



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica
Mestrado Profissional em Construção Metálica (MECOM)



Otimização de sistemas estruturais para galpões utilizando o método dos elementos finitos

Ouro Preto
2018



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica
Mestrado Profissional em Construção Metálica – MECOM



Sheila Bárbara Ferreira Silva

Otimização de sistemas estruturais para galpões utilizando o método dos elementos finitos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Construção Metálica.

Orientador: Prof. Geraldo Donizetti de Paula, D.Sc.
Coorientador: Prof. Flávio Teixeira de Souza, D.Sc.

Ouro Preto
2018

S586o

Silva, Sheila Bárbara Ferreira.

Otimização de sistemas estruturais para galpões utilizando o método dos elementos finitos [manuscrito] / Sheila Bárbara Ferreira Silva. - 2018.

92f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Donizetti de Paula.

Coorientador: Prof. Dr. Flávio Teixeira de Souza .

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Mestrado Profissional em Construção Metálica.

Área de Concentração: Construção Metálica.

1. Perfis formados a frio. 2. Galpões de uso geral. 3. Sistemas estruturais. I. Paula, Geraldo Donizetti de. II. Souza , Flávio Teixeira de. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624.014



UFOP
Universidade Federal
de Ouro Preto



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica
Mestrado Profissional em Construção Metálica – MECOM



OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS PARA GALPÕES UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

AUTORA: SHEILA BÁRBARA FERREIRA SILVA

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em dezenove de julho de 2018, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Geraldo Donizetti de Paula, D.Sc. – UFOP (Presidente)

Prof. Flávio Teixeira de Souza, D.Sc. – IFMG

Profa. Rovadavia Aline de Jesus Ribas, D.Sc. – UFOP

Prof. Mário Luís Cabello Russo, D.Sc. – IFMG

DEDICATÓRIA

Ao meu filho Joaquim.

Ao meu marido Airton.

À minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar forças para vencer mais esta etapa.

Aos meus pais pelo incentivo e apoio.

Ao Airton pelo amor, paciência e companheirismo.

Aos professores Flávio e Geraldo pela excelente orientação na realização deste trabalho.

À Róvia pela atenção e apoio.

À Escola de Minas pela acolhida, em especial ao MECOM.

Aos colegas do MECOM pela troca de experiências e amizade.

À Samarco pelo apoio constante.

RESUMO

Uma variedade de arranjos estruturais de aço podem ser adotados na concepção de coberturas de galpões de uso geral. A escolha adequada dos sistemas estruturais se apresenta como um fator de grande importância para o desenvolvimento de soluções padronizadas e competitivas. Em função disso, a opção por treliças constituídas de perfis formados a frio mostra-se muito interessante no que se refere ao requisito leveza e, conseqüentemente, custo da estrutura. Este trabalho tem o intuito de avaliar comparativamente o desempenho de algumas tipologias de treliças de cobertura de galpões industriais. Assim sendo, um estudo paramétrico foi desenvolvido considerando as tipologias de treliças de banzos paralelos, trapezoidais, triangulares e arqueadas, submetidas a carregamentos comuns, com ações permanentes e variáveis, com vãos livres variando de 16 a 32 metros, em intervalos de 4 metros. Foram definidos ainda, o espaçamento entre as treliças de 6, 7,5 e 9 metros. Esses parâmetros foram testados considerando as áreas das seções transversais de três tipos de perfis, Perfil U, Perfil U enrijecido (U_e) e Perfil Cantoneira, permitindo uma análise da utilização de cada um deles. De posse desses parâmetros foram gerados 180 modelos cujas simulações/análises foram realizadas a partir do método de otimização disponível no programa Ansys. Como parâmetros da avaliação da eficiência dos sistemas estruturais foram consideradas a taxa de consumo de aço e a resposta estrutural dos diversos modelos analisados. Os resultados indicaram que coberturas em treliças arqueadas apresentam as maiores taxas de consumo de aço, seguida pelas coberturas resolvidas com treliça de banzos paralelos. As tipologias que apresentaram menor consumo de aço foram a treliça trapezoidal, para menores espaçamentos entre as treliças de cobertura, e a treliça triangular, para maiores espaçamentos. Esse estudo foi desenvolvido com a finalidade de se gerar subsídios que possam auxiliar profissionais na tomada de decisões, visando a adoção de uma estrutura de cobertura que atenda a uma melhor relação custo/benefício.

Palavras-chave: Perfis formados a frio, galpões de uso geral, sistemas estruturais.

ABSTRACT

Various structural steel arrangements can be adopted in the design of roofs for general purpose sheds. The proper choice of structural systems is a great importance factor for the development of standardized and competitive solutions. As a result, the choice of structural trusses built by cold-formed profiles appears as a very interesting one with regard to lightness and cost of the structure. This work intends to compare the performance of some types of roof trusses for industrial sheds. Parallel, trapeze and triangle-shaped trusses types are studied, all submitted to ordinary loads at permanent and variable operation actions with free spans varying from 16 to 32 meters, at 4 meters intervals. Spacing between the trusses were also defined among 6, 7.5 and 9 meters types. These parameters were tested considering the cross-sectional areas of three types of profiles, U-Profile, Stiffened U-Profile and Angle Profile, in order to allow analysis of each type application. 180 models were generated from such parameters, which analysis was run through the Ansys program optimization method. The rate of steel consumption and the structural response to the various analysed models were taken as structural systems efficiency parameters. The results indicate that roofs in arched trusses present the highest steel consumption rates, followed by those built with parallel top beam bar trusses. The trapeze-shaped trusses show the lowest steel consumption in the case of smaller spacing between the roof trusses and the triangle trusses in the case of the larger spacing. It is expected this study can help professionals who need to decide on roof structures choice based on cost/benefit ratio.

Keywords: Cold-formed profiles, general purpose sheds, structural systems.

Lista de Figuras

CAPITULO 2 – REFERENCIAL TEORICO

Figura 2.1: Formulação de um problema de otimização.....	08
Figura 2.2: Fluxo do Método de Primeira Ordem.....	14

CAPITULO 3 - DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Figura 3.1: Variação da geometria para as coberturas compostas por treliças de banzos paralelos (BP).....	21
Figura 3.2: Variação da geometria para as coberturas compostas por treliças trapezoidais (TP).....	22
Figura 3.3: Variação da geometria para as coberturas compostas por treliças triangulares (TT).....	24
Figura 3.4: Variação da geometria para as coberturas compostas por treliças arqueadas (TA).....	25

CAPITULO 4 - ANÁLISE ESTRUTURAL

Figura 4.1: Coeficientes de forma para coberturas em duas águas.....	30
Figura 4.2: Coeficientes de forma para coberturas arqueadas.....	30
Figura 4.3: Identificação das solicitações axiais no Modelo BP-16-6-Perfil U.....	34

CAPITULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Figura 5.1: Taxa de consumo de aço considerando a tipologia BP.....	39
Figura 5.2: Taxa de consumo de aço para todos os perfis analisados na tipologia BP.....	40
Figura 5.3: Taxa de consumo de aço considerando a tipologia TP.....	41
Figura 5.4: Taxa de consumo de aço para todos os perfis analisados na tipologia TP.....	42
Figura 5.5: Taxa de consumo de aço considerando a tipologia TT.....	43
Figura 5.6: Taxa de consumo de aço para todos os perfis analisados na tipologia TT.....	45
Figura 5.7: Taxa de consumo de aço considerando a tipologia TA.....	45
Figura 5.8: Taxa de consumo de aço para todos os perfis analisados na tipologia TA.....	46
Figura 5.9: Taxa de consumo de aço para todas as tipologias (BP, TP, TT e TA) – emprego do perfil U.....	47
Figura 5.10: Taxa de consumo de aço para todas as tipologias (BP, TP, TT e TA) – emprego do perfil U _e	48
Figura 5.11: Taxa de consumo de aço para todas as tipologias (BP, TP, TT e TA) – emprego do perfil cantoneira.....	49
Figura 5.12: Taxa de consumo de aço para as tipologias em análise – L= 6m.....	51
Figura 5.13: Taxas de consumo de aço considerando o espaçamento entre as treliças de 6 metros – todos os perfis e todas as tipologias.....	52
Figura 5.14: Taxa de consumo de aço para as tipologias em análise – L= 7,5 metros.....	54
Figura 5.15: Taxas de consumo de aço considerando o espaçamento entre as treliças de 7,5 metros – todos os perfis e todas as tipologias.....	55
Figura 5.16: Taxa de consumo de aço para as tipologias em análise – L= 9 metros.....	56
Figura 5.17: Taxas de consumo de aço considerando o espaçamento entre as treliças de 9 metros – todos os perfis e todas as tipologias.....	58

Lista de Tabelas

CAPITULO 3 - DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Tabela 3.1: Modelos analisados.....	19
Tabela 3.2: Critérios de parametrização adotados.....	20

CAPITULO 4 - ANÁLISE ESTRUTURAL

Tabela 4.1: Ações Permanentes (G).....	27
Tabela 4.2: Ação Variável (Q).....	28
Tabela 4.3: Cálculo da velocidade característica do vento.....	29
Tabela 4.4: Coeficientes das cargas de vento para coberturas em duas águas.....	31
Tabela 4.5: Coeficientes das cargas de vento para coberturas arqueadas.....	31
Tabela 4.6: Combinações das variáveis de projeto buscando uma aproximação do ponto ótimo	33
Tabela 4.7: Intervalos adotados para as variáveis de estado.....	35
Tabela 4.8: Análise da tipologia BP para o espaçamento de 6 metros com emprego de perfil U.....	36
Tabela 4.9: Escolha do perfil mais adequado e cálculo das taxas de aço.....	37

CAPITULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 5.1: Perfis com menores consumo de aço para todas as tipologias considerando o espaçamento entre as treliças de 6 metros.....	52
Tabela 5.2: Comparação entre os perfis U e U_e das taxas de consumo de aço considerando o espaçamento entre as treliças de 6 metros.....	52
Tabela 5.3: Perfis com menores consumo de aço para todas as tipologias considerando o espaçamento entre as treliças de 7,5 metros.....	54
Tabela 5.4: Comparação entre os perfis U e U_e das taxas de consumo de aço considerando o espaçamento entre as treliças de 7,5 metros.....	55
Tabela 5.5: Perfis com menores consumo de aço para todas as tipologias considerando o espaçamento entre as treliças de 9 metros.....	57
Tabela 5.6: Comparação entre os perfis U e U_e das taxas de consumo de aço considerando o espaçamento entre as treliças de 9 metros.....	57
Tabela 5.7: Perfis que apresentaram as menores taxas de aço empregado.....	59
Tabela 5.8: Tipologias que apresentaram as menores taxas de aço empregado.....	59
Tabela 5.9: Menores taxas de aço empregado – Perfis U e U_e	60
Tabela 5.10: Tipologias que apresentaram as menores taxas de aço empregado - Perfis U e U_e	60

Sumário

RESUMO	III
ABSTRACT	IV
LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE TABELAS.....	VI
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 JUSTIFICATIVA.....	2
1.2 OBJETIVO	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2 REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 ANÁLISE ESTRUTURAL.....	4
2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	5
2.3 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	6
2.3.1 Otimização de estruturas no software Ansys	9
2.3.1.1 Módulo de Otimização (OPT) - Ansys	10
2.3.1.2- Métodos e Ferramentas de Otimização	11
2.3.1.2.1-Método de Primeira Ordem.....	12
2.4 CONCEPÇÃO DE GALPÕES INDUSTRIAIS ESTRUTURADOS EM AÇO.....	14
2.4.1 Considerações fundamentais na concepção de um Galpão Industrial.....	15
3 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO.....	18
3.1 CRITÉRIOS DE PARAMETRIZAÇÃO	18
3.2 DEFINIÇÃO DOS MODELOS A PARTIR DAS TIPOLOGIAS ADOTADAS	21
3.2.1 Tipologia Treliça de Banzos Paralelos – BP	21
3.2.2 Tipologia Treliça de Trapezoidal –TP	22
3.2.3 Tipologia Treliça Triangular – TT.....	23
3.2.4 Tipologia Treliça Arqueada -TA	24
4 ANÁLISE ESTRUTURAL	26
4.1 DIMENSIONAMENTO DAS AÇÕES SOLICITANTES.....	26
4.1.1 Ações Permanentes (G)	27
4.1.2 Ações Variáveis (Q e V).....	28
4.1.2.1 Sobrecarga de cobertura (Q).....	28
4.1.2.2 Cargas de Vento (V).....	29
4.1.3 Combinação de Ações	32
4.1.4 Metodologia utilizada para otimização dos modelos	32
4.1.5 Metodologia adotada para obtenção das taxas de aço	35

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1 COMPARATIVO DAS TAXAS DE CONSUMO DE AÇO.....	38
5.1.1 <i>Taxa de consumo de aço para treliças de banzos paralelos (BP)</i>	38
5.1.2 <i>Taxa de consumo de aço para treliças trapezoidais (TP)</i>	41
5.1.3 <i>Taxa de consumo de aço para treliças triangulares (TT)</i>	43
5.1.4 <i>Taxa de consumo de aço para treliças arqueadas (TA)</i>	44
5.1.5 <i>Taxa de consumo de aço - Perfil U - todas as tipologias</i>	47
5.1.6 <i>Taxa de consumo de aço - Perfil U_e - todas as tipologias</i>	48
5.1.7 <i>Taxa de consumo de aço - Perfil Cantoneira- todas as tipologias</i>	49
5.1.8 <i>Taxa de Consumo de Aço para o espaçamento de 6 metros</i>	50
5.1.9 <i>Taxa de Consumo de Aço para o espaçamento de 7,5 metros</i>	53
5.1.10 <i>Taxa de Consumo de Aço para o espaçamento de 9 metros</i>	56
5.2 MELHORES MODELOS CONSIDERANDO A MENOR TAXA DE AÇO.....	58
6 CONSIDERAÇÕES E SUGESTÕES.....	61
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
REFERÊNCIAS	64
ANEXO.....	68
ANEXO 01 – Tabelas de Perfis Formados a Frio (CARVALHO et al., 2014)	68
APÊNDICES.....	71
APÊNDICE 01 – Solicitações de Cargas (AUTORA, 2018)	71
APÊNDICE 02 – APDL do modelo BP-16-6 – Perfil U	75
APÊNDICE 03 – Tutorial do Módulo de Otimização do Ansys (AUTORA, 2018)	77

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de estratégias de análise tem sido buscado continuamente com o objetivo de reduzir custos, bem como simplificar os cálculos, garantindo a estabilidade e a resistência das estruturas.

Dessa forma, avanços na área da informática têm motivado o emprego de metodologias e formulações mais precisas que evitam simplificações no processo de análise. O Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizado como base para realização desse trabalho, constitui uma dessas formas, representando a interação entre a análise e o dimensionamento de projetos estruturais, processo esse denominado de Análise Avançada (CHEN; KIM, 1997; CHAN; CHUI, 2000; MACHADO, 2005).

Assim, programas com módulos de otimização utilizam-se de técnicas matemáticas, com base no método dos Elementos Finitos, transformando o ciclo de projeto manual em um processo interativo computadorizado. Tratam-se de técnicas que se prestam à minimização de uma única função (a função objetivo) sujeita a restrições.

Nesse trabalho, no intuito de avaliar o desempenho de algumas soluções estruturais para cobertura de galpões industriais, optou-se pela otimização do volume de aço empregado para algumas configurações de treliças considerando diferentes seções transversais de perfis formados a frio disponíveis no mercado. Para a sua realização, o Método de Primeira Ordem do módulo de otimização do Ansys (ANSYS (2010)), foi utilizado. Trata-se de um método muito intenso computacionalmente, uma vez que se utiliza da informação da derivada durante as análises, considerando a correlação entre o gradiente das variáveis dependentes e as variáveis de projeto.

1.1 JUSTIFICATIVA

No tocante à análise estrutural, metodologias de cálculo e hipóteses adotadas na concepção do modelo estrutural são utilizadas com vistas a uma relação custo/benefício que seja sustentável.

Ocorre que muitas estruturas analisadas, devido ao seu tamanho ou complexidade, utilizam extensas rotinas de cálculo, principalmente quando se objetiva encontrar um arranjo ótimo conforme parâmetros e limites preestabelecidos. Daí a opção pelo programa de Elementos Finitos Ansys, já que esses resultados são de difícil obtenção sem a ajuda de recursos computacionais.

O trabalho em questão representa a continuidade dos trabalhos de Chaves (2007) e Nogueira (2009) empregando-se novas ferramentas (sistema de suporte à decisão) e novas variáveis, com o intuito de otimizar coberturas de galpões compostos por perfis formados a frio.

1.2 OBJETIVO

Esse trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho de algumas soluções estruturais utilizadas em coberturas de galpões industriais.

Como objetivo específico, verificar-se-á a viabilidade econômica ao se empregar diversos tipos de treliças para compor a cobertura de galpões, a saber: treliças trapezoidais, de banzos paralelos, triangulares e arqueadas, otimizando o quantitativo de material empregado para diferentes tipos de perfis e arranjos geométricos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Tem-se esse primeiro capítulo introdutório.

No segundo capítulo será apresentado um referencial teórico, contendo os seguintes temas: definição do método dos elementos finitos e de análise estrutural; os métodos de otimização de estruturas e sua aplicabilidade a partir do programa Ansys; conceitos sobre projeto de galpões de uso geral.

No terceiro capítulo serão mostrados os parâmetros para o desenvolvimento do estudo em questão que propõe a avaliação do desempenho de estruturas treliçadas para cobertura de galpões compostas por perfis formados a frio. Nesse estudo considerou-se a variação da tipologia dessas treliças, dos perfis empregados, do vão livre e do espaçamento entre elas.

No quarto capítulo a análise e o dimensionamento dos modelos são definidos por meio dos parâmetros adotados. Serão apresentadas as estratégias de análise estrutural, as solicitações, as premissas e as tabelas de cálculo.

No quinto capítulo serão apresentados os resultados obtidos e uma discussão sobre os mesmos, tendo como base principal as taxas de consumo de aço de 180 modelos analisados no estudo paramétrico.

No sexto capítulo serão apresentadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros. As referências utilizadas, um anexo e três apêndices estarão a seguir.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ANÁLISE ESTRUTURAL

O projeto estrutural, ou seja, a análise estrutural de uma edificação é responsável pelo grau de desempenho da estrutura. O objetivo da análise estrutural é determinar os efeitos das ações na estrutura, com a finalidade de efetuar verificações de estados limites últimos e de utilização. A análise estrutural permite estabelecer as distribuições de esforços internos, tensões, deformações e deslocamentos, em uma parte ou em toda a estrutura (ABNT, 2014).

Segundo a norma NBR 8800 (ABNT, 2008) a análise estrutural deve ser realizada com um modelo realista, que permita representar a resposta da estrutura e dos elementos, levando-se em conta as deformações causadas por todos os esforços solicitantes relevantes.

Conforme Carvalho et al. (2014) a determinação da resposta do comportamento real de uma estrutura refere-se à possibilidade de se verificar a sua capacidade de carga, a deformabilidade e os modos de falha.

Assim, a análise de estruturas é uma aplicação comum do método dos elementos finitos. As estruturas reticuladas, analisadas por esse método, são constituídas por elementos que possuem comprimentos maiores em relação a suas dimensões transversais (GERE; WEAVER, 1987).

Vaz (2009) ressalta que a análise de estruturas reticuladas sistematizou o método clássico dos deslocamentos e unificou a metodologia para a análise de diferentes tipos de estruturas, vigas, treliças planas, treliças espaciais, pórticos planos, grelhas e pórticos espaciais. Além disso, sua aplicação pode ser estendida à análise estática de estruturas com não linearidades física e geométrica e à análise dinâmica de estruturas, saindo da esfera de análise de estruturas para outras áreas de conhecimento.

O tipo de análise estrutural pode ser classificado de acordo com o comportamento do material e dos efeitos dos deslocamentos da estrutura: análise global elástica (diagrama tensão-deformação elástico-linear) ou análise global plástica (diagrama tensão-deformação rígido-plástico, elastoplástico perfeito ou elastoplástico não-linear). Esse segundo tipo de análise é normalmente designado análise não-linear física.

