâmetros estabelecidos contribuem para uma melhor aproveitamento das capacidades estruturais dos perfis atribuídos, salientando ainda mais a validade destas relações para vãos de até 20,0m.

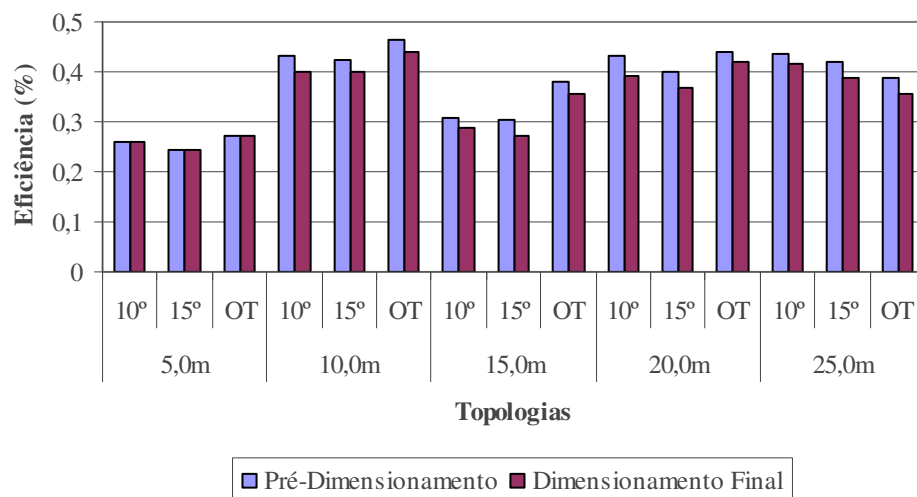


Figura 71 - Análise da eficiência na otimização

Já a Figura 72, apresenta os resultados referentes ao consumo de aço, onde é possível perceber que as topologias otimizadas com vão de até 20,0m possuem um consumo de aço

bastante semelhante ao consumo das topologias inicialmente analisadas. Como era de se esperar, na topologia com vão de 25,0m, este consumo ficou bastante além das demais topologias do mesmo vão, o que indica mais uma vez a necessidade de estabelecer parâmetros distintos para as estruturas cujos vãos ficam acima de 20,0m.

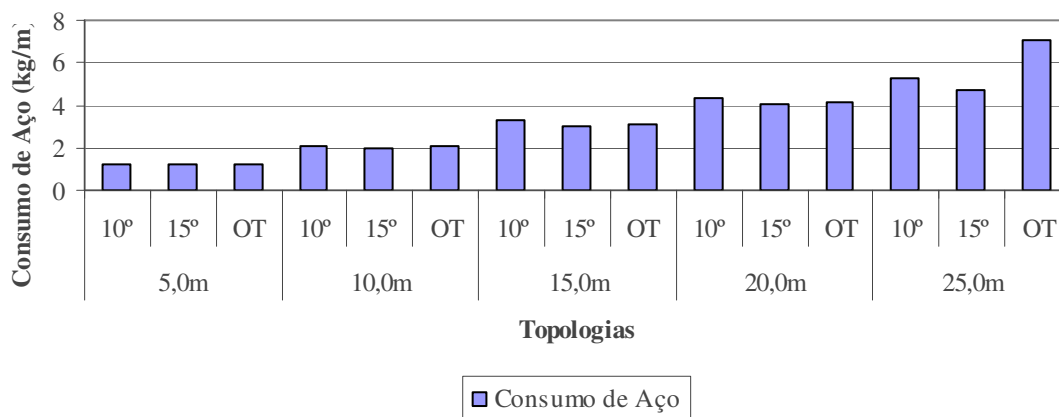


Figura 72 - Análise do consumo de aço na otimização

6.6 Considerações gerais

Analisando todos os resultados e as correlações efetuadas para as topologias com banzos inclinados e distribuição do treliçado interno baseado nas treliças do tipo Warren, ou seja, que não possuem montantes e cujas diagonais convergem para cima e para baixo, alternadamente, pode-se definir alguns parâmetros geométricos que auxiliam o projetista no momento de iniciar os cálculos estruturais para este modelo de estrutura.

Apesar de estes parâmetros terem apresentado valores maiores do que os esperados para vãos acima de 20,0m, ainda assim os mesmos possuem validade e podem ser utilizados sem maiores problemas, pois estabelecem um ponto de partida, ficando a cargo do projetista fazer os devidos ajustes para obter uma otimização maior para as estruturas que está analisando, se assim o desejar, desde que a mesma estabeleça as condições geométricas do modelo aqui estudado.

Assim, estipulando-se o vão livre a vencer (l), define-se que:

1. O afastamento entre banzos deve estar situado entre $\frac{l}{18}$ a $\frac{l}{20}$;
2. O afastamento do treliçado interno deve estar entre $\frac{l}{12}$ e $\frac{l}{15}$;
3. A inclinação da cobertura deve estar entre 15° e 20° .

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Conclusões do trabalho

7.1.1 Análise e dimensionamento estrutural

Este trabalho apresentou a análise do desempenho de 12 modelos distintos de topologias de estruturas treliçadas utilizadas em coberturas de pavilhões industriais, para 5 vãos livres diferentes, constituindo 105 modelos analisados. Para tanto, foi utilizado o software de análise e dimensionamento de estruturas metálicas ENGMET 99, que se apresentou, de maneira geral, como uma ferramenta ágil e que apresenta resultados práticos satisfatórios.

Foram analisados o peso da estrutura, a eficiência global e o consumo de aço de cada uma das topologias, sendo constatado que a topologia com o menor peso foi aquela em que os banzos são paralelos e inclinados e a distribuição do treliçado interno é baseada nas treliças do tipo Warren, que não possuem montantes e cujas diagonais convergem para cima e para baixo, alternadamente.

De maneira geral, as topologias cujos banzos são paralelos e inclinados, são as mais leves, enquanto que as topologias cujos banzos superiores são em forma de arco são as mais pesadas.

Constatou-se ainda que as estruturas mais leves são as mais eficientes, enquanto as estruturas mais pesadas possuem eficiência mais baixa. Também em relação ao consumo de aço, quanto mais leve a estrutura, menor o consumo de aço, sendo também o inverso verdadeiro. No entanto, esta relação não é direta, ou seja, a estrutura mais leve não necessariamente é a mais eficiente e a que menos consome aço, bem como a mais pesada não garante a menor eficiência e o maior consumo de aço.

7.1.2 Otimização estrutural

No estudo de otimização estrutural, foi verificado mais detalhadamente as influências de certas características geométricas da estrutura que obteve o melhor desempenho entre todas as 105 topologias analisadas, criando uma relação paramétrica entre os dados analisados e o vão livre da estrutura, sendo que este último foi definido, para esta parte do estudo, em 15,0 metros.

Verificou-se a influência do afastamento entre os banzos, do afastamento do treliçado interno e ainda da inclinação dos banzos sobre o peso da estrutura e os esforços atuantes. Assim, concluiu-se que:

1. Quanto menor o afastamento entre banzos, menor o peso da estrutura, mas, maior os esforços atuantes sobre a mesma. O valor considerado ótimo, cuja relação entre peso e esforços seja equilibrada, é de 0,75m;
2. Quanto maior o afastamento do treliçado interno, menor o peso da estrutura e menor os esforços atuantes sobre a mesma, até um limite de 1,25m, sendo que a partir deste valor a estrutura começa a ter seu peso elevado novamente;
3. Quanto maior a inclinação da cobertura, menor o peso e menor os esforços, sendo que a inclinação ideal situa-se entre 15° e 20°.

A partir destes valores, foram efetuadas correlações entre o vão livre e estas características geométricas estudadas, a fim de obter equações gerais que auxiliem na definição destas características geométricas para qualquer vão que possa vir a ser estudado, desde que mantidas as condições de contorno deste modelo otimizado.

Desta forma, conclui-se que:

1. O afastamento entre banzos deve ser da ordem de $\frac{l}{18}$ a $\frac{l}{20}$, onde “l” é o vão livre a vencer;
2. O afastamento do treliçado interno deve estar entre $\frac{l}{12}$ e $\frac{l}{15}$, onde “l” é o vão livre a vencer;

3. A inclinação da cobertura deve estar entre 15° e 20°.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Seguindo a mesma linha de pesquisa, a fim de complementar os resultados aqui apresentados, propõem-se algumas sugestões para trabalhos futuros, quais sejam:

- Verificar as reações das topologias estudadas, analisando a influência dos valores destas no dimensionamento dos pilares;
- Verificar em outro software de análise e dimensionamento estrutural se os problemas encontrados no dimensionamento de alguns elementos (flambagem excessiva, índices de esbeltez elevados) continuam ocorrendo e propor soluções para os mesmos;
- Realizar um estudo de otimização, definindo relações e parâmetros para outros modelos de topologias;
- Realizar um estudo de otimização variando a distribuição interna das topologias e procurando criar novos modelos topológicos com melhor eficiência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e Execução de estruturas de aço de edifícios (método dos estados limites)**. NB 14 (NBR 8800). Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ações e Segurança nas estruturas**. NBR 8681. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cargas para o cálculo de estruturas de edifícios**. NBR 6120. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Forças devido ao vento em edificações**. NBR 6123. Rio de Janeiro, 1988.

AZEVEDO, Álvaro F. M.; FONSECA, Antonio Adão da; OLIVEIRA, Rui. **Optimização da Forma de uma ponte metálica**. España: Métodos Numéricos en Ingeniería, 2002. p. 02.

BUCHAIM, Roberto. **Notas de Aula de Mecânica das Estruturas II**: Cap. 3 - Treliças Isostáticas. Universidade Estadual de Londrina – Centro de Tecnologia e Urbanismo. Disponível em <http://www.uel.br/ctu/dtru/DISCIPLINAS/3tru022/3tru22.html>. Acesso em 08/2007.

DIAS, Luis Andrade de Mattos. **Estruturas de Aço**: Conceitos, Técnica e Linguagem. 2º ed. São Paulo: Zigurate Editora, 1998.

METALDATA Engenharia e Processamento. **Manual do Usuário do Software ENGEMT99**. Porto Alegre: 1999.

NOVOTNY, A.; FEIJÓO, R.; TAROCO, E.; PADRA, C. **Derivada topológica via análise de sensibilidade a mudança de forma na otimização topológica**. In: Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. v. 18. 2002. pp 499-519.

PINHEIRO, Antonio Carlos da Fonseca Bragança. **Estruturas Metálicas** – Cálculo, detalhes, exercícios e projetos. 1º ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 2003. p. 01-10; 31-34.

PFEIL, Walter; PFEIL Michele S. **Estruturas de Aço**: dimensionamento prático. 7º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000. p. 01-04; 18-34; 194-198.

PRUDENTE, Mauro. **Otimização de Estruturas de Aço treliçadas planas com variáveis discretas**. 1998. 342f. Dissertação de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos.

SANTOS, Oscar Navarro. **Estruturas Metálicas**. Escola Federal de Engenharia de Itajubá: Itajubá, MG. [1981?]. p. 120.

SOUZA JR, Dogmar Antonio de. **Otimização pelo método dos Algoritmos genéticos e dimensionamento de estruturas tubulares metálicas espaciais com barras cruzadas para coberturas**. 2005. 145f. Dissertação de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

Apêndice 01

Cálculos dos coeficientes eólicos

Tesoura com vão de 5,0m – Inclinação de 10°

a) Pressão dinâmica do vento

$$V_o = 45 \text{ m/s}$$

$$V_k = S_1 \times S_2 \times S_3 \times V_o$$

$$S_1 = 1,0; \quad S_2 = 0,75 \quad S_3 = 0,95$$

$$V_k = 1,0 \times 0,75 \times 0,95 \times 45 \rightarrow V_k = 32,06 \cong 32 \text{ m/s} \cong 115 \text{ km/h}$$

b) Coeficientes de pressão e forma da cobertura

$$\frac{h}{b} = \frac{6,0}{5,0} = 1,2 \rightarrow \text{faixa de } \frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$$

$$\theta = 10^\circ$$

$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 0^\circ$	
EF	GH	EG	FH
-1,1	-0,6	-0,8	-0,6

c) Pressão e sucção interna

Considerando 04 faces igualmente permeáveis

$$C_{pi} = -0,3 \text{ e } 0 \rightarrow \text{Pressão interna} = 0^* \text{ e Sucção interna} = 0,3$$

*Quando as quatro faces são impermeáveis, não há pressão interna.

Tesoura com vão de 10,0m – Inclinação de 10°

a) Pressão dinâmica do vento

$$V_o = 45 \text{ m/s}$$

$$V_k = S_1 \times S_2 \times S_3 \times V_o$$

$$S_1 = 1,0; \quad S_2 = 0,75 \quad S_3 = 0,95$$

$$V_k = 1,0 \times 0,75 \times 0,95 \times 45 \rightarrow V_k = 32,06 \cong 32 \text{ m/s} \cong 115 \text{ km/h}$$

b) Coeficientes de pressão e forma da cobertura

$$\frac{h}{b} = \frac{6,0}{10,0} = 0,6 \rightarrow \text{faixa de } \frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$$

$$\theta = 10^\circ$$

$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 0^\circ$	
EF	GH	EG	FH
-1,1	-0,6	-0,8	-0,6

c) Pressão e sucção interna

Considerando 04 faces igualmente permeáveis

$$C_{pi} = -0,3 \text{ e } 0 \rightarrow \text{Pressão interna} = 0^* \text{ e Sucção interna} = 0,3$$

* Quando as quatro faces são impermeáveis, não há pressão interna.

Tesoura com vão de 15,0m – Inclinação de 10°

a) Pressão dinâmica do vento

$$V_0 = 45 \text{ m/s}$$

$$V_k = S_1 \times S_2 \times S_3 \times V_0$$

$$S_1 = 1,0; \quad S_2 = 0,75 \quad S_3 = 0,95$$

$$V_k = 1,0 \times 0,75 \times 0,95 \times 45 \rightarrow V_k = 32,06 \cong 32 \text{ m/s} \cong 115 \text{ km/h}$$

b) Coeficientes de pressão e forma da cobertura

$$\frac{h}{b} = \frac{6,0}{15,0} = 0,4 \rightarrow \text{faixa de } \frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$$

$$\theta = 10^\circ$$

$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 0^\circ$	
EF	GH	EG	FH
-1,2	-0,4	-0,8	-0,6

c) Pressão e sucção interna

Considerando 04 faces igualmente permeáveis

$$C_{pi} = -0,3 \text{ e } 0 \rightarrow \text{Pressão interna} = 0^* \text{ e Sucção interna} = 0,3$$

* Quando as quatro faces são impermeáveis, não há pressão interna.

Tesoura com vão de 20,0m – Inclinação de 10°

a) Pressão dinâmica do vento

$$V_o = 45 \text{ m/s}$$

$$V_k = S_1 \times S_2 \times S_3 \times V_o$$

$$S_1 = 1,0; \quad S_2 = 0,75 \quad S_3 = 0,95$$

$$V_k = 1,0 \times 0,75 \times 0,95 \times 45 \rightarrow V_k = 32,06 \cong 32 \text{ m/s} \cong 115 \text{ km/h}$$

b) Coeficientes de pressão e forma da cobertura

$$\frac{h}{b} = \frac{6,0}{20,0} = 0,3 \rightarrow \text{faixa de } \frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$$

$$\theta = 10^\circ$$

$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 0^\circ$	
EF	GH	EG	FH
-1,2	-0,4	-0,8	-0,6

c) Pressão e sucção interna

Considerando 04 faces igualmente permeáveis

$$C_{pi} = -0,3 \text{ e } 0 \rightarrow \text{Pressão interna} = 0^* \text{ e Sucção interna} = 0,3$$

* Quando as quatro faces são impermeáveis, não há pressão interna.

Tesoura com vão de 25,0m – Inclinação de 10°

a) Pressão dinâmica do vento

$$V_o = 45 \text{ m/s}$$

$$V_k = S_1 \times S_2 \times S_3 \times V_o$$

$$S_1 = 1,0; \quad S_2 = 0,75 \quad S_3 = 0,95$$

$$V_k = 1,0 \times 0,75 \times 0,95 \times 45 \rightarrow V_k = 32,06 \cong 32 \text{ m/s} \cong 115 \text{ km/h}$$

b) Coeficientes de pressão e forma da cobertura

$$\frac{h}{b} = \frac{6,0}{25,0} = 0,24 \rightarrow \text{faixa de } \frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$$

$$\theta = 10^\circ$$

$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 0^\circ$	
EF	GH	EG	FH
-1,2	-0,4	-0,8	-0,6

c) Pressão e sucção interna

Considerando 04 faces igualmente permeáveis

$$C_{pi} = -0,3 \text{ e } 0 \rightarrow \text{Pressão interna} = 0^* \text{ e Sucção interna} = 0,3$$

* Quando as quatro faces são impermeáveis, não há pressão interna.

Tesoura com vão de 5,0m – Inclinação de 15°

a) Pressão dinâmica do vento

$$V_o = 45 \text{ m/s}$$

$$V_k = S_1 \times S_2 \times S_3 \times V_o$$

$$S_1 = 1,0; \quad S_2 = 0,75 \quad S_3 = 0,95$$

$$V_k = 1,0 \times 0,75 \times 0,95 \times 45 \rightarrow V_k = 32,06 \cong 32 \text{ m/s} \cong 115 \text{ km/h}$$

b) Coeficientes de pressão e forma da cobertura

$$\frac{h}{b} = \frac{6,0}{5,0} = 1,2 \rightarrow \text{faixa de } \frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$$

$$\theta = 15^\circ$$

$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 0^\circ$	
EF	GH	EG	FH
-1,0	-0,6	-0,8	-0,6

c) Pressão e sucção interna

Considerando 04 faces igualmente permeáveis

$$C_{pi} = -0,3 \text{ e } 0 \rightarrow \text{Pressão interna} = 0^* \text{ e Sucção interna} = 0,3$$

- Quando as quatro faces são impermeáveis, não há pressão interna.

Tesoura com vão de 10,0m – Inclinação de 15°

a) Pressão dinâmica do vento

$$V_o = 45 \text{ m/s}$$

$$V_k = S_1 \times S_2 \times S_3 \times V_o$$

$$S_1 = 1,0; \quad S_2 = 0,75 \quad S_3 = 0,95$$

$$V_k = 1,0 \times 0,75 \times 0,95 \times 45 \rightarrow V_k = 32,06 \cong 32 \text{ m/s} \cong 115 \text{ km/h}$$

b) Coeficientes de pressão e forma da cobertura

$$\frac{h}{b} = \frac{6,0}{10,0} = 0,6 \rightarrow \text{faixa de } \frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$$

$$\theta = 15^\circ$$

$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 0^\circ$	
EF	GH	EG	FH
-1,0	-0,6	-0,8	-0,6

c) Pressão e sucção interna

Considerando 04 faces igualmente permeáveis

$$C_{pi} = -0,3 \text{ e } 0 \rightarrow \text{Pressão interna} = 0^* \text{ e Sucção interna} = 0,3$$

* Quando as quatro faces são impermeáveis, não há pressão interna.

Tesoura com vão de 15,0m – Inclinação de 15°

a) Pressão dinâmica do vento

$$V_o = 45 \text{ m/s}$$

$$V_k = S_1 \times S_2 \times S_3 \times V_o$$

$$S_1 = 1,0; \quad S_2 = 0,75 \quad S_3 = 0,95$$

$$V_k = 1,0 \times 0,75 \times 0,95 \times 45 \rightarrow V_k = 32,06 \cong 32 \text{ m/s} \cong 115 \text{ km/h}$$

b) Coeficientes de pressão e forma da cobertura

$$\frac{h}{b} = \frac{6,0}{15,0} = 0,4 \rightarrow \text{faixa de } \frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$$

$$\theta = 15^\circ$$

$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 0^\circ$	
EF	GH	EG	FH
-1,0	-0,4	-0,8	-0,6

c) Pressão e sucção interna

Considerando 04 faces igualmente permeáveis

$$C_{pi} = -0,3 \text{ e } 0 \rightarrow \text{Pressão interna} = 0^* \text{ e Sucção interna} = 0,3$$

* Quando as quatro faces são impermeáveis, não há pressão interna.

Tesoura com vão de 20,0m – Inclinação de 15°

a) Pressão dinâmica do vento

$$V_o = 45 \text{ m/s}$$

$$V_k = S_1 \times S_2 \times S_3 \times V_o$$

$$S_1 = 1,0; \quad S_2 = 0,75 \quad S_3 = 0,95$$

$$V_k = 1,0 \times 0,75 \times 0,95 \times 45 \rightarrow V_k = 32,06 \cong 32 \text{ m/s} \cong 115 \text{ km/h}$$

b) Coeficientes de pressão e forma da cobertura

$$\frac{h}{b} = \frac{6,0}{20,0} = 0,3 \rightarrow \text{faixa de } \frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$$

$$\theta = 15^\circ$$

$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 0^\circ$	
EF	GH	EG	FH
-1,0	-0,4	-0,8	-0,6

c) Pressão e sucção interna

Considerando 04 faces igualmente permeáveis

$$C_{pi} = -0,3 \text{ e } 0 \rightarrow \text{Pressão interna} = 0^* \text{ e Sucção interna} = 0,3$$

* Quando as quatro faces são impermeáveis, não há pressão interna.

Tesoura com vão de 25,0m – Inclinação de 15°

a) Pressão dinâmica do vento

$$V_o = 45 \text{ m/s}$$

$$V_k = S_1 \times S_2 \times S_3 \times V_o$$

$$S_1 = 1,0; \quad S_2 = 0,75 \quad S_3 = 0,95$$

$$V_k = 1,0 \times 0,75 \times 0,95 \times 45 \rightarrow V_k = 32,06 \cong 32 \text{ m/s} \cong 115 \text{ km/h}$$

b) Coeficientes de pressão e forma da cobertura

$$\frac{h}{b} = \frac{6,0}{25,0} = 0,24 \rightarrow \text{faixa de } \frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$$

$$\theta = 15^\circ$$

$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 0^\circ$	
EF	GH	EG	FH
-1,0	-0,4	-0,8	-0,6

c) Pressão e sucção interna

Considerando 04 faces igualmente permeáveis

$$C_{pi} = -0,3 \text{ e } 0 \rightarrow \text{Pressão interna} = 0^* \text{ e Sucção interna} = 0,3$$

* Quando as quatro faces são impermeáveis, não há pressão interna.

Tesoura com vão de 15,0m – Inclinação de 5°

a) Pressão dinâmica do vento

$$V_o = 45 \text{ m/s}$$

$$V_k = S_1 \times S_2 \times S_3 \times V_o$$

$$S_1 = 1,0; \quad S_2 = 0,75 \quad S_3 = 0,95$$

$$V_k = 1,0 \times 0,75 \times 0,95 \times 45 \rightarrow V_k = 32,06 \cong 32 \text{ m/s} \cong 115 \text{ km/h}$$

b) Coeficientes de pressão e forma da cobertura

$$\frac{h}{b} = \frac{6,0}{15,0} = 0,4 \rightarrow \text{faixa de } \frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$$

$$\theta = 5^\circ$$

$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 0^\circ$	
EF	GH	EG	FH
-0,9	-0,4	-0,8	-0,4

c) Pressão e sucção interna

Considerando 04 faces igualmente permeáveis

$$C_{pi} = -0,3 \text{ e } 0 \rightarrow \text{Pressão interna} = 0^* \text{ e Sucção interna} = 0,3$$

* Quando as quatro faces são impermeáveis, não há pressão interna.

Tesoura com vão de 15,0m – Inclinação de 20°

a) Pressão dinâmica do vento

$$V_o = 45 \text{ m/s}$$

$$V_k = S_1 \times S_2 \times S_3 \times V_o$$

$$S_1 = 1,0; \quad S_2 = 0,75 \quad S_3 = 0,95$$

$$V_k = 1,0 \times 0,75 \times 0,95 \times 45 \rightarrow V_k = 32,06 \cong 32 \text{ m/s} \cong 115 \text{ km/h}$$

b) Coeficientes de pressão e forma da cobertura

$$\frac{h}{b} = \frac{6,0}{15,0} = 0,4 \rightarrow \text{faixa de } \frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$$

$$\theta = 20^\circ$$

$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 0^\circ$	
EF	GH	EG	FH
-0,4	-0,4	-0,7	-0,6

c) Pressão e sucção interna

Considerando 04 faces igualmente permeáveis

$$C_{pi} = -0,3 \text{ e } 0 \rightarrow \text{Pressão interna} = 0^* \text{ e Sucção interna} = 0,3$$

* Quando as quatro faces são impermeáveis, não há pressão interna.