Quanto aos efeitos dos deslocamentos da estrutura, esses podem ser verificados por meio de análise elástica linear (de primeira ordem) ou por meio da análise elástica não-linear (de segunda ordem).

Carvalho et al. (2014) ressaltou que a análise elástica linear ou de primeira ordem possui três conjuntos de equações que devem ser satisfeitos:

- Equações de Equilíbrio que relacionam as forças internas e externas atuantes;
- Equações de Compatibilidade que relacionam os deslocamentos com as deformações;
- Equações Constitutivas que relacionam as tensões com as deformações.

A análise de segunda ordem é necessária quando acontece uma interação entre as ações verticais e os deslocamentos causados pelas ações horizontais, acentuando esses deslocamentos.

Assim, no decorrer desse trabalho, serão realizadas análises elásticas e de primeira ordem com o objetivo de se verificar o desempenho de soluções estruturais de diferentes seções e tipologias e comparar o desempenho das mesmas buscando-se uma relação ótima com o auxílio do módulo de otimização do programa Ansys.

2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Impulsionado pelo desenvolvimento tecnológico e utilização constante de computadores, o Método de Elementos Finitos (MEF) desenvolveu-se a partir do método dos deslocamentos de análise estrutural de estruturas reticuladas.

Trata-se de uma eficiente ferramenta que tem o intuito de aproximar as soluções das equações diferenciais da mecânica deformável por sistemas discretos.

O MEF particiona a estrutura em subdomínios mais simples, de modo que as equações diferenciais possam ser substituídas, sem grandes prejuízos na qualidade dos resultados, por sistemas de equações que descrevem o comportamento estrutural do conjunto discretizado (ANTUNES, 2014).

O MEF estabelece uma analogia direta entre o sistema físico real e o modelo, sendo, seguramente, o processo de discretização de meios contínuos mais utilizado em aplicações de soluções de fenômenos físicos (SELKE et al., 2002).

Souza (2013) destacou como vantagem do MEF a amplitude de possibilidades de utilização do método, uma vez que os elementos finitos se adaptam à geometria, e como desvantagem apontou o alto custo computacional, haja vista a geração de um elevado número de nós, levando a sistemas com muitas variáveis, demandando um tempo considerável de processamento.

Assim, o MEF consiste em utilizar como parâmetros as variáveis nodais de um número finito de pontos previamente escolhidos, denominados nós. O domínio de integração é subdividido em uma série de regiões ou elementos finitos, interconectadas entre si. Para cada elemento se estabelece um comportamento local aproximado, de tal forma que as incógnitas do problema em qualquer ponto podem ser definidas em função das mesmas incógnitas nos pontos nodais. Em seguida, minimizando o funcional do problema, obtido das somas das contribuições de cada elemento, chega-se a um sistema total de equações, cuja solução permite o conhecimento dos valores das incógnitas nos nós. Finalmente, a partir desses valores, outros resultados intermediários podem ser calculados.

2.3 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Com o desenvolvimento dos computadores e dos métodos numéricos, como o método dos elementos finitos, a otimização passou a ser uma área de grande interesse em projeto. Dessa forma, teve início o avanço e a implementação de algoritmos de solução de problemas, inclusive problemas não lineares bastante utilizados até hoje (KAFTKA; GURDAL 1992).

O conceito de otimização estrutural foi, inicialmente, estudado por Maxwell em 1872 e, posteriormente, por Michell em 1904. A partir do critério de máxima rigidez e

menor peso, foi calculado o campo de tensões principais de um determinado elemento sujeito a vinculações. Objetivava-se a redução do peso da estrutura por meio da adição de elementos de barra alinhados com as direções das tensões principais da estrutura (KAFTKA; GURDAL 1992).

Holtz (2005) afirmou que problemas de otimização são problemas de maximização ou minimização de função de uma ou mais variáveis num determinado domínio, sendo que, geralmente, existe um conjunto de restrições nas variáveis. Citou, ainda, que algoritmos usados para a solução de um problema de otimização podem ser, basicamente, determinísticos ou probabilísticos.

Kaftka e Gurdal (1992) afirmaram que a otimização pode ser definida como sendo a busca do melhor resultado para uma dada operação, mediante algumas restrições impostas.

Bastos (2004) citou os conceitos e definições utilizados na literatura que dão suporte ao processo de otimização:

- Espaço de busca conjunto: espaço ou região que compreende as soluções possíveis ou viáveis sobre as variáveis do projeto do problema a ser otimizado, sendo delimitado pelas funções de restrição.
- Variáveis de projeto: são aquelas que se alteram durante o processo de otimização, podendo ser contínuas (reais), inteiras ou discretas.
- Restrições ou variáveis de estado: funções de igualdade ou desigualdade sobre as variáveis de projeto que descrevem situações de projeto consideradas não desejáveis.
- Função objetivo: função de uma ou mais variáveis de projeto que se quer otimizar, minimizando-a ou maximizando-a.
- Ponto ótimo: ponto formado pelas variáveis de projeto que extremizam a função objetivo e satisfazem às restrições.
- Valor ótimo: valor da função objetivo no ponto ótimo.

De acordo com Olivieri (2004) e Bastos (2004) os problemas de otimização abordados pelos métodos clássicos podem ser assim classificados:

- Programação Linear: quando a função objetivo e as restrições são funções lineares das variáveis de projeto.

- Programação Não-Linear: quando as variáveis são dependentes ou a função objetivo representa uma função não-linear das variáveis de projeto.

Bastos (2004) ressaltou que métodos determinísticos são os métodos de otimização baseados nos algoritmos que geram uma sequência de possíveis soluções em que a função objetivo e as restrições são dadas como funções matemáticas e relações funcionais. Esse tipo de problema pode ser representado matematicamente conforme esquematizado na Figura 2.1:

Figura 2.1: Formulação de um problema de otimização

Maximizar / Minimizar: $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Satisfazendo:

$g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \leq, =, \geq \} b_1$

⋮

$g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \leq, =, \geq \} b_m$

em que:

x_1, x_2, \dots, x_n - variáveis de projeto

$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ - função objetivo

g_1, g_2, \dots, g_m - restrições

Fonte: BASTOS (2004)

Croce et al. (2004) utilizaram-se dessa metodologia para verificar a otimização de massa em estruturas metálicas treliçadas planas. Suas variáveis de estado (restrições) foram tensão e deslocamento. As variáveis de projeto foram altura, número de nós e as áreas das seções transversais.

Chaves (2007) avaliou comparativamente o desempenho de alguns sistemas estruturais usuais para galpões industriais por meio de um estudo paramétrico considerando pórticos transversais de diversas tipologias submetidos a carregamentos usuais, com diferentes vãos livres com base em simulações computacionais, objetivando verificar o modelo mais econômico.

Corso e Gomes (2008) otimizaram pesos de estruturas com restrição de confiabilidade. As variáveis de projeto eram as áreas das seções transversais. Guerra (2008) estudou a otimização estrutural da massa de treliças planas e espaciais. Suas variáveis de projeto também foram as áreas das seções transversais.

Nogueira (2009) avaliou o desempenho de alguns sistemas estruturais compostos por vigas de cobertura em perfis formados a frio comumente empregados em galpões de uso geral utilizando o *software* mCalc2008, objetivando o melhor aproveitamento dos mesmos.

Souza (2009) avaliou a otimização estrutural para treliças planas e espaciais. As variáveis de estado ou restrições foram a tensão e o deslocamento em um método que combinava técnicas de Programação Linear Sequencial (SLP) buscando o melhor resultado no espaço contínuo e Algoritmos Genéticos (AG) que, por sua vez, faz uma busca no espaço discreto.

Rodrigues (2018) utilizou um elemento de barra em conjunto com um elemento de interface para analisar vigas mistas de aço e concreto não lineares com interação parcial. Para tal, implementou um algoritmo com o objetivo de definir as dimensões do perfil de aço do tipo I simétrico ou não simétrico, das dimensões da laje de concreto retangular e da quantidade de armadura buscando a otimização da estrutura, por meio da minimização da função objetivo definida como sendo a quantidade e o custo desses materiais.

Sommer (2010) buscou uma correlação entre a análise estrutural e as ferramentas de otimização, por meio de algoritmos genéticos. Souza (2012) considerou a tensão nas barras como variável de estado ou restrições em sua metodologia de otimização de elementos utilizando a programação linear sequencial. As variáveis de projeto foram definidas como sendo as áreas das seções transversais.

2.3.1 Otimização de estruturas no software Ansys

O Ansys é um *software* de elementos finitos que pode ser utilizado nas mais diversas classes de problemas. Sua capacidade inclui habilidades para resolver variados tipos de análises estruturais. Os primeiros parâmetros desconhecidos (graus de liberdade nodais) calculados em uma análise de estruturas são os deslocamentos

e as rotações. Outras quantidades como deformações, tensões e força de reação, são derivadas dos deslocamentos nodais.

Para análise de uma estrutura, o Ansys divide o procedimento em três etapas: “*Preprocessor*”, onde é feita a modelagem da estrutura, a definição do tipo de elemento estrutural (treliças, vigas, casca, sólido etc), das constantes e seções do elemento bem como do tipo de material relacionado. A geometria pode ser criada a partir das coordenadas dos nós e das barras; “*Solution*”, onde se definem os tipos e as intensidades de forças atuantes na estrutura e suas condições de apoio, bem como o tipo de análise escolhido e se soluciona o problema; e, “*Postprocessor*”, em que é feita a apresentação dos resultados da análise anterior. Terminadas as análises estáticas ou dinâmicas é permitida a utilização do módulo de otimização, seus métodos e ferramentas.

2.3.1.1 Módulo de Otimização (OPT) - Ansys

O módulo de otimização (OPT) do Ansys tem por objetivo determinar o projeto ótimo. Para tal, três parâmetros são empregados: *design variables* - DV's (variáveis de projeto); *state variables* - SV's (variáveis de estado) e *objective function* - OF (função objetivo).

As variáveis de projeto (DV's) são quantidades independentes dentro das faixas de restrições especificadas durante o processo de análise de otimização para alcançarem o projeto ótimo. Observa-se que os valores de DV's devem ser maiores que zero, bem como podem ser totalizados em 60, no máximo. Tratam-se de restrições laterais que definem o espaço possível de projeto.

As variáveis de estado (SV's) são representadas pelas restrições de projeto. São variáveis dependentes e podem ter limites máximos e mínimos. Tensões e deslocamentos são exemplos de SV's.

Como exemplos de função objetivo (OF) tem-se peso, custo, altura e volume. Tal função é sempre minimizada no ambiente de otimização do Ansys.

Além do projeto ótimo, que tenta minimizar a função objetivo enquanto for viável limitar-se às restrições de projeto, outros tipos de projetos devem ser citados: o possível (viável) onde as configurações satisfazem todas as restrições e o projeto impossível (inviável) quando uma ou mais restrições são violadas.

Para se otimizar uma estrutura faz-se necessária a criação de parâmetros para o modelo de projeto. Um arquivo de análise deve ser a base para o processo de otimização. Utilizando o banco de dados de otimização, um “loop” é iniciado. A convergência é alcançada quando um projeto viável for atingido e pode terminar antes que se atinjam os objetivos, caso se chegue no limite dos “loops”. Caso os critérios de convergência não sejam satisfeitos, um novo projeto é criado a partir do último “melhor projeto” por modificação de parâmetros.

2.3.1.2- Métodos e Ferramentas de Otimização

O Módulo de Otimização do Ansys é dividido em métodos que, por meio de um processo interativo computadorizado, objetiva a minimização de uma única função (a função objetivo) sujeita a restrições (MARINHO, 2004). Os métodos são:

- Método de aproximação por subproblemas: representa um processo avançado, de ordem zero, que usa aproximações (curva de ajuste) para todas as variáveis dependentes (variáveis de estado e função objetivo), podendo ser aplicado de forma eficiente na maioria dos problemas de engenharia;
- Método de primeira ordem, que se baseia em sensibilidades de variáveis e é mais adequado para problemas que exigem alta precisão, pois usa a informação da derivada, ou seja, o gradiente das variáveis dependentes considera as variáveis de projeto. Esse método é recomendado para problemas em que as variáveis dependentes variam amplamente em uma extensa faixa de projeto. Tal método é computacionalmente intenso.

Para os métodos de aproximação por subproblema e de primeira ordem, o programa executa uma série de ciclos de análise-avaliação-modificação. Ou seja, uma análise do projeto inicial é realizada, os resultados são avaliados de acordo com critérios de projeto especificados e as variáveis são modificadas conforme necessário. O processo é repetido até que todos os critérios especificados sejam atendidos.

Além das duas técnicas de otimização, o Ansys oferece um conjunto de ferramentas estratégicas que podem ser usadas para melhorar a eficiência do

processo. Por exemplo, uma série de iterações aleatórias podem ser realizadas. Os dados iniciais dos cálculos podem servir como pontos de partida para alimentar os métodos de otimização descritos. Com base nos métodos de otimização de projeto, os seguintes tópicos/ferramentas estão disponíveis no programa:

- Única Iteração/Repetição: produz uma solução de análise de elementos finitos de cada vez;
- Geração de projeto aleatória/randômica: são executadas repetições/iterações múltiplas com valores aleatórios das variáveis de projeto, a cada iteração;
- Geração de varredura: a partir de um conjunto de projeto de referência, essa ferramenta gera várias sucessões de conjuntos de projeto.
- Avaliação fatorial: gera um conjunto de projeto com todas as combinações extremas de valores das variáveis de projeto. Como exemplo, pode-se citar um projeto de experiência que usa uma análise completa fatorial e fracionária.
- Avaliação de gradiente: conjunto de projeto de referência especificado e das variáveis de estado com respeito as variáveis de projeto. Com essa ferramenta pode-se verificar as sensibilidades dos projetos locais comparando as alterações de valores em relação ao projeto inicial.
- Ferramenta de projeto implementada pelo usuário: rotina externa, sem utilização da lógica do Ansys.

2.3.1.2.1-Método de Primeira Ordem

O método aproximado ou de primeira ordem consiste em linearizar a equação do estado limite do problema em um ponto adequado, de forma a obter uma aproximação. O ponto mais adequado para a linearização é o ponto mais provável de falha ou ponto de projeto em torno do qual está o melhor conteúdo de probabilidades da função densidade de probabilidade conjunta, no domínio da falha (BECK, 1999). Optou-se pela descrição desse método em função de sua utilização nas análises desse trabalho.

Assim como o método de aproximação de subproblemas, o método de primeira ordem converte o problema em um único sem restrições, adicionando funções de penalidade à função objetivo. No entanto, ao contrário do método de aproximação por subproblema, a representação real dos elementos finitos é minimizada e não uma aproximação.

O método de primeira ordem usa gradientes das variáveis dependentes em relação às variáveis de projeto. Para cada iteração, cálculos de gradiente são realizados para determinar uma direção de busca, bem como cria-se uma estratégia para minimizar o problema sem restrições.

Assim, cada iteração é composta por uma série de atividades que incluem direção de busca e cálculos de gradiente. É por isso que uma iteração de otimização para o método de primeira ordem realiza diversos laços de análise.

As iterações de primeira ordem acontecem até que a convergência seja alcançada ou a terminação ocorra, conforme se observa na Figura 2.2, que traz o fluxo dessa análise. O problema é dito convergido se, ao comparar o conjunto de variáveis de iteração atual com os melhores conjuntos anteriores, uma das seguintes condições for satisfeita:

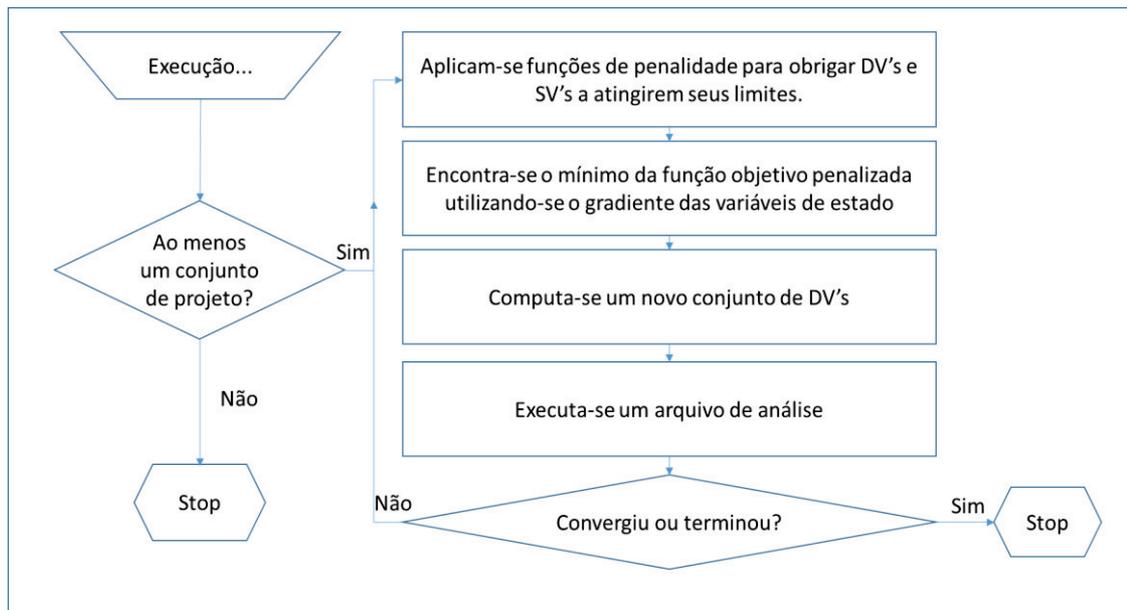
- A mudança na função objetivo do melhor design para o projeto atual for menor do que a tolerância dessa mesma função;
- A mudança na função objetivo do projeto anterior para o projeto atual for menor do que a tolerância da mesma.

Comparado com o método de aproximação de subproblemas, o método de primeira ordem é mais exigente computacionalmente e mais preciso. No entanto, uma alta precisão nem sempre garante a melhor solução.

O método de primeira ordem é mais provável para se atingir um mínimo local. Isso ocorre porque o primeiro pedido começa a partir de um ponto existente no espaço de *design* e funciona como mínimo. Se o ponto de partida for muito próximo de um mínimo local, esse ponto pode ser encontrado, ao invés do mínimo global.

Uma tolerância da função objetivo muito limitada pode fazer com que um alto número de iterações seja executado. Como esse método resolve a representação real dos elementos finitos (não uma aproximação), ele procura encontrar uma solução exata com base na tolerância dada.

Figura 2.2: Fluxo do Método de Primeira Ordem



Fonte: MARINHO (2004)

2.4 CONCEPÇÃO DE GALPÕES INDUSTRIAIS ESTRUTURADOS EM AÇO

Segundo Santos (1977), galpões industriais são edifícios projetados adequadamente para a instalação de atividades do tipo industrial como: fábricas, oficinas, depósitos etc. Vários parâmetros devem ser considerados no projeto de galpões: movimentação de cargas (possibilidade de instalação de ponte rolante, bem como utilização de outros equipamentos de transporte de carga), iluminação (natural ou artificial), ventilação (aberturas laterais e lanternim), melhorias possíveis nas condições de trabalho visando a segurança, a higiene e o conforto no local. Em função disso, o estudo detalhado dos edifícios industriais mostra-se imprescindível, posto que sua disposição estrutural e arquitetônica é fundamental para o desempenho das atividades internas.

Segundo o Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas (Brasil, 1986), os sistemas estruturais dos galpões industriais são escolhidos em função da finalidade a que se destinam, das suas dimensões principais e do tipo do terreno. Para facilitar o entendimento, os galpões podem ser agrupados quanto à estrutura principal

(pórticos simples, múltiplos) e quanto à cobertura (plana, inclinada, dentada ou arqueada).

Pinho (2005) apresentou dois tipos básicos de galpões em pórticos, definidos em função do tipo de estrutura transversal: pórticos de alma cheia (onde se utilizam perfis laminados ou soldados) ou pórticos treliçados (emprego de perfis formados a frio formando reticulados em treliça).

Na fabricação dos galpões em estrutura de aço podem ser utilizados perfis laminados, soldados e/ou formados a frio, podendo ser fabricados parcialmente no local da obra ou no pátio de uma empresa especializada e, posteriormente, levados para o local onde serão montados. Geralmente o processo de fabricação é industrializado.