Apêndice 02

Resultados dos dimensionamentos das topologias

Relação de materiais – Topologias para vão de 5,0m

Convenção: BS – Banzo Superior; BI – Banzo Inferior; TR – Treliçado

Topologia	Inclinação (°)	Descrição	Comp. (cm)	Pré-Dimensionamento				Dimensionamento Final				
				Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	
A1	10	BS	507,68	UCD 2,0x25x50x25	7,44	2,42	0,238	UCD 2,0x38x75x38	11,50	2,82	0,190	
		BI	500,00	UCD 2,0x25x50x25	7,34			UCD 2,0x38x75x38	11,35			
		TR	2013,60	LL 3/16" x 1"	33,87			LL 3/16" x 1"	33,87			
	Peso Tot. (kg)				48,65				56,72			
	15	BS	517,64	UCD 2,0x25x50x25	7,58	2,50	0,162	UCD 2,0x38x75x38	11,73	2,87	0,126	
		BI	500,00	UCD 2,0x25x50x25	7,35			UCD 2,0x38x75x38	11,35			
TR		2289,46	LL 1/8" x 1 1/4"	39,05	LL 1/8" x 1 1/4"			39,05				
Peso Tot. (kg)				53,98				62,13				
A2	10	BS	507,71	UCD 2,0x25x50x25	7,46	2,44	0,222	UCD 2,0x38x75x38	11,50	2,83	0,180	
		BI	500,00	UCD 2,0x25x50x25	7,32			UCD 2,0x38x75x38	11,35			
		TR	2117,96	LL 3/16" x 1"	35,63			LL 3/16" x 1"	35,63			
	Peso Tot. (kg)				50,41				58,48			
	15	BS	517,64	UCD 2,0x25x50x25	7,59	2,53	0,144	UCD 2,0x38x75x38	11,73	2,89	0,116	
		BI	500,00	UCD 2,0x25x50x25	7,35			UCD 2,0x38x75x38	11,35			
TR		2465,04	LL 1/8" x 1 1/4"	42,04	LL 1/8" x 1 1/4"			42,04				
Peso Tot. (kg)				56,98				65,12				
A3	10	BS	507,71	UCD 2,0x25x50x25	7,43	1,74	0,234	UCD 2,0x25x50x25	7,43	1,74	0,234	
		BI	500,00	UCD 2,0x25x50x25	7,35			UCD 2,0x25x50x25	7,35			
		TR	1924,15	LL 1/8" x 7/8"	19,42			LL 1/8" x 7/8"	19,42			
	Peso Tot. (kg)				34,20				34,20			
	15	BS	517,64	UCD 2,0x25x50x25	7,59	2,49	0,119	UCD 2,0x38x75x38	11,73	2,87	0,095	
		BI	500,00	UCD 2,0x25x50x25	7,35			UCD 2,0x38x75x38	11,35			
TR		2248,18	LL 1/8" x 1 1/4"	38,34	LL 1/8" x 1 1/4"			38,34				
Peso Tot. (kg)				53,28				61,42				
B1	10	BS	518,68	UCD 2,0x25x50x25	7,59	2,53	0,142	UCD 2,0x38x75x38	11,75	2,89	0,112	
		BI	500,00	UCD 2,0x25x50x25	7,35			UCD 2,0x38x75x38	11,35			
		TR	2469,35	LL 1/8" x 1 1/4"	42,12			LL 1/8" x 1 1/4"	42,12			
		Peso Tot. (kg)						57,06				65,22
B2	10	BS	518,68	UCD 2,0x25x50x25	7,59	2,56	0,116	UCD 2,0x38x75x38	11,75	2,91	0,095	
		BI	500,00	UCD 2,0x25x50x25	7,35			UCD 2,0x38x75x38	11,35			
		TR	2622,11	LL 1/8" x 1 1/4"	44,73			LL 1/8" x 1 1/4"	44,73			
		Peso Tot. (kg)						59,67				67,83
B3	10	BS	518,68	UCD 2,0x25x50x25	7,59	1,94	0,176	UCD 2,0x38x75x38	11,75	2,31	0,139	
		BI	500,00	UCD 2,0x25x50x25	7,35			UCD 2,0x38x75x38	11,35			
		TR	2424,13	LL 1/8" x 1"	28,32			LL 1/8" x 1"	28,32			
		Peso Tot. (kg)						43,26				51,42

Convenção: BS – Banzo Superior; BI – Banzo Inferior; TR – Treliçado

Topologia	Inclinação (°)	Descrição	Comp. (cm)	Pré-Dimensionamento				Dimensionamento Final				
				Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	
C1	10	BS	507,71	UCD 2,0x25x50x25	7,445	1,43	0,236	UCD 2,0x25x50x25	7,445	1,43	0,236	
		BI	507,71	UCD 2,0x25x50x25	7,445			UCD 2,0x25x50x25	7,445			
		TR	2048,23	LL 1/8" x 5/8"	14,23			LL 1/8" x 5/8"	14,23			
	Peso Tot. (kg)				29,12				29,12			
	15	BS	517,64	UCD 2,0x25x50x25	7,595	1,43	0,203	UCD 2,0x25x50x25	7,595	1,43	0,203	
		BI	517,64	UCD 2,0x25x50x25	7,595			UCD 2,0x25x50x25	7,595			
TR		2026,24	LL 1/8" x 5/8"	14,07	LL 1/8" x 5/8"			14,07				
Peso Tot. (kg)				29,26				29,26				
C2	10	BS	507,71	UCD 2,0x25x50x25	7,445	1,43	0,271	UCD 2,0x25x50x25	7,445	1,43	0,271	
		BI	507,71	UCD 2,0x25x50x25	7,445			UCD 2,0x25x50x25	7,445			
		TR	2269,34	LL 1/8" x 5/8"	15,76			LL 1/8" x 5/8"	15,76			
	Peso Tot. (kg)				30,65				30,65			
	15	BS	517,64	UCD 2,0x25x50x25	7,595	1,43	0,277	UCD 2,0x25x50x25	7,595	1,43	0,277	
		BI	517,64	UCD 2,0x25x50x25	7,595			UCD 2,0x25x50x25	7,595			
TR		2363,76	LL 1/8" x 5/8"	16,41	LL 1/8" x 5/8"			16,41				
Peso Tot. (kg)				31,60				31,60				
C3	10	BS	507,71	UCD 2,0x25x50x25	7,45	1,27	0,262	UCD 2,0x25x50x25	7,45	1,27	0,262	
		BI	507,23	UCD 2,0x25x50x25	7,43			UCD 2,0x25x50x25	7,43			
		TR	2011,57	LL 1/8" x 1/2"	10,79			LL 1/8" x 1/2"	10,79			
	Peso Tot. (kg)				25,67				25,67			
	15	BS	517,64	UCD 2,0x25x50x25	7,59	1,27	0,243	UCD 2,0x25x50x25	7,59	1,27	0,243	
		BI	516,54	UCD 2,0x25x50x25	7,58			UCD 2,0x25x50x25	7,58			
TR		2043,44	LL 1/8" x 1/2"	10,96	LL 1/8" x 1/2"			10,96				
Peso Tot. (kg)				26,13				26,13				
D1	10	BS	507,71	UCD 2,0x25x50x25	7,46	1,42	0,247	UCD 2,0x25x50x25	7,46	1,42	0,247	
		BI	503,86	UCD 2,0x25x50x25	7,38			UCD 2,0x25x50x25	7,38			
		TR	2369,87	LL 1/8" x 5/8"	16,46			LL 1/8" x 5/8"	16,46			
	Peso Tot. (kg)				31,30				31,30			
	15	BS	517,64	UCD 2,0x25x50x25	7,59	1,60	0,176	UCD 2,0x25x50x25	7,59	1,60	0,176	
		BI	508,82	UCD 2,0x25x50x25	7,47			UCD 2,0x25x50x25	7,47			
TR		2519,52	LL 1/8" x 3/4"	21,47	LL 1/8" x 3/4"			21,47				
Peso Tot. (kg)				36,53				36,53				
D2	10	BS	507,71	UCD 2,0x25x50x25	7,46	1,42	0,266	UCD 2,0x25x50x25	7,46	1,42	0,266	
		BI	503,86	UCD 2,0x25x50x25	7,38			UCD 2,0x25x50x25	7,38			
		TR	2546,56	LL 1/8" x 5/8"	17,68			LL 1/8" x 5/8"	17,68			
	Peso Tot. (kg)				32,52				32,52			
	15	BS	517,64	UCD 2,0x25x50x25	7,59	1,60	0,198	UCD 2,0x25x50x25	7,59	1,60	0,198	
		BI	508,82	UCD 2,0x25x50x25	7,47			UCD 2,0x25x50x25	7,47			
TR		2794,36	LL 1/8" x 3/4"	23,81	LL 1/8" x 3/4"			23,81				
Peso Tot. (kg)				38,87				38,87				
D3	10	BS	507,71	UCD 2,0x25x50x25	7,46	1,43	0,205	UCD 2,0x25x50x25	7,46	1,43	0,205	
		BI	504,34	UCD 2,0x25x50x25	7,38			UCD 2,0x25x50x25	7,38			
		TR	2247,48	LL 1/8" x 5/8"	15,61			LL 1/8" x 5/8"	15,61			
	Peso Tot. (kg)				30,45				30,45			
	15	BS	517,64	UCD 2,0x25x50x25	7,59	1,42	0,201	UCD 2,0x25x50x25	7,59	1,42	0,201	
		BI	509,92	UCD 2,0x25x50x25	7,48			UCD 2,0x25x50x25	7,48			
TR		2407,75	LL 1/8" x 5/8"	16,72	LL 1/8" x 5/8"			16,72				
Peso Tot. (kg)				31,79				31,79				

Relação de materiais – Topologias para vão de 10,0m

Convenção: BS – Banzo Superior; BI – Banzo Inferior; TR – Treliçado

Topologia	Inclinação (°)	Descrição	Comp. (cm)	Pré-Dimensionamento				Dimensionamento Final			
				Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência
A1	10	BS	1015,37	UCD 2,0x25x50x25	14,89	2,94	0,266	UCD 2,0x38x75x38	23,04	3,10	0,242
		BI	1000,00	UCD 3,0x38x75x38	22,67			UCD 2,0x38x75x38	22,70		
		TR	6606,41	LL 1/8" x 1 1/2"	118,94			LL 1/8" x 1 1/2"	118,94		
	Peso Tot. (kg)				156,50	Peso Tot. (kg)				262,73	
A1	15	BS	1035,28	UCD 2,0x25x50x25	15,19	3,82	0,18	UCD 2,0x50x127x50	35,82	4,39	0,149
		BI	1000,00	UCD 3,0x25x50x25	21,23			UCD 2,0x50x127x50	34,60		
		TR	7906,10	LL 1/8" x 2"	192,31			LL 1/8" x 2"	192,31		
	Peso Tot. (kg)				228,73	Peso Tot. (kg)				262,73	
A2	10	BS	1015,43	UCD 3,0x25x50x25	21,55	3,33	0,209	UCD 2,0x40x100x40	27,61	3,68	0,174
		BI	1000,00	UCD 2,0x25x50x25	14,67			UCD 2,0x40x100x40	27,20		
		TR	6898,99	LL 1/8" x 1 3/4"	146,01			LL 1/8" x 1 3/4"	146,01		
	Peso Tot. (kg)				182,23	Peso Tot. (kg)				200,82	
A2	15	BS	1035,28	UCD 2,25x25x50x25	16,93	3,78	0,182	UCD 2,0x50x127x50	35,82	4,41	0,150
		BI	1000,00	UCD 2,0x25x50x25	14,67			UCD 2,0x50x127x50	34,60		
		TR	8363,15	LL 1/8" x 2"	203,43			LL 1/8" x 2"	203,43		
	Peso Tot. (kg)				235,03	Peso Tot. (kg)				273,85	
A3	10	BS	1015,43	UCD 2,0x25x50x25	14,89	2,87	0,245	UCD 2,0x40x100x40	27,61	3,27	0,200
		BI	1000,00	UCD 2,65x25x50x25	18,99			UCD 2,0x40x100x40	27,20		
		TR	6568,83	LL 1/8" x 1 1/2"	118,26			LL 1/8" x 1 1/2"	118,26		
	Peso Tot. (kg)				152,14	Peso Tot. (kg)				173,07	
A3	15	BS	1035,28	UCD 2,0x25x50x25	15,19	3,75	0,172	UCD 2,0x50x127x50	35,82	4,39	0,141
		BI	1000,00	UCD 2,25x25x50x25	16,36			UCD 2,0x50x127x50	34,60		
		TR	7983,00	LL 1/8" x 2"	194,18			LL 1/8" x 2"	194,18		
	Peso Tot. (kg)				225,73	Peso Tot. (kg)				264,60	
B1	10/15	BS	1034,76	UCD 2,0x25x50x25	15,18	3,80	0,167	UCD 2,0x50x127x50	35,80	4,41	0,137
		BI	1000,00	UCD 2,25x50x25x50	16,36			UCD 2,0x50x127x50	34,60		
		TR	8545,15	LL 1/8" x 2"	207,86			LL 1/8" x 2"	207,86		
	Peso Tot. (kg)				239,40	Peso Tot. (kg)				278,26	
B2	10/15	BS	1034,76	UCD 2,0x25x50x25	15,21	3,80	0,157	UCD 2,0x50x127x50	35,80	4,43	0,130
		BI	1000,00	UCD 2,0x25x50x25	14,70			UCD 2,0x50x127x50	34,60		
		TR	8930,76	LL 1/8" x 2"	217,24			LL 1/8" x 2"	217,24		
	Peso Tot. (kg)				247,15	Peso Tot. (kg)				287,64	
B3	10/15	BS	1034,76	UCD 2,0x25x50x25	15,21	3,34	0,196	UCD 2,0x40x100x40	28,14	3,75	0,165
		BI	1000,00	UCD 2,0x25x50x25	14,70			UCD 2,0x40x100x40	27,20		
		TR	8604,94	LL 1/8" x 1 3/4"	182,12			LL 1/8" x 1 3/4"	182,12		
	Peso Tot. (kg)				212,03	Peso Tot. (kg)				237,46	

Convenção: BS – Banzo Superior; BI – Banzo Inferior; TR – Treliçado

Topologia	Inclinação (°)	Descrição	Comp. (cm)	Pré-Dimensionamento				Dimensionamento Final				
				Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	
C1	10	BS	1015,43	UCD 2,25x25x50x25	16,61	2,73	0,321	UCD 2,25x38x75x38	25,76	2,95	0,279	
		BI	1015,43	UCD 2,25x38x75x38	25,76			UCD 2,25x38x75x38	25,76			
		TR	4096,47	LL 3/16" x 1"	68,91			LL 3/16" x 1"	68,91			
	Peso Tot. (kg)				111,28				120,43			
	15	BS	1035,28	UCD 2,0x25x50x25	15,19	2,10	0,358	UCD 2,0x38x75x38	23,47	2,30	0,308	
		BI	1035,28	UCD 2,0x38x75x38	23,47			UCD 2,0x38x75x38	23,47			
TR		4052,48	LL 1/8" x 1"	47,35	LL 1/8" x 1"			47,35				
Peso Tot. (kg)				86,01				94,29				
C2	10	BS	1015,43	UCD 2,65x25x50x25	19,28	2,75	0,279	UCD 2,0x38x75x38	23,05	2,87	0,242	
		BI	1015,43	UCD 3,0x25x50x25	21,55			UCD 2,0x38x75x38	23,05			
		TR	4538,67	LL 1/8" x 1 1/4"	77,42			LL 1/8" x 1 1/4"	77,42			
	Peso Tot. (kg)				118,25				123,52			
	15	BS	1035,28	UCD 2,25x25x50x25	16,93	2,64	0,294	UCD 2,0x38x75x38	23,47	2,88	0,246	
		BI	1035,28	UCD 2,65x25x50x25	19,66			UCD 2,0x38x75x38	23,47			
TR		4727,52	LL 1/8" x 1 1/4"	80,64	LL 1/8" x 1 1/4"			80,64				
Peso Tot. (kg)				117,23				127,58				
C3	10	BS	1015,43	UCD 2,0x25x50x25	14,89	1,91	0,434	UCD 3,0x25x50x25	21,52	2,07	0,402	
		BI	1014,46	UCD 3,0x25x50x25	21,53			UCD 3,0x25x50x25	21,53			
		TR	4023,13	LL 1/8" x 7/8"	40,60			LL 1/8" x 7/8"	40,60			
	Peso Tot. (kg)				77,02				83,65			
	15	BS	1035,28	UCD 2,0x25x50x25	15,19	1,85	0,423	UCD 2,65x25x50x25	19,67	1,96	0,401	
		BI	1033,07	UCD 2,65x25x50x25	19,62			UCD 2,65x25x50x25	19,62			
TR		4086,87	LL 1/8" x 7/8"	41,24	LL 1/8" x 7/8"			41,21				
Peso Tot. (kg)				76,05				80,50				
D1	10	BS	1015,43	UCD 2,25x25x50x25	16,61	2,74	0,260	UCD 2,0x38x75x38	23,05	2,88	0,231	
		BI	1007,71	UCD 2,0x38x75x38	22,85			UCD 2,0x38x75x38	22,85			
		TR	4739,75	LL 1/8" x 1 1/4"	80,85			LL 1/8" x 1 1/4"	80,85			
	Peso Tot. (kg)				120,31				126,75			
	15	BS	1035,28	UCD 2,0x25x50x25	15,19	2,72	0,241	UCD 2,0x38x75x38	23,50	2,90	0,211	
		BI	1017,64	UCD 2,0x38x75x38	23,07			UCD 2,0x38x75x38	23,07			
TR		5039,04	LL 1/8" x 1 1/4"	85,96	LL 1/8" x 1 1/4"			85,96				
Peso Tot. (kg)				124,22				132,53				
D2	10	BS	1015,43	UCD 2,65x25x50x25	19,29	2,74	0,268	UCD 2,0x38x75x38	23,05	2,91	0,230	
		BI	1007,71	UCD 2,65x25x50x25	19,14			UCD 2,0x38x75x38	22,87			
		TR	5093,13	LL 1/8" x 1 1/4"	86,88			LL 1/8" x 1 1/4"	86,88			
	Peso Tot. (kg)				125,31				132,80			
	15	BS	1035,28	UCD 2,0x25x50x25	15,19	2,68	0,277	UCD 2,0x38x75x38	23,50	2,93	0,232	
		BI	1017,64	UCD 2,65x25x50x25	19,33			UCD 2,0x38x75x38	23,10			
TR		5588,73	LL 1/8" x 1 1/4"	95,33	LL 1/8" x 1 1/4"			95,33				
Peso Tot. (kg)				129,85				141,93				
D3	10	BS	1015,43	UCD 2,25x25x50x25	16,61	2,12	0,366	UCD 2,0x38x75x38	23,05	2,30	0,307	
		BI	1008,68	UCD 3,0x25x50x25	21,41			UCD 2,0x38x75x38	22,89			
		TR	4494,96	LL 1/8" x 1"	52,52			LL 1/8" x 1"	52,52			
	Peso Tot. (kg)				90,54				98,46			
	15	BS	1035,28	UCD 2,0x25x50x25	15,19	2,61	0,234	UCD 2,0x38x75x38	23,50	2,88	0,191	
		BI	1019,84	UCD 2,65x25x50x25	19,37			UCD 2,0x38x75x38	23,15			
TR		4815,50	LL 1/8" x 1 1/4"	82,14	LL 1/8" x 1 1/4"			82,14				
Peso Tot. (kg)				116,70				128,79				

Relação de materiais – Topologias para vão de 15,0m

Convenção: BS – Banzo Superior; BI – Banzo Inferior; TR – Treliçado

Topologia	Inclinação (°)	Descrição	Comp. (cm)	Pré-Dimensionamento				Dimensionamento Final				
				Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	
A1	10	BS	1523,05	UCD 3,0x25x50x25	32,33	7,10	0,135	UCD 2,0x50x150x50	58,18	7,49	0,130	
		BI	1500,00	UCD 2,65x38x75x38	44,40			UCD 2,0x50x150x50	57,30			
		TR	14121,45	LL 3/16" x 2 1/2"	639,62			LL 3/16" x 2 1/2"	639,62			
	Peso Tot. (kg)				716,35				755,10			
	15	BS	1552,91	UCD 2,65x25x50x25	29,49	8,67	0,099					
		BI	1500,00	UCD 2,25x38x75x38	38,05							
TR		17202,41	LL 3/16" x 3"	942,44								
Peso Tot. (kg)				1009,98								
A2	10	BS	1523,14	UCD 2,65x38x75x38	45,08	7,17	0,126	UCD 2,0x50x150x50	58,18	7,53	0,128	
		BI	1500,00	UCD 2,00x38x75x38	34,01			UCD 2,0x50x150x50	57,30			
		TR	14611,42	LL 3/16" x 2 1/2"	661,82			LL 3/16" x 2 1/2"	661,82			
	Peso Tot. (kg)				740,91				777,30			
	15	BS	1552,91	UCD 2,0x38x75x38	35,21	8,70	0,098					
		BI	1500,00	UCD 2,65x25x50x25	28,49							
TR		17943,71	LL 3/16" x 3"	983,05								
Peso Tot. (kg)				1046,75								
A3	10	BS	1523,14	UCD 2,0x38x75x38	34,54	7,07	0,125	UCD 2,0x50x150x50	58,18	7,50	0,125	
		BI	1500,00	UCD 2,25x38x75x38	38,05			UCD 2,0x50x150x50	57,30			
		TR	14202,15	LL 3/16" x 2 1/2"	643,28			LL 3/16" x 2 1/2"	643,28			
	Peso Tot. (kg)				715,87				758,76			
	15	BS	1552,91	UCD 2,65x25x50x25	29,49	8,66	0,099					
		BI	1500,00	UCD 2,0x38x75x38	34,01							
TR		17446,35	LL 3/16" x 3"	955,81								
Peso Tot. (kg)				1019,31								
B1	10/15	BS	1553,77	UCD 2,65x25x50x25	29,51	8,78	0,104					
		BI	1500,00	UCD 2,0x38x75x38	34,01							
		TR	18847,62	LL 3/16" x 3"	1032,58							
		Peso Tot. (kg)						1096,10				
B2	10/15	BS	1553,77	UCD 2,0x38x75x38	35,23	8,79	0,099					
		BI	1500,00	UCD 2,0x25x50x25	22,00							
		TR	19487,88	LL 3/16" x 3"	1067,65							
		Peso Tot. (kg)						1124,88				
B3	10/15	BS	1553,77	UCD 2,65x25x50x25	29,51	8,79	0,106					
		BI	1500,00	UCD 3,0x25x50x25	31,84							
		TR	19067,68	LL 3/16" x 3"	1044,63							
		Peso Tot. (kg)						1105,98				