A modulação arquitetônica é uma técnica de elaboração de projetos muito adequada à construção metálica, visto que permite a obtenção de diversos elementos estruturais com as mesmas características geométricas permitindo a padronização da montagem, o que garante rapidez, segurança e economia no processo de fabricação. Para galpões industriais, a modulação pode ser aplicada desde o espaçamento entre pórticos planos principais até detalhes construtivos menores (CHAVES, 2007).

Em função do reduzido peso próprio de uma estrutura de aço, frequentemente se verifica uma inversão de sinais nas solicitações que ocorrem nos elementos estruturais. Por exemplo, quando a cobertura é treliçada, o banzo inferior, normalmente tracionado, pode ficar comprimido e daí sujeito a fenômenos de instabilidade (CHAVES, 2007).

Nesse trabalho será realizada a avaliação do comportamento estrutural de coberturas treliçadas de galpões industriais compostos por perfis leves ou formados a frio (sem ponte rolante) de um único vão, podendo essas serem em duas águas ou arqueadas.

2.4.1 Considerações fundamentais na concepção de um Galpão Industrial

A escolha do tipo de pórtico transversal (em alma cheia ou treliçado), associado a outros parâmetros como a distância entre pórticos, define o arranjo estrutural de um

galpão industrial. Esse arranjo deve ser ajustado para se obter a estrutura que melhor atenda a um conjunto de aspectos do caso em análise, sem perder de vista a importância de se conseguir uma solução segura e econômica, levando-se em consideração o peso total da estrutura. A distância entre pórticos transversais é geralmente condicionada pela finalidade do galpão. Não havendo restrições, escolhe-se o espaçamento que conduz à maior economia no custo global de terças e vigas de cobertura. Espaçamentos menores entre pórticos transversais favorecem os elementos secundários de cobertura e tapamento, reduzem as cargas em cada pórtico, mas aumentam o número de pórticos e, conseqüentemente, o número de bases e fundações, ao passo que espaçamentos maiores aumentam os elementos secundários da cobertura, mas, por outro lado, reduzem o número de pórticos e de fundações. Quando o espaçamento entre as colunas é muito grande, torna-se mais econômico o uso de vigas de cobertura intermediárias, apoiadas em vigas longitudinais nos beirais e, às vezes, também na cumeeira.

Segundo Chaves (2007), o banzo superior da treliça ou a mesa superior da viga de alma cheia que compõem a tesoura devem ser preferencialmente paralelos à cobertura. A inclinação da cobertura é função do material empregado para o cobrimento ou do efeito estético que se deseja obter, respeitada a declividade mínima permitida para o material utilizado.

A análise do arranjo estrutural deve ser feita considerando-se a interação entre os aspectos construtivos da estrutura como um todo e das fundações: quando as colunas são engastadas na base, as tesouras de cobertura que compõem a estrutura principal (pórticos) podem ser ligadas às mesmas por meio de ligações flexíveis, ou seja, não transmitindo momentos fletores; portanto, se as colunas forem articuladas nas bases, as tesouras de cobertura deverão ser ligadas nas extremidades superiores das mesmas por meio de ligações rígidas, a fim de que os pórticos transversais formados por esses elementos não fiquem hipostáticos (SANTOS, 1977). Pórticos rotulados nas bases levam à obtenção de fundações mais econômicas se comparados ao caso dos pórticos engastados na base, favorecendo a implantação dessas estruturas em terrenos de baixa capacidade de suporte. Por outro lado, a adoção de rótulas nas bases faz com que os esforços na estrutura sejam de maior magnitude do que no caso de bases engastadas e que a estrutura apresente maior deslocamento horizontal. Quando o terreno de fundação apresenta boa capacidade de suporte, o

melhor sistema estático consiste no pórtico engastado nas bases, que permite uma melhor redistribuição de esforços na estrutura e um dimensionamento mais econômico, além de apresentar maior facilidade de montagem (NOGUEIRA, 2009).

Conforme citado por Chaves (2007), o reduzido grau de vinculação entre elementos estruturais nas estruturas metálicas normalmente leva ao surgimento de estruturas hipostáticas fora do plano da estrutura principal, sendo necessário garantir a estabilidade longitudinal, geralmente com sistemas de contraventamento, visando a eliminação dessa hipostaticidade.

3 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

O estudo paramétrico de galpões industriais leves pode abranger a variação de diversas características que influenciam a resposta da estrutura, tais como tipologia e vão livre do pórtico transversal; distância entre esses pórticos; inclinação da cobertura; altura da coluna; tipo de vinculação; relação entre altura no meio do vão (flecha) e vão livre do pórtico transversal; e, variação da magnitude das cargas (NOGUEIRA, 2009).

Todos os parâmetros citados influenciam na taxa de consumo de aço e na resposta estrutural, resultando em diversas análises de diferentes arranjos.

Ressalta-se que existem diversas tipologias para a composição de coberturas de galpões de uso geral. As alternativas escolhidas para análise neste trabalho são comumente as mais encontradas no Brasil.

3.1 CRITÉRIOS DE PARAMETRIZAÇÃO

Pretende-se, com este trabalho, avaliar a solução de diferentes tipologias de coberturas treliçadas para galpões de uso geral. Tratam-se de estruturas compostas por perfis formados a frio e que possuem espaçamentos característicos, bem como larguras diferenciadas.

Esse estudo paramétrico envolveu as seguintes variáveis:

- Variação da tipologia da treliça;
- Distância entre as treliças de cobertura;
- Vão livre ou largura transversal dessas estruturas;
- Perfis empregados nas estruturas.

Optou-se pela verificação das treliças empregando três seções de perfis formados a frio (PFF): Perfil U, Perfil U enrijecido (U_e) e Perfil Cantoneira, e quatro diferentes tipologias estruturais:

- BP - Treliza de banzos paralelos;
- TP - Treliza trapezoidal;
- TT- Treliza triangular;
- TA - Treliza em arco.

Foram considerados os seguintes vãos livres para as treliças: 16, 20, 24, 28 e 32 metros. E, para a distância entre pórticos transversais, consideraram-se os valores de 6 (muito comum no Brasil), 7,5 e 9 metros (justificados pela tendência atual de se melhorar a relação custo-benefício). Na Tabela 3.1 apresentam-se os modelos analisados, de acordo com a seguinte simbologia:

XX_YY_Z, sendo:

XX – tipologia estrutural;

YY – vão da treliça;

Z – distância entre as treliças.

Tabela 3.1: Modelos analisados

Tipologia BP	Tipologia TP	Tipologia TT	Tipologia TA
BP_16_6	TP_16_6	TT_16_6	TA_16_6
BP_20_6	TP_20_6	TT_20_6	TA_20_6
BP_24_6	TP_24_6	TT_24_6	TA_24_6
BP_28_6	TP_28_6	TT_28_6	TA_28_6
BP_32_6	TP_32_6	TT_32_6	TA_32_6
BP_16_7,5	TP_16_7,5	TT_16_7,5	TA_16_7,5
BP_20_7,5	TP_20_7,5	TT_20_7,5	TA_20_7,5
BP_24_7,5	TP_24_7,5	TT_24_7,5	TA_24_7,5
BP_28_7,5	TP_28_7,5	TT_28_7,5	TA_28_7,5
BP_32_7,5	TP_32_7,5	TT_32_7,5	TA_32_7,5
BP_16_9	TP_16_9	TT_16_9	TA_16_9
BP_20_9	TP_20_9	TT_20_9	TA_20_9
BP_24_9	TP_24_9	TT_24_9	TA_24_9
BP_28_9	TP_28_9	TT_28_9	TA_28_9
BP_32_9	TP_32_9	TT_32_9	TA_32_9

Para todos os modelos analisou-se o emprego dos PFF:

U, U_e e Cantoneira

Fonte: AUTORA (2018)

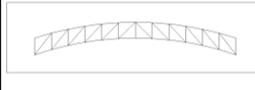
Para a definição das características geométricas dos modelos estruturais para cada tipologia de galpão, tomou-se como referência uma inclinação de 10% para a cobertura (usual no caso de telhas metálicas), exceto para as treliças triangulares (TT) cuja inclinação de referência foi de 20%, tendo em vista que a inclinação de 10% incorreria na possibilidade de surgir esforços muito elevados nas extremidades da viga de cobertura.

Adotou-se o comprimento total do galpão de 60 metros para espaçamento entre pórticos transversais de 6 e 7,5 metros; e 63 metros para espaçamento entre pórticos transversais de 9 metros.

Um outro fator importante considerado nas análises de treliças de cobertura de galpões foi a força do vento, pois tratam-se de estruturas com pé direito elevado. Para cálculo das forças de vento determinou-se a altura das colunas da estrutura como sendo de 6 metros. Para desenvolvimento desse trabalho aplicou-se a velocidade básica do vento igual a 35m/s, que abrange a região do estudo.

A Tabela 3.2 resume os critérios de parametrização adotados para concepção dos modelos a serem analisados:

Tabela 3.2: Critérios de parametrização adotados

Tipologias de Treliças		TT, TA, BP e TP;	
TT - Treliça Triangular	TA - Treliça em arco	BP - Treliça de banzos paralelos	TP - Treliça trapezoidal
			
Distância entre pórticos transversais (L)		6, 7,5 e 9 metros;	
Vãos livres		16, 20, 24, 28 e 32 metros;	
Perfis empregados		U, U _e e Cantoneira;	
Inclinação da cobertura		10% para BP, TP e TA; 20% para TT;	
Comprimento do galpão		60 m se L = 6 e 7,5 m; 63 m para L = 9 m;	
Altura das colunas		6 metros;	
Velocidade básica do vento		35m/s.	

Fonte: AUTORA (2018)

Ressalta-se o objetivo do trabalho que se restringe à avaliação do desempenho das diferentes tipologias de treliças de cobertura no que se refere ao melhor arranjo (arranjo ótimo) considerando os parâmetros adotados.