Convenção: BS – Banzo Superior; BI – Banzo Inferior; TR – Treliçado

Topologia	Inclinação (°)	Descrição	Comp. (cm)	Pré-Dimensionamento				Dimensionamento Final				
				Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	
C1	10	BS	1523,14	UCD 2,0x38x75x38	34,54	3,15	0,323	UCD 3,0x38x75x38	50,56	3,37	0,295	
		BI	1523,14	UCD 3,0x38x75x38	50,63			UCD 3,0x38x75x38	50,56			
		TR	8140,90	LL 1/8" x 1 1/4"	138,87			LL 1/8" x 1 1/4"	138,87			
	Peso Tot. (kg)				224,04				239,99			
	15	BS	1552,91	UCD 3,0x25x50x25	32,96	3,03	0,291	UCD 2,65x38x75x38	45,96	3,22	0,254	
		BI	1552,91	UCD 2,65x38x75x38	45,97			UCD 2,65x38x75x38	45,96			
TR		8070,94	LL 1/8" x 1 1/4"	137,68	LL 1/8" x 1 1/4"			137,68				
Peso Tot. (kg)				216,61				229,60				
C2	10	BS	1523,14	UCD 2,25x38x75x38	38,63	3,10	0,369	UCD 2,65x38x75x38	45,08	3,23	0,350	
		BI	1523,14	UCD 2,0x40x100x40	41,47			UCD 2,65x38x75x38	45,08			
		TR	8956,65	LL 1/8" x 1 1/4"	152,78			LL 1/8" x 1 1/4"	152,78			
	Peso Tot. (kg)				232,88				242,94			
	15	BS	1552,91	UCD 2,0x38x75x38	35,25	2,95	0,369	UCD 2,0x38x75x38	35,25	2,95	0,369	
		BI	1552,91	UCD 2,0x38x75x38	35,25			UCD 2,0x38x75x38	35,25			
TR		9316,30	LL 1/8" x 1 1/4"	158,92	LL 1/8" x 1 1/4"			158,92				
Peso Tot. (kg)				229,42				229,42				
C3	10	BS	1523,14	UCD 2,0x38x75x38	34,54	3,09	0,310	UCD 2,25x40x100x40	46,45	3,26	0,288	
		BI	1522,18	UCD 2,25x40x100x40	46,41			UCD 2,25x40x100x40	46,41			
		TR	8209,83	LL 1/8" x 1 1/4"	140,05			LL 1/8" x 1 1/4"	140,05			
	Peso Tot. (kg)				221,00				232,91			
	15	BS	1552,91	UCD 2,65x25x50x25	29,49	2,90	0,306	UCD 2,25x38x75x38	39,44	3,04	0,272	
		BI	1550,71	UCD 2,25x38x75x38	39,33			UCD 2,25x38x75x38	39,33			
TR		8351,28	LL 1/8" x 1 1/4"	142,46	LL 1/8" x 1 1/4"			142,46				
Peso Tot. (kg)				211,28				221,23				
D1	10	BS	1523,14	UCD 2,0x38x75x38	34,54	3,29	0,320	UCD 2,25x50x100x50	51,78	3,52	0,297	
		BI	1511,57	UCD 3,0x38x75x38	50,24			UCD 2,25x50x100x50	51,39			
		TR	9683,51	LL 1/8" x 1 1/2"	174,34			LL 1/8" x 1 1/2"	174,34			
	Peso Tot. (kg)				259,12				277,51			
	15	BS	1552,91	UCD 3,0x25x50x25	32,96	4,00	0,211	UCD 2,0x50x127x50	53,73	4,34	0,190	
		BI	1526,09	UCD 2,65x38x75x38	45,17			UCD 2,0x50x127x50	52,80			
TR		10432,81	LL 1/8" x 2"	253,77	LL 1/8" x 2"			253,77				
Peso Tot. (kg)				331,90				360,30				
D2	10	BS	1523,14	UCD 2,25x38x75x38	38,63	3,64	0,269	UCD 2,0x40x100x40	41,42	3,67	0,267	
		BI	1511,57	UCD 2,0x40x100x40	41,16			UCD 2,0x40x100x40	41,11			
		TR	10318,91	LL 1/8" x 1 3/4"	218,39			LL 1/8" x 1 3/4"	218,39			
	Peso Tot. (kg)				298,18				300,92			
	15	BS	1552,91	UCD 2,0x38x75x38	35,25	3,95	0,217	UCD 2,0x50x127x50	53,73	4,37	0,201	
		BI	1526,09	UCD 2,0x38x75x38	34,64			UCD 2,0x50x127x50	52,80			
TR		11409,41	LL 1/8" x 2"	277,53	LL 1/8" x 2"			277,53				
Peso Tot. (kg)				347,42				384,06				
D3	10	BS	1523,14	UCD 2,0x38x75x38	34,54	3,23	0,303	UCD 2,25x40x100x40	46,45	3,38	0,284	
		BI	1512,53	UCD 2,25x40x100x40	46,11			UCD 2,25x40x100x40	46,13			
		TR	9463,82	LL 1/8" x 1 1/2"	170,39			LL 1/8" x 1 1/2"	170,39			
	Peso Tot. (kg)				251,04				262,97			
	15	BS	1552,91	UCD 3,0x25x50x25	32,96	3,52	0,251	UCD 2,0x40x100x40	42,23	3,67	0,226	
		BI	1528,29	UCD 2,25x38x75x38	38,76			UCD 2,0x40x100x40	41,56			
TR		10267,00	LL 1/8" x 1 3/4"	217,29	LL 1/8" x 1 3/4"			217,29				
Peso Tot. (kg)				289,01				301,08				

Relação de materiais – Topologias para vão de 20,0m

Convenção: BS – Banzo Superior; BI – Banzo Inferior; TR – Treliçado

Topologia	Inclinação (°)	Descrição	Comp. (cm)	Pré-Dimensionamento				Dimensionamento Final			
				Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência
A1	10	BS	2030,85	UCD 2,0x50x100x50	61,67	8,33	0,214				
		BI	2000,00	UCD 2,65x50x150x50	100,39						
		TR	13225,15	LL 3/16" x 3"	724,55						
		Peso Tot. (kg)		886,61							
	15	BS	2070,55	UCD 2,0x50x100x50	62,88	14,14	0,095				
		BI	2000,00	UCD 3,0x50x100x50	89,55						
		TR	15812,20	LL 1/4" x 4"	1540,83						
Peso Tot. (kg)			1693,26								
A2	10	BS	2030,85	UCD 3,0x50x100x50	90,94	12,09	0,124				
		BI	2000,00	UCD 2,0x50x100x50	60,74						
		TR	13797,97	LL 1/4" x 3 1/2"	1169,85						
		Peso Tot. (kg)		1321,53							
	15	BS	2070,55	UCD 2,25x50x100x50	50,73	14,08	0,098				
		BI	2000,00	UCD 2,25x38x75x38	70,44						
		TR	16726,30	LL 1/4" x 4"	1629,90						
Peso Tot. (kg)			1751,07								
A3	10	BS	2030,85	UCD 2,0x50x127x50	70,28	8,20	0,191				
		BI	2000,00	UCD 2,65x50x100x50	79,59						
		TR	13137,66	LL 3/16" x 3"	719,75						
		Peso Tot. (kg)		869,62							
	15	BS	2070,55	UCD 2,0x50x100x50	62,88	14,02	0,093				
		BI	2000,00	UCD 2,65x40x100x40	71,26						
		TR	15966,00	LL 1/4" x 4"	1555,82						
Peso Tot. (kg)			1689,96								
B1	10/15	BS	2072,34	UCD 2,0x50x100x50	62,93	14,35	0,099				
		BI	2000,00	UCD 2,25x50x127x50	77,57						
		TR	17275,73	LL 1/4" x 4"	1683,44						
		Peso Tot. (kg)		1823,94							
B2	10/15	BS	2072,34	UCD 2,0x50x100x50	62,93	14,26	0,098				
		BI	2000,00	UCD 2,0x38x75x38	45,35						
		TR	18065,67	LL 1/4" x 4"	1760,42						
		Peso Tot. (kg)		1868,70							
B3	10/15	BS	2072,34	UCD 2,0x50x100x50	62,93	12,51	0,123				
		BI	2000,00	UCD 2,65x38x75x38	59,20						
		TR	17408,60	LL 1/4" x 3 1/2"	1475,98						
		Peso Tot. (kg)		1598,11							

Convenção: BS – Banzo Superior; BI – Banzo Inferior; TR – Treliçado

Topologia	Inclinação (°)	Descrição	Comp. (cm)	Pré-Dimensionamento				Dimensionamento Final				
				Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	
C1	10	BS	2030,85	UCD 2,25x50x100x50	69,09	6,15	0,315	UCD 4,75x50x127x50	160,03	7,52	0,253	
		BI	2030,85	UCD 4,75x50x100x50	139,63			UCD 4,75x50x127x50	160,03			
		TR	8192,94	LL 3/16" x 2"	293,34			LL 3/16" x 2"	293,34			
	Peso Tot. (kg)				502,06				613,40			
	15	BS	2070,55	UCD 2,0x50x100x50	62,88	4,44	0,352	UCD 2,65x50x150x50	103,94	4,94	0,308	
		BI	2070,55	UCD 2,65x50x150x50	103,93			UCD 2,65x50x150x50	103,94			
TR		8104,97	LL 1/8" x 2"	197,15	LL 1/8" x 2"			197,15				
Peso Tot. (kg)				363,96				405,03				
C2	10	BS	2030,85	UCD 3,0x50x100x50	90,98	5,89	0,364	UCD 2,65x50x127x50	92,20	5,92	0,363	
		BI	2030,85	UCD 3,0x50x100x50	90,98			UCD 2,65x50x127x50	92,20			
		TR	9077,34	LL 3/16" x 2"	325,00			LL 3/16" x 2"	325,00			
	Peso Tot. (kg)				506,96				509,40			
	15	BS	2070,55	UCD 2,25x50x100x50	79,13	5,50	0,385	UCD 2,0x50x150x50	79,09	5,60	0,383	
		BI	2070,55	UCD 2,0x50x150x50	70,44			UCD 2,0x50x150x50	79,09			
TR		9455,04	LL 3/16" x 2"	338,52	LL 3/16" x 2"			338,52				
Peso Tot. (kg)				488,09				496,70				
C3	10	BS	2030,85	UCD 2,25x50x100x50	69,09	4,09	0,431	UCD 3,0x50x100x50	90,98	4,36	0,392	
		BI	2028,92	UCD 3,0x50x100x50	90,85			UCD 3,0x50x100x50	90,89			
		TR	8046,26	LL 1/8" x 1 3/4"	170,29			LL 1/8" x 1 3/4"	170,29			
	Peso Tot. (kg)				330,23				352,16			
	15	BS	2070,55	UCD 2,0x50x100x50	62,88	3,84	0,399	UCD 2,25x50x127x50	80,33	4,05	0,368	
		BI	2066,14	UCD 2,25x50x127x50	80,14			UCD 2,25x50x127x50	80,16			
TR		8173,75	LL 1/8" x 1 3/4"	172,99	LL 1/8" x 1 3/4"			172,99				
Peso Tot. (kg)				316,01				333,48				
D1	10	BS	2030,85	UCD 2,0x50x127x50	70,28	7,26	0,240	UCD 4,75x50x150x50	177,49	8,91	0,195	
		BI	2015,43	UCD 4,75x50x100x50	138,56			UCD 4,75x50x150x50	176,14			
		TR	9479,49	LL 3/16" x 2 1/2"	429,37			LL 3/16" x 2 1/2"	429,37			
	Peso Tot. (kg)				638,21				783,00			
	15	BS	2070,55	UCD 2,25x50x100x50	70,44	6,88	0,214	UCD 2,65x50x150x50	103,94	7,25	0,200	
		BI	2035,28	UCD 2,65x50x150x50	102,16			UCD 2,65x50x150x50	102,17			
TR		10078,09	LL 3/16" x 2 1/2"	456,48	LL 3/16" x 2 1/2"			456,48				
Peso Tot. (kg)				629,08				662,59				
D2	10	BS	2030,85	UCD 3,0x50x100x50	90,98	7,03	0,245	UCD 2,65x50x150x50	101,94	7,27	0,242	
		BI	2015,43	UCD 3,0x50x100x50	90,29			UCD 2,65x50x150x50	101,17			
		TR	10186,25	LL 3/16" x 2 1/2"	461,38			LL 3/16" x 2 1/2"	461,38			
	Peso Tot. (kg)				642,65				664,49			
	15	BS	2070,55	UCD 2,25x50x100x50	70,44	7,85	0,184					
		BI	2035,28	UCD 2,0x50x150x50	77,78							
TR		11177,46	LL 3/16" x 3"	612,36								
Peso Tot. (kg)				760,58								
D3	10	BS	2030,85	UCD 2,0x50x127x50	70,28	4,44	0,379	UCD 2,65x50x127x50	92,20	4,71	0,348	
		BI	2017,35	UCD 3,0x50x100x50	90,33			UCD 2,65x50x127x50	91,58			
		TR	8989,91	LL 1/8" x 2"	218,68			LL 1/8" x 2"	218,68			
	Peso Tot. (kg)				379,29				402,46			
	15	BS	2070,55	UCD 2,0x50x100x50	62,88	6,48	0,206	UCD 2,25x50x150x50	88,61	6,86	0,195	
		BI	2039,69	UCD 2,25x50x127x50	79,11			UCD 2,25x50x150x50	87,29			
TR		9631,00	LL 3/16" x 2 1/2"	436,23	LL 3/16" x 2 1/2"			436,23				
Peso Tot. (kg)				578,22				612,13				

Relação de materiais – Topologias para vão de 25,0m

Convenção: BS – Banzo Superior; BI – Banzo Inferior; TR – Treliçado

Topologia	Inclinação (°)	Descrição	Comp. (cm)	Pré-Dimensionamento				Dimensionamento Final				
				Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	
A1	10	BS	2538,57	UCD 2,0x50x127x50	87,85	13,00	0,162					
		BI	2500,00	UCD 4,75x50x100x50	171,88							
		TR	20005,29	LL 1/4" x 3 1/2"	1696,13							
	Peso Tot. (kg)				1955,86							
	15	BS	2588,19	UCD 2,25x50x100x50	88,05	18,54	0,09					
		BI	2500,00	UCD 3,0x50x127x50	127,84							
TR		24179,03	LL 1/4" x 5"	2968,41								
Peso Tot. (kg)				3184,30								
A2	10	BS	2538,57	UCD 4,75x50x100x50	174,53	14,90	0,124					
		BI	2500,00	UCD 2,65x50x100x50	99,48							
		TR	20767,51	LL 1/4" x 4"	2023,70							
	Peso Tot. (kg)				2297,71							
	15	BS	2588,19	UCD 2,25x50x150x50	110,90	18,63	0,09					
		BI	2500,00	UCD 2,25x50x100x50	85,05							
TR		25378,41	LL 1/4" x 5"	3115,66								
Peso Tot. (kg)				3311,61								
A3	10	BS	2538,57	UCD 3,0x50x100x50	113,67	14,55	0,121					
		BI	2500,00	UCD 2,65x50x150x50	125,48							
		TR	20020,19	LL 1/4" x 4"	1950,88							
	Peso Tot. (kg)				2190,03							
	15	BS	2588,19	UCD 2,25x50x100x50	88,05	18,43	0,09					
		BI	2500,00	UCD 3,0x40x100x40	100,17							
TR		24494,68	LL 1/4" x 5"	3007,16								
Peso Tot. (kg)				3195,38								
B1	10/15	BS	2588,24	UCD 2,25x50x100x50	88,05	18,80	0,093					
		BI	2500,00	UCD 3,0x50x100x50	111,94							
		TR	26323,67	LL 1/4" x 5"	3231,71							
		Peso Tot. (kg)						3431,70				
B2	10/15	BS	2588,24	UCD 2,25x50x127x50	100,39	18,82	0,089					
		BI	2500,00	UCD 2,65x38x75x38	74,00							
		TR	27350,23	LL 1/4" x 5"	3357,73							
		Peso Tot. (kg)						3532,12				
B3	10/15	BS	2588,24	UCD 2,25x50x100x50	88,05	18,78	0,094					
		BI	2500,00	UCD 2,65x50x100x50	99,48							
		TR	26599,09	LL 1/4" x 5"	3265,52							
		Peso Tot. (kg)						3453,05				