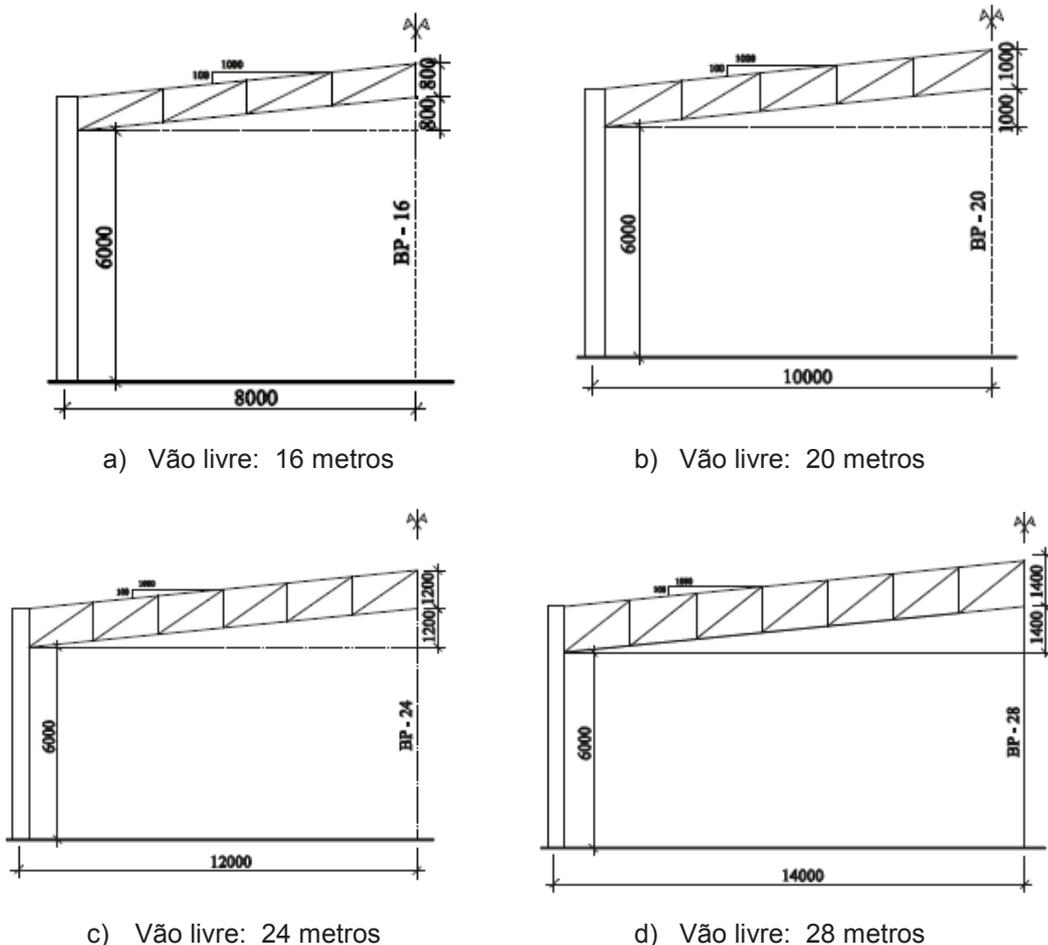
3.2 DEFINIÇÃO DOS MODELOS A PARTIR DAS TIPOLOGIAS ADOTADAS

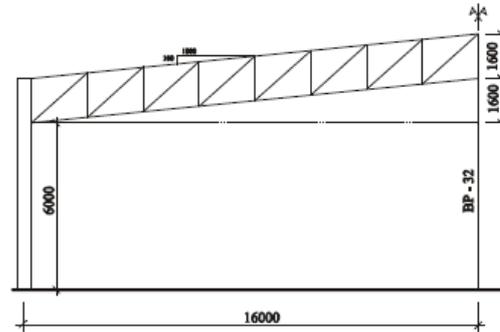
Foram adotados 180 modelos a partir dos critérios de parametrização apresentados na Tabela 3.1. Adotou-se, como critérios de vinculação, rótulas na ligação das tesouras de cobertura com a coluna. Os elementos das diagonais e montantes também foram rotulados nas suas extremidades.

3.2.1 Tipologia Treliça de Banzos Paralelos – BP

Na Figura 3.1 mostra-se a variação dos vãos (largura transversal) para as treliças de banzos paralelos.

Figura 3.1 - Variação da geometria para as coberturas compostas por treliças de banzos paralelos (BP) – dimensões em mm





e) Vão livre: 32 metros

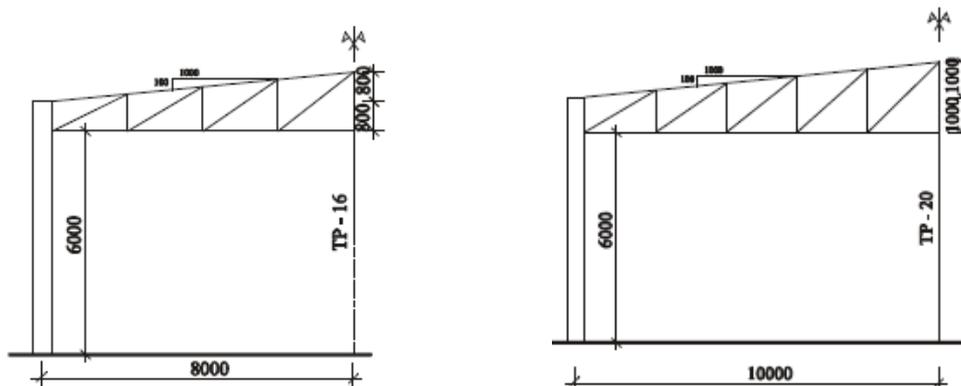
Fonte : NOGUEIRA (2009)

Nesses modelos admite-se que a distância entre banzos corresponde à metade da altura no meio do vão, ou seja, à metade da flecha da treliça. A relação para a flecha da viga de cobertura é de $L/10$, mantendo-se a inclinação de 10%, tomada como parâmetro inicial.

3.2.2 Tipologia Treliça de Trapezoidal –TP

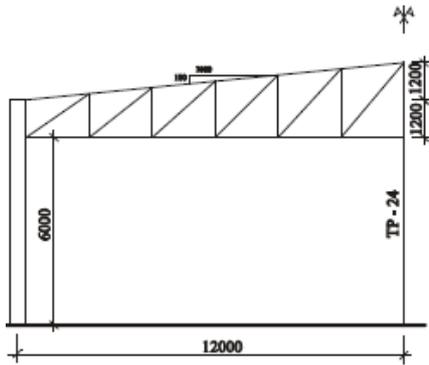
Na Figura 3.2 mostra-se a variação dos vãos (largura transversal) para as treliças trapezoidais. A relação para a flecha da viga de cobertura é de $L/10$, mantendo a inclinação de 10%, tomada como parâmetro inicial.

Figura 3.2: Variação da geometria para as coberturas compostas por treliças trapezoidais (TP) – dimensões em mm