Convenção: BS – Banzo Superior; BI – Banzo Inferior; TR – Treliçado

Topologia	Inclinação (°)	Descrição	Comp. (cm)	Pré-Dimensionamento				Dimensionamento Final				
				Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	
C1	10	BS	2538,57	UCD 2,25x50x150x50	108,78	7,69	0,277	UCD 4,75x50x150x50	221,87	8,91	0,236	
		BI	2538,57	UCD 4,75x50x127x50	200,09			UCD 4,75x50x150x50	221,87			
		TR	11858,03	LL 3/16" x 2 1/2"	537,10			LL 3/16" x 2 1/2"	537,10			
	Peso Tot. (kg)				845,97				980,84			
	15	BS	2588,19	UCD 2,0x50x150x50	98,91	6,31	0,314	UCD 4,75x50x127x50	203,94	7,50	0,257	
		BI	2588,19	UCD 4,75x50x100x50	177,94			UCD 4,75x50x127x50	203,94			
TR		11737,56	LL 3/16" x 2"	420,25	LL 3/16" x 2"			420,25				
Peso Tot. (kg)				697,10				828,13				
C2	10	BS	2538,57	UCD 3,0x50x150x50	143,68	7,57	0,303	UCD 3,0x50x150x50	143,68	7,57	0,303	
		BI	2538,57	UCD 3,0x50x150x50	143,68			UCD 3,0x50x150x50	143,68			
		TR	13109,61	LL 3/16" x 2 1/2"	593,79			LL 3/16" x 2 1/2"	593,79			
	Peso Tot. (kg)				881,15				881,15			
	15	BS	2588,19	UCD 3,0x50x100x50	115,95	7,08	0,295	UCD 2,65x50x150x50	129,92	7,32	0,291	
		BI	2588,19	UCD 3,0x50x100x50	115,95			UCD 2,65x50x150x50	129,92			
TR		13648,60	LL 3/16" x 2 1/2"	618,21	LL 3/16" x 2 1/2"			618,21				
Peso Tot. (kg)				850,11				878,05				
C3	10	BS	2538,57	UCD 3,0x50x100x50	113,67	4,96	0,436	UCD 3,0x50x150x50	143,68	5,23	0,417	
		BI	2536,64	UCD 3,0x50x150x50	143,45			UCD 3,0x50x150x50	143,57			
		TR	11832,97	LL 1/8" x 2"	287,83			LL 1/8" x 2"	287,83			
	Peso Tot. (kg)				544,95				575,08			
	15	BS	2588,19	UCD 2,0x50x127x50	89,57	4,45	0,420	UCD 2,65x50x127x50	117,50	4,72	0,389	
		BI	2583,78	UCD 3,0x50x100x50	115,69			UCD 2,65x50x127x50	117,30			
TR		12029,50	LL 1/8" x 2"	292,61	LL 1/8" x 2"			292,61				
Peso Tot. (kg)				497,87				527,41				
D1	10	BS	2538,57	UCD 2,25x50x150x50	108,78	8,91	0,226					
		BI	2519,28	UCD 4,75x50x127x50	198,57							
		TR	13949,34	LL 3/16" x 3"	764,22							
	Peso Tot. (kg)				1071,57							
	15	BS	2588,19	UCD 2,25x50x127x50	100,39	8,68	0,193					
		BI	2544,10	UCD 4,75x50x100x50	174,91							
TR		14946,17	LL 3/16" x 3"	818,83								
Peso Tot. (kg)				1094,13								
D2	10	BS	2538,57	UCD 3,0x50x150x50	143,68	8,82	0,226					
		BI	2519,28	UCD 3,0x50x150x50	142,59							
		TR	14934,80	LL 3/16" x 3"	818,21							
	Peso Tot. (kg)				1104,48							
	15	BS	2588,19	UCD 2,25x50x127x50	100,39	12,05	0,135					
		BI	2544,10	UCD 3,0x50x100x50	113,92							
TR		16470,48	LL 1/4" x 3 1/2"	1396,44								
Peso Tot. (kg)				1610,75								
D3	10	BS	2538,57	UCD 3,0x50x100x50	113,67	7,35	0,264	UCD 3,0x50x150x50	143,68	7,60	0,257	
		BI	2521,21	UCD 3,0x50x150x50	142,58			UCD 3,0x50x150x50	142,58			
		TR	13468,25	LL 3/16" x 2 1/2"	610,04			LL 3/16" x 2 1/2"	610,04			
	Peso Tot. (kg)				866,29				896,30			
	15	BS	2588,19	UCD 2,0x50x150x50	98,91	8,14	0,200					
		BI	2548,50	UCD 3,0x50x100x50	114,12							
TR		14542,76	LL 3/16" x 3"	796,73								
Peso Tot. (kg)				1009,76								

Apêndice 03
Relação dos perfis Gerdau disponíveis para o
dimensionamento

LL - CANTONEIRA DE ABAS IGUAIS (pol.)

b_f		Área cm²	t_f		J_x=J_y cm⁴	W_x=W_y cm³	r_x=r_y cm	Rz.min. cm	X cm	Peso kg/m
pol.	mm		pol.	cm						
5/8"	15,880			0,25						0,57
3/4"	19,050			0,25						0,71
1/2"	12,700	0,70	1/8"	0,317	0,10	0,11	0,37	0,25	0,43	0,55
5/8"	15,880	0,90	1/8"	0,317	0,20	0,19	0,47	0,32	0,51	0,71
3/4"	19,050	1,11	1/8"	0,317	0,36	0,27	0,57	0,38	0,59	0,87
7/8"	22,200	1,32	1/8"	0,317	0,58	0,38	0,66	0,46	0,66	1,04
1"	25,400	1,48	1/8"	0,317	0,83	0,49	0,79	0,48	0,76	1,19
		2,19	3/16"	0,476	1,25	0,66	0,76	0,48	0,81	1,73
		2,84	1/4"	0,635	1,66	0,98	0,76	0,48	0,86	2,22
1.1/4"	31,750	1,93	1/8"	0,317	1,67	0,82	0,97	0,64	0,89	1,50
		2,77	3/16"	0,476	2,50	1,15	0,97	0,61	0,97	2,20
		3,62	1/4"	0,635	3,33	1,47	0,94	0,61	1,02	2,86
1.1/2"	38,100	2,32	1/8"	0,317	3,33	1,15	1,17	0,76	1,07	1,83
		3,42	3/16"	0,476	4,58	1,64	1,17	0,74	1,12	2,68
		4,45	1/4"	0,635	5,83	2,13	1,15	0,74	1,19	3,48
1.3/4"	44,450	2,71	1/8"	0,317	5,41	1,64	1,40	0,89	1,22	2,14
		4,00	3/16"	0,476	7,50	2,30	1,37	0,89	1,30	3,15
		5,22	1/4"	0,635	9,57	3,13	1,35	0,86	1,35	4,12
2"	50,800	3,10	1/8"	0,317	7,91	2,13	1,60	1,02	1,40	2,46
		4,58	3/16"	0,476	11,70	3,13	1,58	1,02	1,45	3,63
		6,06	1/4"	0,635	14,60	4,10	1,55	0,99	1,50	4,74
		7,42	5/16"	0,794	17,50	4,91	1,53	0,99	1,55	5,83
		8,76	3/8"	0,952	20,00	5,73	1,50	0,99	1,63	6,99
2.1/2"	63,500	5,80	3/16"	0,476	23,00	4,91	1,98	1,24	1,75	4,57
		7,67	1/4"	0,635	29,00	6,40	1,96	1,24	1,83	6,10
		9,48	5/16"	0,794	35,00	7,87	1,93	1,24	1,88	7,44
		11,16	3/8"	0,952	41,00	9,35	1,91	1,22	1,93	8,78
3"	76,200	7,03	3/16"	0,476	40,00	7,21	2,39	1,50	2,08	5,52
		9,29	1/4"	0,635	50,00	9,50	2,36	1,50	2,13	7,29
		11,48	5/16"	0,794	62,00	11,60	2,34	1,50	2,21	9,07
		13,61	3/8"	0,952	75,00	13,60	2,31	1,47	2,26	10,71
		17,74	1/2"	1,270	91,00	18,00	2,29	1,47	2,36	14,00
3.1/2"	88,900	10,90	1/4"	0,635	83,70	13,00	2,77	1,76	2,46	8,56
		13,50	5/16"	0,794	102,00	16,00	2,75	1,75	2,52	10,59
		16,00	3/8"	0,952	121,00	19,20	2,75	1,75	2,58	12,58

UCD – Perfil U simples dobrado de chapa

Dimensões			S	P	J _x	W _x	i _x	e _y	J _y	W _y	i _y
h	B	e = r	cm ²	Kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	cm	cm ⁴	cm ³	cm
mm	mm	mm									
50	25	2,00	1,75	1,68	6,66	2,60	1,94	0,71	1,07	0,60	0,78
		2,25	2,07	1,62	7,70	3,00	1,92	0,73	1,26	0,71	0,77
		2,65	2,38	1,86	8,66	3,40	1,90	0,75	1,43	0,82	0,77
		3,00	2,67	2,10	9,55	3,80	1,88	0,77	1,59	0,92	0,77
75	38	2,00	2,80	2,20	25,10	6,60	2,99	1,12	4,55	1,58	1,27
		2,25	3,32	2,61	29,43	7,80	2,97	1,14	5,37	1,88	1,27
		2,65	3,84	3,01	33,56	8,90	2,95	1,16	6,15	2,17	1,26
		3,00	4,35	3,41	37,49	9,90	2,93	1,18	6,91	2,45	1,26
		4,75	6,48	5,09	52,75	14,00	2,85	1,27	10,00	3,66	1,24
100	40	2,00	3,27	2,57	49,01	9,80	3,86	0,97	4,99	1,65	1,23
		2,25	3,89	3,06	57,67	11,50	3,84	0,99	5,89	1,96	1,22
		2,65	4,51	3,54	65,99	13,10	3,82	1,01	6,76	2,26	1,22
		3,00	5,11	4,01	73,99	14,70	3,80	1,03	7,61	2,56	1,22
		4,75	7,67	6,02	105,9	21,10	3,71	1,11	11,09	3,84	1,20
100	50	2,00	3,65	2,87	58,15	11,60	3,98	1,34	9,24	2,52	1,58
		2,25	4,35	3,41	68,55	13,70	3,96	1,36	10,94	3,00	1,58
		2,65	5,04	3,95	78,60	15,70	3,94	1,38	12,59	3,48	1,58
		3,00	5,71	4,48	88,29	17,60	3,92	1,40	14,20	3,94	1,57
		4,75	8,63	6,77	127,5	25,40	3,84	1,48	20,89	5,84	1,55
127	50	2,00	4,17	3,27	101,30	15,90	4,92	1,19	9,94	2,61	1,54
		2,25	4,97	3,90	119,60	18,80	4,90	1,20	11,78	3,10	1,53
		2,65	5,76	4,52	137,50	21,60	4,88	1,22	13,57	3,59	1,53
		3,00	6,53	5,13	154,80	24,30	4,86	1,24	15,32	4,08	1,53
		4,75	9,91	7,78	225,90	35,50	4,77	1,32	22,66	6,16	1,51
150	50	2,00	4,60	3,61	149,90	19,90	5,70	1,08	10,42	2,66	1,50
		2,25	5,49	4,31	177,40	23,60	5,68	1,10	12,35	3,17	1,49
		2,65	6,37	5,00	204,10	27,20	5,65	1,12	14,24	3,67	1,49
		3,00	7,23	5,68	230,10	30,60	5,63	1,13	16,08	4,16	1,49
		4,75	11,01	8,64	338,00	45,00	5,54	1,21	23,84	6,30	1,47
200	50	2,00	5,55	4,36	299,30	29,90	7,33	0,91	11,20	2,74	1,41
		2,25	6,63	5,20	354,90	35,40	7,31	0,93	13,28	3,26	1,41
		2,65	7,70	6,04	409,30	40,90	7,28	0,95	15,32	3,78	1,41
		3,00	8,75	6,87	462,40	46,20	7,26	0,96	17,31	4,29	1,40
		4,75	13,39	10,51	686,20	68,60	7,15	1,04	25,76	6,51	1,38

APÊNDICE 04

Detalhes do processo de otimização

Análise do afastamento dos banzos – Relação de materiais

Vão livre: 15,0m / Inclinação: 10° / Intertercas: 0,625m

Convenção: BS – Banzo Superior; BI – Banzo Inferior; TR – Treliçado

Afastamento (m)	Descrição	Comp. (cm)	Pré-Dimensionamento				Dimensionamento Final			
			Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência
0,50	BS	1523,14	UCD 2,25x38x75x38	38,63	2,80	0,409	UCD 2,65x50x100x50	60,62	3,17	0,355
	BI	1522,18	UCD 2,65x50x100x50	60,57			UCD 2,65x50x100x50	60,58		
	TR	5933,16	LL 1/8" x 1"	69,32			LL 1/8" x 1"	69,32		
	Peso Tot. (kg)			168,52				190,52		
0,60	BS	1523,14	UCD 2,0x38x75x38	34,54	3,15	0,381	UCD 2,65x40x100x40	54,22	3,46	0,339
	BI	1522,18	UCD 2,65x40x100x40	54,24			UCD 2,65x40x100x40	54,18		
	TR	6821,52	LL 3/16" x 1"	114,75			LL 3/16" x 1"	114,75		
	Peso Tot. (kg)			203,53				223,15		
0,70	BS	1523,14	UCD 2,0x38x75x38	34,54	3,14	0,301	UCD 3,0x38x75x38	50,56	3,37	0,275
	BI	1522,18	UCD 3,0x38x75x38	50,59			UCD 3,0x38x75x38	50,53		
	TR	7741,39	LL 1/8" x 1 1/4"	132,05			LL 1/8" x 1 1/4"	132,05		
	Peso Tot. (kg)			217,18				233,14		
0,75	BS	1523,14	UCD 2,0x38x75x38	34,54	3,09	0,310	UCD 2,25x40x100x40	46,45	3,26	0,288
	BI	1522,18	UCD 2,25x40x100x40	46,41			UCD 2,25x40x100x40	46,41		
	TR	8209,83	LL 1/8" x 1 1/4"	140,05			LL 1/8" x 1 1/4"	140,05		
	Peso Tot. (kg)			221,00				232,91		
0,80	BS	1523,14	UCD 2,0x38x75x38	34,54	3,08	0,317	UCD 2,65x38x75x38	45,08	3,23	0,299
	BI	1522,18	UCD 2,65x38x75x38	45,06			UCD 2,65x38x75x38	45,05		
	TR	8682,71	LL 1/8" x 1 1/4"	148,11			LL 1/8" x 1 1/4"	148,11		
	Peso Tot. (kg)			227,71				238,24		
0,90	BS	1523,14	UCD 2,0x38x75x38	34,54	3,10	0,336	UCD 2,65x38x75x38	45,08	3,24	0,318
	BI	1522,18	UCD 2,65x38x75x38	45,06			UCD 2,65x38x75x38	45,05		
	TR	9639,17	LL 1/8" x 1 1/4"	164,43			LL 1/8" x 1 1/4"	164,43		
	Peso Tot. (kg)			244,03				254,56		
1,00	BS	1523,14	UCD 3,0x25x50x50	32,33	3,02	0,393	UCD 2,25x38x75x38	38,68	3,09	0,367
	BI	1522,18	UCD 2,25x38x75x38	38,61			UCD 2,25x38x75x38	38,66		
	TR	10606,64	LL 1/8" x 1 1/4"	180,93			LL 1/8" x 1 1/4"	180,93		
	Peso Tot. (kg)			251,87				258,27		

Análise do afastamento dos banzos – Tensões atuantes

Vão livre: 15,0m / Inclinação: 10° / Intertercas: 0,625m

Altura (m)	HIPÓTESE 01		HIPÓTESES 02 E 03		HIPÓTESE 04		HIPÓTESE 05	
	TRAÇÃO (kgf/cm ²)	COMP. (kgf/cm ²)	TRAÇÃO (kgf/cm ²)	COMP. (kgf/cm ²)	TRAÇÃO (kgf/cm ²)	COMP. (kgf/cm ²)	TRAÇÃO (kgf/cm ²)	COMP. (kgf/cm ²)
0,5	628,87	2283,11	2898,49	1311,11	1851,45	1002,1	2152,97	647,99
0,6	626,87	2104,64	2594,78	1198,71	1629,7	891,14	1984,39	644,71
0,7	621,27	1948,25	2349,98	1114,12	1456,46	809,19	1837,32	639,23
0,75	599,8	1940,43	2310,72	1049,27	1420,79	755,54	1829,95	615,38
0,8	607,64	1808,6	2144,44	1041,27	1314,74	742,42	1706,25	626,83
0,9	586,22	1683,69	1968,3	973,84	1195,65	684,51	1589,1	607,43
1	558,73	1572,36	1815,73	909,52	1093,92	632,44	1484,67	582,46

Análise do afastamento do treliçado interno (Interterças) – Relação de materiais

Vão livre: 15,0m / Inclinação: 10°/Afast. banzos: 0,75m

Convenção: BS – Banzo Superior; BI – Banzo Inferior; TR – Treliçado

Afastamento (m)	Descrição	Comp. (cm)	Pré-Dimensionamento				Dimensionamento Final			
			Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência
0,50	BS	1523,14	UCD 2,0x38x75x38	34,54	3,18	0,299	UCD 3,0x38x75x38	50,56	3,38	0,277
	BI	1522,37	UCD 3,0x38x75x38	50,60			UCD 3,0x38x75x38	50,60		
	TR	9924,69	LL 1/8" x 1 1/4"	169,30			LL 1/8" x 1 1/4"	169,30		
	Peso Tot. (kg)			254,44				270,46		
0,625	BS	1523,14	UCD 2,0x38x75x38	34,54	3,09	0,310	UCD 2,25x40x100x40	46,45	3,26	0,288
	BI	1522,18	UCD 2,25x40x100x40	46,41			UCD 2,25x40x100x40	46,41		
	TR	8209,83	LL 1/8" x 1 1/4"	140,05			LL 1/8" x 1 1/4"	140,05		
	Peso Tot. (kg)			221,00				232,91		
0,75	BS	1523,14	UCD 2,0x38x75x38	34,54	3,13	0,347	UCD 3,0x38x75x38	50,56	3,37	0,314
	BI	1521,98	UCD 3,0x38x75x38	50,59			UCD 3,0x38x75x38	50,59		
	TR	7099,78	LL 1/8" x 1 1/4"	121,11			LL 1/8" x 1 1/4"	121,11		
	Peso Tot. (kg)			206,24				222,26		
1,00	BS	1523,14	UCD 2,0x40x100x40	41,47	3,21	0,397	UCD 3,0x38x75x38	50,56	3,37	0,380
	BI	1523,14	UCD 3,0x38x75x38	50,56			UCD 3,0x38x75x38	50,56		
	TR	5901,48	LL 1/8" x 1 1/4"	100,67			LL 1/8" x 1 1/4"	100,67		
	Peso Tot. (kg)			192,70				201,79		
1,25	BS	1523,14	UCD 2,0x50x100x50	46,25	3,31	0,434	UCD 2,25x50x100x50	51,78	3,41	0,416
	BI	1521,21	UCD 2,25x50x100x50	51,75			UCD 2,25x50x100x50	51,75		
	TR	5045,56	LL 1/8" x 1 1/4"	86,07			LL 1/8" x 1 1/4"	86,07		
	Peso Tot. (kg)			184,07				189,60		
1,50	BS	1523,14	UCD 2,0x50x150x50	58,21	4,19	0,436	UCD 3,0x50x100x50	68,23	4,37	0,398
	BI	1520,83	UCD 3,0x50x100x50	68,10			UCD 3,0x50x100x50	68,10		
	TR	4596,32	LL 1/8" x 1 3/4"	97,28			LL 1/8" x 1 3/4"	97,28		
	Peso Tot. (kg)			223,59				233,61		
1,875	BS	1523,14	UCD 2,65x50x100x50	60,62	4,08	0,512	UCD 2,65x50x100x50	60,62	4,08	0,512
	BI	1520,25	UCD 2,65x50x100x50	60,50			UCD 2,65x50x100x50	60,50		
	TR	4191,65	LL 1/8" x 1 3/4"	88,71			LL 1/8" x 1 3/4"	88,71		
	Peso Tot. (kg)			209,83				209,83		

Análise do treliçado interno (Interterças) – Tensões atuantes

Vão livre: 15,0m / Inclinação: 10°/Afast. banzos: 0,75m

Interterças (m)	HIPÓTESE 01		HIPÓTESES 02 E 03		HIPÓTESE 04		HIPÓTESE 05	
	TRACÇÃO (kgf/cm ²)	COMP. (kgf/cm ²)	TRACÇÃO (kgf/cm ²)	COMP. (kgf/cm ²)	TRACÇÃO (kgf/cm ²)	COMP. (kgf/cm ²)	TRACÇÃO (kgf/cm ²)	COMP. (kgf/cm ²)
0,5	688,27	2008,27	2398,61	1204,96	1477,52	866,5	1893,82	709,8
0,625	556,86	1719,06	2053,91	979,09	1265,38	705,22	1621,52	574,42
0,75	599,8	1940,43	2310,72	1049,27	1420,79	755,54	1829,95	615,38
1	508,95	1976,89	2306,08	894,1	1399,96	644,32	1862,92	523,6
1,25	463,65	1888,45	2245,1	801	1379,04	585,12	1780,83	454,04
1,5	610,59	2320,09	2757,85	891,26	1693,82	627,6	2187,94	580,73
1,875	517,56	2032,48	2336,45	732,11	1405,02	493,9	1914,86	490,32

Análise da inclinação dos banzos (Cobertura) – Relação de materiais

Vão livre: 15,0m / Interterças: 0,625m/Afast. banzos: 0,75m

Convenção: BS – Banzo Superior; BI – Banzo Inferior; TR – Treliçado

Inclinação	Descrição	Comp. (cm)	Pré-Dimensionamento				Dimensionamento Final			
			Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência
5°	BS	1505,73	UCD 2,25x38x75x38	38,19	3,26	0,342	UCD 2,65x40x100x40	53,60	3,48	0,315
	BI	1505,49	UCD 2,65x40x100x40	53,64			UCD 2,65x40x100x40	53,64		
	TR	8127,19	LL 1/8" x 1 1/4"	138,64			LL 1/8" x 1 1/4"	138,64		
	Peso Tot. (kg)			230,47				245,88		
10°	BS	1523,14	UCD 2,0x38x75x38	34,54	3,09	0,310	UCD 2,25x40x100x40	46,45	3,26	0,288
	BI	1522,18	UCD 2,25x40x100x40	46,41			UCD 2,25x40x100x40	46,41		
	TR	8209,83	LL 1/8" x 1 1/4"	140,05			LL 1/8" x 1 1/4"	140,05		
	Peso Tot. (kg)			221,00				232,91		
15°	BS	1552,91	UCD 2,65x25x50x25	29,49	2,90	0,306	UCD 2,25x38x75x38	39,44	3,04	0,272
	BI	1550,71	UCD 2,25x38x75x38	39,33			UCD 2,25x38x75x38	39,33		
	TR	8351,28	LL 1/8" x 1 1/4"	142,46			LL 1/8" x 1 1/4"	142,46		
	Peso Tot. (kg)			211,28				221,23		
20°	BS	1596,27	UCD 2,65x25x50x25	30,31	2,84	0,281	UCD 2,0x38x75x38	36,23	2,92	0,257
	BI	1592,26	UCD 2,0x38x75x38	36,10			UCD 2,0x38x75x38	36,14		
	TR	8557,48	LL 1/8" x 1 1/4"	145,98			LL 1/8" x 1 1/4"	145,98		
	Peso Tot. (kg)			212,39				218,35		