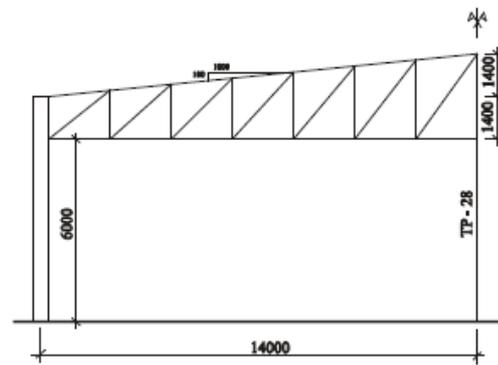


a) Vão livre: 16 metros

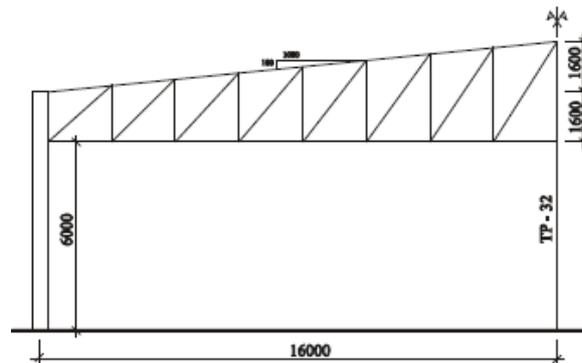
b) Vão livre: 20 metros



c) Vão livre: 24 metros



d) Vão livre: 28 metros



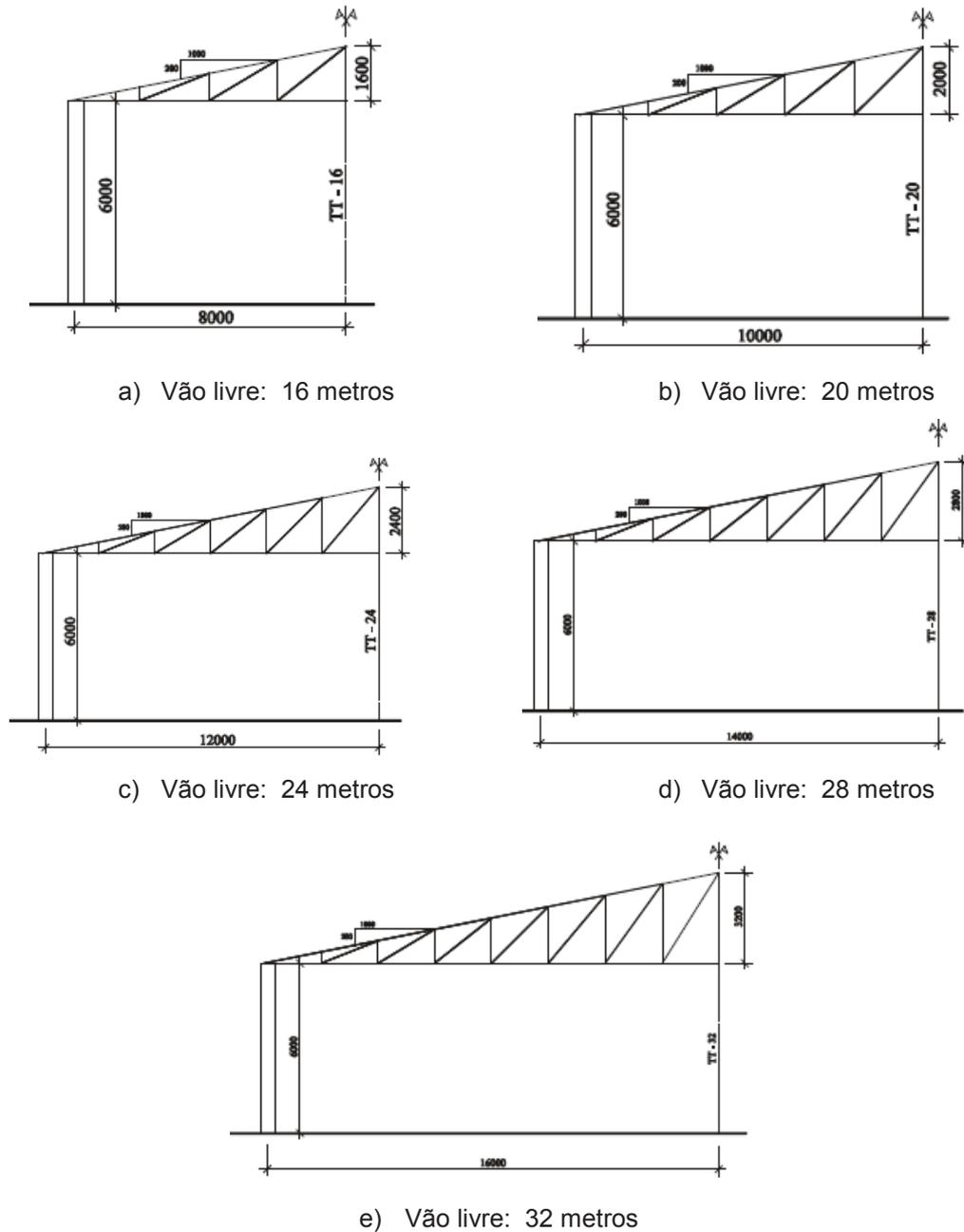
e) Vão livre: 32 metros

Fonte : NOGUEIRA (2009)

3.2.3 Tipologia Treliça Triangular – TT

Na Figura 3.3 mostra-se a variação dos vãos (largura transversal) para as treliças triangulares. Para a tipologia treliça triangular (TT), a relação de $L/10$ é mantida para a flecha do meio do vão, o que proporciona uma inclinação de 20% para a cobertura. A inclinação de 10% para esse caso faz surgir esforços muito elevados nas extremidades da viga de cobertura.

Figura 3.3: Variação da geometria para as coberturas compostas por treliças triangulares (TT) – dimensões em mm



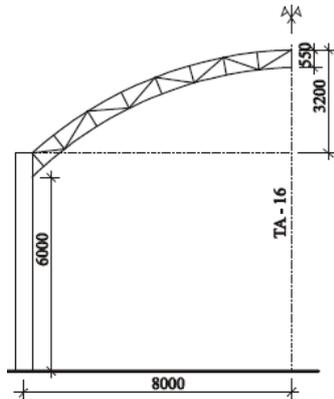
Fonte : NOGUEIRA (2009)

3.2.4 Tipologia Treliça Arqueada -TA

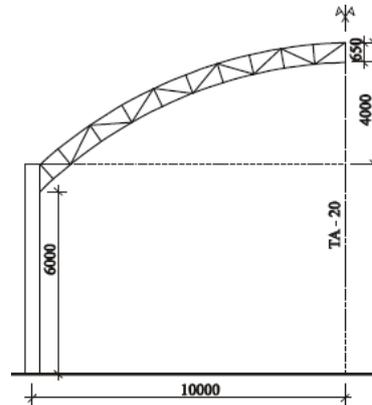
Na Figura 3.4 mostra-se a variação dos vãos (largura transversal) para a treliça em arco. Sales et al. (1994) sugerem que se adote, para arcos metálicos, a relação

entre a altura dos banzos e o vão livre entre colunas em torno de $L/40$ a $L/30$. Neste trabalho adotou-se o máximo recomendado por eles: $L/30$ para a altura entre banzos.

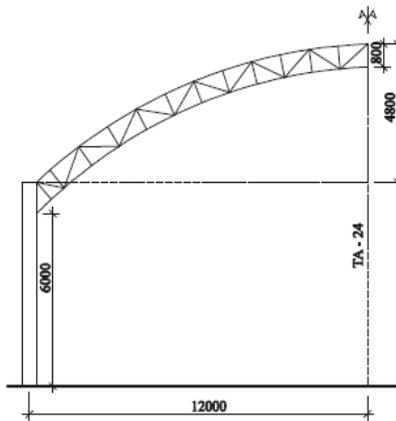
Figura 3.4: Variação da geometria para as coberturas compostas por treliças arqueadas (TA) – dimensões em mm



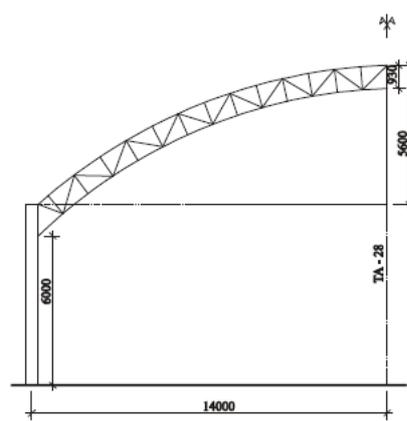
a) Vão livre: 16 metros



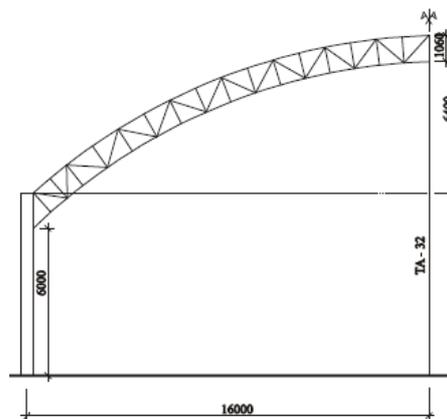
b) Vão livre: 20 metros



c) Vão livre: 24 metros



d) Vão livre: 28 metros



e) Vão livre: 32 metros

Fonte : NOGUEIRA (2009)

4 ANÁLISE ESTRUTURAL

Neste capítulo apresentam-se os principais aspectos da análise e dimensionamento dos modelos que compõem o estudo da avaliação do desempenho das tipologias estruturais para galpões compostos por perfis formados a frio.

Um total de 180 modelos foram analisados, considerando-se as diferentes tipologias e perfis propostos, os espaçamentos entre as treliças de cobertura, os vãos livres das mesmas e as diferentes seções transversais.

4.1 DIMENSIONAMENTO DAS AÇÕES SOLICITANTES

As ações atuantes nos modelos foram determinadas de acordo com as recomendações do item 4.7 da norma NBR 8800 (ABNT, 2008), ações causadas pelo uso e ocupação da edificação no dimensionamento de estruturas de aço. São elas: ações permanentes (peso próprio) e ações variáveis (sobrecarga de cobertura e ação do vento).

As combinações de ações permanentes e variáveis para os estados limites últimos foram determinadas conforme prescrição da norma NBR 14762 (ABNT, 2010). Os estados limites últimos estão relacionados com a segurança da estrutura sujeita às combinações mais desfavoráveis de ações previstas em toda a vida útil, durante a construção ou quando atuar uma ação especial ou excepcional.

Os coeficientes de ponderação e fatores de redução das ações no estado-limite ultimo (ELU) expostos referem-se aos critérios para combinação das ações, considerando a probabilidade de ocorrerem ações simultâneas num mesmo período:

$$\sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi}) + \gamma_{q1} F_{Q1} + \sum_{j=2}^n (\gamma_q \psi_{0j,ef} F_{Qj}) \quad (4.1)$$

Sendo:

- F_G = as ações permanentes;
- F_{Q1} = a ação variável considerada como principal nas combinações normais, ou como principal para a situação transitória nas combinações especiais ou de construção;
- F_{Qj} = demais ações variáveis;
- γ_{gi} = coeficiente de ponderação das ações permanentes;
- γ_{qi} = coeficiente de ponderação das ações variáveis;
- $\psi_{0j,ef}$ = fator de combinação efetivo das demais ações variáveis.

Foram verificadas as combinações de carga para todos os modelos considerando o peso próprio de três tipos de perfis (Perfil U, Perfil U_e, Perfil Cantoneira), a sobrecarga de cobertura e a força do vento a 0 e a 90 graus.

4.1.1 Ações Permanentes (G)

Para galpões industriais leves, as ações permanentes correspondem ao peso próprio dos elementos que compõem a estrutura e dos materiais ligados a ela. Como ações permanentes foram considerados o peso próprio das treliças de cobertura e o peso dos demais elementos, a saber: telhas, terças e elementos secundários de cobertura. Considerou-se uma ação permanente de 0,11kN/m², ou seja, 11,2167 kgf/m², para os demais elementos citados (CARVALHO, 2017).

Na Tabela 4.1 mostram-se os valores das ações permanentes (G) com base nos perfis adotados:

Tabela 4.1: Ações Permanentes (G)

	Perfil U 300x100x8 Área: 37,62cm²	Perfil U_e 300x100x25x4,75 Área: 24,64 cm²	Perfil Cantoneira 200x19 Área: 69,29 cm²
L (m)	Ações Permanentes (kN/m)		
6	-0,95	-0,85	-1,20
7,5	-1,11	-1,02	-1,37
9	-1,28	-1,18	-1,53

Fonte: AUTORA (2018)

As taxas de consumo de aço devido às travessas de fechamento foram ignoradas, pois o tapamento lateral pode ser resolvido com diferentes soluções e não faz parte do escopo deste trabalho.

Ressalta-se que, por se tratar de coberturas treliçadas, não se considera o carregamento distribuído (kN/m), posto que nesse tipo de elemento as cargas concentram-se nos nós. Portanto, ao realizar o lançamento de quaisquer cargas nos modelos, elas devem estar concentradas nos nós.

4.1.2 Ações Variáveis (Q e V)

Para galpões industriais leves, as ações variáveis são representadas pela sobrecarga de cobertura (Q) e pela ação do vento (V), ambas muito relevantes no dimensionamento da estrutura.