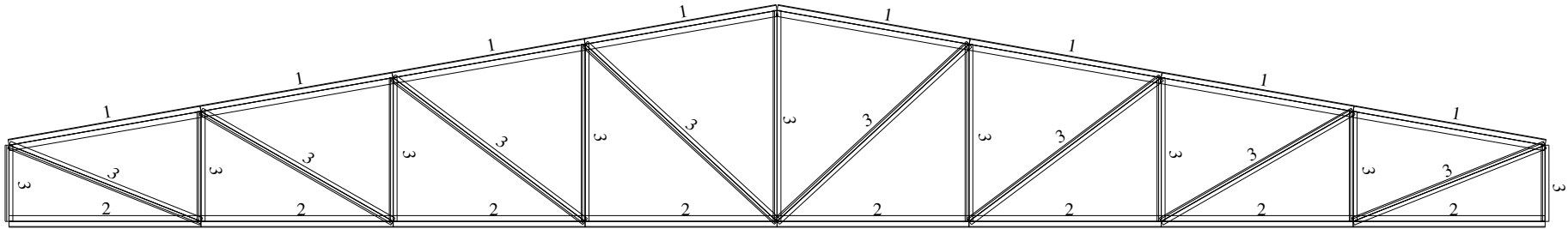
Análise da inclinação dos banzos (Cobertura) – Tensões atuantes

Vão livre: 15,0m / Interterças: 0,625m/Afast. banzos: 0,75m

Inclinação	HIPÓTESE 01		HIPÓTESES 02 E 03		HIPÓTESE 04		HIPÓTESE 05	
	TRACÇÃO (kgf/cm ²)	COMP. (kgf/cm ²)	TRACÇÃO (kgf/cm ²)	COMP. (kgf/cm ²)	TRACÇÃO (kgf/cm ²)	COMP. (kgf/cm ²)	TRACÇÃO (kgf/cm ²)	COMP. (kgf/cm ²)
5°	1370,43	2646,25	2210,35	1338,51	999,7	687,57	2486,7	1351,73
10°	599,8	1940,43	2310,72	1049,27	1420,79	755,54	1829,95	615,38
15°	419,58	1547,19	1582,4	774,25	872,92	549,71	1453,81	479,97
20°	310,85	1334,54	436,26	160,19	39,32	179	1051,52	343,51

APÊNDICE 05

Modelo de saída de resultados ENGMET 99



Estrutura : F:\ENGMET\ENGMET99\T05-A-10.DDG
 Obra : PROJETO DE PESQUISA
 Cliente : MARCIO BREUNIG/UNIJUI
 Assunto : TRABALHO DO TCC
 Data : 02-15-2008

RELAÇÃO DE PEÇAS

Peça 1 : BANZO SUPERIOR - (1x) UDC 2,00 x 38 x 75 x 38 < ângulo = 270 / seção número : 6 Tipo : 05 - U ch.dobra > L peça = 507,68
 Peça 2 : BANZO INFERIOR - (1x) UDC 2,00 x 38 x 75 x 38 < ângulo = 90 / seção número : 6 Tipo : 05 - U ch.dobra > L peça = 500,00
 Peça 3 : TRELIÇADO - (2x) LL 3/16" x 1" < ângulo = 0 / seção número : 41 Tipo : 06 - L Laminada > L peça = 1006,80

RELAÇÃO DE MATERIAIS

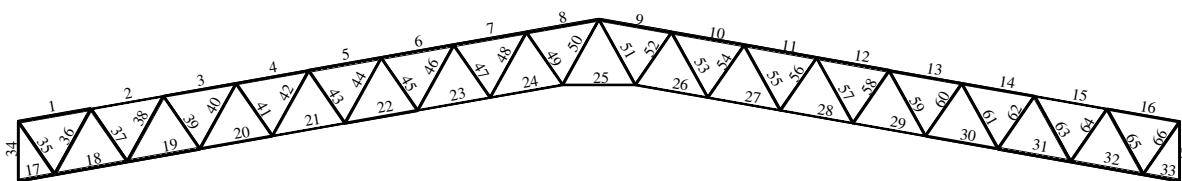
Cadastro de seções transversais : F:\ENGMET\ENGMET99\GERDAU.VSE

Seção	Tipo da seção	Nome da seção	Peso kgf/m	Compr.(cm)	Peso (kgf)
6	05 -	U ch.dobra UDC 2,00 x 38 x 75 x 38	2,27	1007,68	22,85
41	06 -	L Laminada LL 3/16" x 1"	1,68	2013,60	33,87

TOTAL = 56,72

Peso por m do eixo X : 11,34 kgf/m
 Peso por m do eixo Y : 82,20 kgf/m
 Peso médio das peças dimensionadas ... : 2,82 kgf/m

APÊNDICE 06
**Análise didática – Busca da máxima eficiência global
da estrutura**



Peça	Perfil	Comprimento (cm)	Peso (kg)	Eficiência (%)	
BANZO SUPERIOR	01	UCD 2,25x50x100x50	126,93	4,32	0,95
	02	UCD 2,0x25x50x25	126,93	1,86	0,972
	03	UCD 2,0x38x75x38	126,93	2,88	0,688
	04	UCD 2,0x40x100x40	126,93	3,46	0,990
	05	UCD 2,25x50x100x50	126,93	4,32	0,882
	06	UCD 2,25x50x100x50	126,93	4,32	0,974
	07	UCD 2,25x50x100x50	126,93	4,32	0,960
	08	UCD 2,0x50x100x50	126,93	3,85	0,973
	09	UCD 2,0x50x100x50	126,93	3,85	0,973
	10	UCD 2,25x50x100x50	126,93	4,32	0,960
	11	UCD 2,25x50x100x50	126,93	4,32	0,974
	12	UCD 2,25x50x100x50	126,93	4,32	0,882
	13	UCD 2,0x40x100x40	126,93	3,46	0,990
	14	UCD 2,0x38x75x38	126,93	2,88	0,688
	15	UCD 2,0x25x50x25	126,93	1,86	0,289
	16	UCD 2,25x38x75x38	126,93	3,22	0,895
BANZO INFERIOR	17	UCD 3,0x50x100x50	63,46	2,84	0,922
	18	UCD 3,0x50x100x50	126,93	5,68	0,902
	19	UCD 2,0x50x100x50	126,93	3,85	0,976
	20	UCD 2,0x38x75x38	126,93	2,88	0,877
	21	UCD 2,65x25x50x25	126,93	2,41	0,973
	22	UCD 2,0x38x75x38	126,93	2,88	0,496
	23	UCD 3,0x25x50x25	126,93	2,69	0,924
	24	UCD 2,0x25x50x25	126,93	1,86	0,622
	25	UCD 3,0x25x50x25	125,00	2,65	0,948
	26	UCD 2,0x25x50x25	126,93	1,86	0,622
	27	UCD 2,0x25x50x25	126,93	1,86	0,431
	28	UCD 2,0x25x50x25	126,93	1,86	0,514
	29	UCD 2,65x25x50x25	126,93	2,41	0,973
	30	UCD 2,0x38x75x38	126,93	2,88	0,877
	31	UCD 2,0x50x100x50	126,93	3,85	0,976
	32	UCD 3,0x50x100x50	126,93	5,68	0,902
	33	UCD 3,0x50x100x50	63,46	2,84	0,922

Peça	Perfil	Comprimento (cm)	Peso (kg)	Eficiência (%)	
TRELIÇADO	34	LL 1/8" X 1 1/4"	101,54	3,46	0,00
	35	LL 1/8" X 1 3/4"	110,00	4,66	0,866
	36	LL 1/8" X 1 3/4"	128,75	5,45	0,880
	37	LL 1/8" X 1 3/4"	110,00	4,66	0,703
	38	LL 1/8" X 1 3/4"	128,75	5,45	0,729
	39	LL 1/8" X 1 1/4"	110,00	3,75	0,899
	40	LL 1/8" X 1 1/4"	128,75	4,39	0,991
	41	LL 1/8" X 1 1/4"	110,00	3,75	0,591
	42	LL 1/8" X 1 1/4"	128,75	4,39	0,697
	43	LL 1/8" X 1 1/4"	110,00	3,75	0,282
	44	LL 1/8" X 1 1/4"	128,75	4,39	0,402
	45	LL 1/8" X 1 1/4"	110,00	3,75	0,047
	46	LL 1/8" X 1 1/4"	128,75	4,39	0,107
	47	LL 1/8" X 1 1/4"	110,00	3,75	0,123
	48	LL 1/8" X 1 1/4"	128,75	4,39	0,512
	49	LL 1/8" X 1 1/4"	110,00	3,75	0,316
	50	LL 1/8" X 1 1/4"	128,75	4,39	0,809
	51	LL 1/8" X 1 1/4"	128,75	4,39	0,327
	52	LL 1/8" X 1 1/4"	110,00	3,75	0,316
	53	LL 1/8" X 1 1/4"	128,75	4,39	0,215
	54	LL 1/8" X 1 1/4"	110,00	3,75	0,123
	55	LL 1/8" X 1 1/4"	128,75	4,39	0,107
	56	LL 1/8" X 1 1/4"	110,00	3,75	0,120
	57	LL 1/8" X 1 1/4"	128,75	4,39	0,402
	58	LL 1/8" X 1 1/4"	110,00	3,75	0,235
	59	LL 1/8" X 1 1/4"	128,75	4,39	0,697
	60	LL 1/8" X 1 1/4"	110,00	3,75	0,422
	61	LL 1/8" X 1 1/4"	128,75	4,39	0,991
	62	LL 1/8" X 1 1/4"	110,00	3,75	0,610
	63	LL 1/8" X 1 1/4"	128,75	5,45	0,729
	64	LL 1/8" X 1 1/4"	110,00	3,75	0,798
	65	LL 1/8" X 1 3/4"	128,75	5,45	0,880
	66	LL 1/8" X 1 1/4"	110,00	3,75	0,968
	67	LL 1/8" X 1 1/4"	101,54	3,46	0,00

Peso total das peças dimensionadas: 251,85 kg

Eficiência global do dimensionamento: 0,673

Peso médio do dimensionamento (Consumo de aço): 3,12 kg/m

APÊNDICE 07

Resultados das topologias otimizadas

Resultados das topologias otimizadas - Relação de materiais

Convenção: BS – Banzo Superior; BI – Banzo Inferior; TR – Treliçado

Vão Livre (m)	Descrição	Comp. (cm)	Pré-Dimensionamento				Dimensionamento Final			
			Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência	Perfil	Peso (kg)	Cons. Aço (kg/m)	Eficiência
5,0	BS	517,64	UCD 2,0x25x50x25	7,60	1,27	0,272	UCD 2,0x25x50x25	7,60	1,27	0,272
	BI	517,64	UCD 2,0x25x50x25	7,60			UCD 2,0x25x50x25	7,60		
	TR	1993,13	LL 1/8" x 1/2"	10,69			LL 1/8" x 1/2"	10,69		
	Peso Tot. (kg)			25,89				25,89		
10,0	BS	1035,28	UCD 2,25x25x50x25	16,97	1,95	0,466	UCD 3,0x25x50x25	21,94	2,07	0,440
	BI	1035,28	UCD 3,0x25x50x25	21,94			UCD 3,0x25x50x25	21,94		
	TR	3986,26	LL 1/8" x 7/8"	40,22			LL 1/8" x 7/8"	40,22		
	Peso Tot. (kg)			79,13				84,10		
15,0	BS	1552,91	UCD 2,0x38x75x38	35,21	2,94	0,380	UCD 2,0x40x100x40	42,28	3,06	0,357
	BI	1552,91	UCD 2,0x40x100x40	42,28			UCD 2,0x40x100x40	42,28		
	TR	5979,39	LL 1/8" x 1 1/4"	102,00			LL 1/8" x 1 1/4"	102,00		
	Peso Tot. (kg)			179,49				186,56		
20,0	BS	2070,55	UCD 2,0x50x127x50	71,65	3,97	0,442	UCD 2,65x50x100x50	82,39	4,10	0,422
	BI	2070,55	UCD 2,65x50x100x50	82,39			UCD 2,65x50x100x50	82,39		
	TR	7972,52	LL 1/8" x 1 3/4"	168,73			LL 1/8" x 1 3/4"	168,73		
	Peso Tot. (kg)			322,77				333,51		
25,0	BS	2588,19	UCD 2,65x50x150x50	129,91	6,54	0,388	UCD 4,75x50x100x50	177,94	7,02	0,355
	BI	2588,19	UCD 4,75x50x100x50	177,94			UCD 4,75x50x100x50	177,94		
	TR	9965,65	LL 3/16" x 2"	356,81			LL 3/16" x 2"	356,81		
	Peso Tot. (kg)			664,66				712,69		