4.1.2.1 Sobrecarga de cobertura (Q)

Conforme recomendação do Anexo B da norma NBR 8800 (ABNT, 2008), adotou-se, para todos os modelos, uma sobrecarga mínima de 0,25 kN/m². Os valores da ação variável Q são mostrados na Tabela 4.2:

Tabela 4.2: Ação Variável (Q)

Sobrecarga de Cobertura (Q)	
0,25 (kN/m ²)	
L (m)	SC (kN/m)
6	-1,5
7,5	-1,875
9	-2,25

Fonte: AUTORA (2018)

4.1.2.2 Cargas de Vento (V)

A ação do vento para as treliças de cobertura foi determinada segundo as recomendações da norma NBR 6123 (ABNT, 1988) sendo utilizada a velocidade básica do vento (V_0) igual a 35m/s correspondente à região de Minas Gerais.

A ação do vento foi determinada para o edifício com planta retangular, com cobertura em duas águas e arqueada, conforme modelos apresentados, considerando comprimento longitudinal de todo o galpão de 60 metros para espaçamento entre as treliças de cobertura transversais de 6 a 7,5 metros e, comprimento longitudinal de 63 metros para espaçamento entre as tesouras igual a 9 metros. Foram adotadas as seguintes premissas:

- Fator topográfico (S_1): Terreno plano ou fracamente acidentado;
- Fator de rugosidade do terreno (S_2): terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. Categoria III e Classe C: dimensão maior ou igual a 50 metros.
- Fator Estatístico (S_3): edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação;
- Coeficiente de pressão interna (C_{pi}): 0,30 ou 0.

Na Tabela 4.3, mostra-se o cálculo da velocidade característica do vento (v_k) = $V_0 * S_1 * S_2 * S_3$ e da pressão dinâmica do vento (q_k) = $0,613 * v_k^2$ para todas as tipologias propostas nesse estudo.

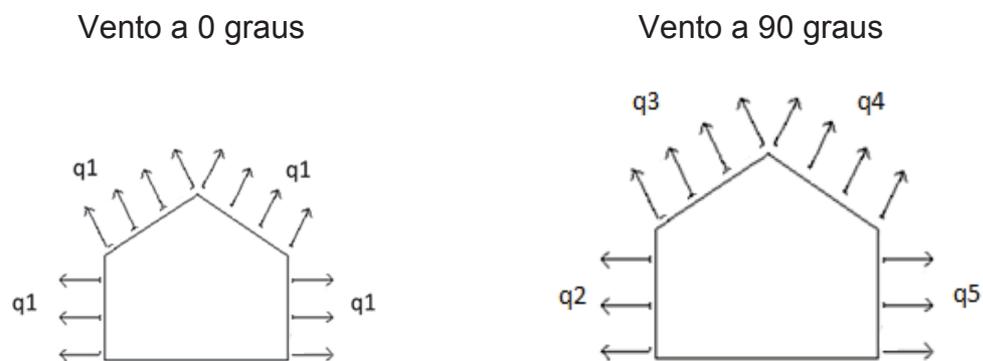
Tabela 4.3: Cálculo da velocidade característica e da pressão dinâmica do vento

Tipologias TT, TP, BP, TA							
Vão livre (m)	Altura (m)	Fatores Topográficos			v_0 (m/s)	v_k (m/s)	q_k (kN/m ²)
		S_1	S_2	S_3			
16	7,6		0,86			30,1	0,555
20	8		0,86			30,1	0,555
24	8,4	1	0,87	1	35	30,45	0,568
28	8,8		0,87			30,45	0,568
32	9,2		0,88			30,8	0,582

Fonte: AUTORA (2018)

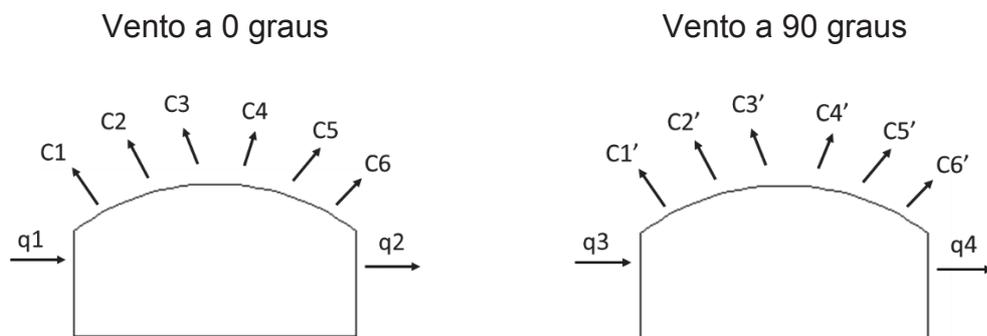
Na Figura 4.1 ilustra-se a distribuição dos coeficientes de forma para telhados de duas águas ao passo que na Figura 4.2 ilustra-se a distribuição dos coeficientes de forma para telhados arqueados. Para o cálculo desses coeficientes de forma para as tipologias BP, TP e TT, explicitados na Tabela 4.4, foi utilizado o programa Visual Ventos (PRAVIA e CHIARELLO, 2003).

Figura 4.1: Coeficientes de forma para coberturas em duas águas



Fonte: AUTORA (2018)

Figura 4.2: Coeficientes de forma para coberturas arqueadas



Fonte: AUTORA (2018)

Tabela 4.4: Coeficientes das cargas de vento para coberturas em duas águas

Tipologias TT, TP, BP	Largura Transversal (m)	V= 0		V= 90			
		q1 (kN/m)	q2 (kN/m)	q3 (kN/m)	q4 (kN/m)	q5 (kN/m)	
L = 60m	Distância entre pórticos:	16	-2,64	2,31	-3,79	-1,32	-1,65
		20	-2,67	2,84	-3,83	-1,34	-1,67
		24	-2,70	2,37	-3,88	-1,35	-1,69
		28	-2,73	2,39	-3,92	-1,37	-1,71
		32	-2,76	2,42	-3,96	-1,38	-1,47
L = 60m	Distância entre pórticos:	16	-3,30	2,89	-4,74	-1,65	-2,06
		20	-3,34	2,92	-4,79	-1,67	-2,09
		24	-3,38	2,96	-4,85	-1,69	-2,11
		28	-3,42	2,99	-4,90	-1,71	-2,13
		32	-3,45	3,02	-4,95	-1,73	-1,83
L = 63m	Distância entre pórticos:	16	-3,96	3,47	-5,68	-1,98	-2,48
		20	-4,01	3,51	-5,75	-2,00	-2,51
		24	-4,05	3,55	-5,82	-2,03	-2,53
		28	-4,10	3,59	-5,88	-2,05	-2,56
		32	-4,14	3,62	-5,94	-2,07	-2,10

Fonte: AUTORA (2018)

Na Tabela 4.5 mostra-se o cálculo dos coeficientes de forma para a tipologia TA.

Tabela 4.5: Coeficientes das cargas de vento para coberturas arqueadas

Tipologia TA	Largura Transversal (m)	V= 0				V= 90						
		q1= q2 (kN/m)	C1 = C2 = C3 = C4 = C5 = C6 (kN/m)	q3 (kN/m)	q4 (kN/m)	C1' (kN/m)	C2' (kN/m)	C3' (kN/m)	C4' (kN/m)	C5' (kN/m)	C6' (kN/m)	
L = 60m	Distância entre pórticos:6m	16	-2,67	-2,67	2,33	-1,67	-3,00	-2,00	-2,67	-2,67	-1,33	-0,67
		20	-2,67	-2,67	2,33	-1,67	-3,33	-2,10	-2,77	-2,67	-1,43	-0,67
		24	-2,73	-2,73	2,39	-1,71	-3,41	-2,15	-2,83	-2,73	-1,47	-0,68
		28	-2,73	-2,73	2,39	-1,71	-3,41	-2,15	-2,83	-2,73	-1,47	-0,68
		32	-2,79	-2,79	2,44	-1,74	-3,49	-2,20	-2,90	-2,79	-1,50	-0,70
L = 60m	Distância entre pórticos:7,5m	16	-3,33	-3,33	2,92	-2,08	-3,75	-2,50	-3,33	-3,33	-1,67	-0,83
		20	-3,33	-3,33	2,92	-2,08	-4,17	-2,62	-3,46	-3,33	-1,79	-0,83
		24	-3,41	-3,41	2,98	-2,13	-4,26	-2,69	-3,54	-3,41	-1,83	-0,85
		28	-3,41	-3,41	2,98	-2,13	-4,26	-2,69	-3,54	-3,41	-1,83	-0,85
		32	-3,49	-3,49	3,05	-2,18	-4,36	-2,75	-3,62	-3,49	-1,88	-0,87
L = 63m	Distância entre pórticos:9m	16	-4,00	-4,00	3,50	-2,50	-4,50	-3,00	-4,00	-4,00	-2,00	-1,00
		20	-4,00	-4,00	3,50	-2,50	-5,00	-3,15	-4,15	-4,00	-2,15	-1,00
		24	-4,09	-4,09	3,58	-2,56	-5,12	-3,22	-4,25	-4,09	-2,20	-1,02
		28	-4,09	-4,09	3,58	-2,56	-5,12	-3,22	-4,25	-4,09	-2,20	-1,02
		32	-4,19	-4,19	3,66	-2,62	-5,23	-3,30	-4,34	-4,19	-2,25	-1,05

Fonte: AUTORA (2018)

4.1.3 Combinação de Ações

No Apêndice 01 – Solicitação de cargas (AUTORA, 2018) resumem-se as solicitações de cargas para todas as tipologias, considerando as Ações Permanentes (G) e as Ações Variáveis (Q e V), bem como as ponderações/combinções propostas pela norma NBR 14762 (ABNT, 2010) para solicitações últimas normais ou de construção. Verificou-se que as solicitações do vento transversal ($V=90$) levaram a piores condições de carregamento, sendo, por isso, a direção considerada para compor a combinação de ações.

As cargas são concentradas nos nós posto que se tratam de treliças. Por isso, são diferenciadas entre cargas nos nós extremos e cargas nos demais nós, considerando a distribuição por metro.

4.1.4 Metodologia utilizada para otimização dos modelos

A otimização foi obtida com base no menu OPT do Programa Ansys. No Apêndice 03 apresenta-se um tutorial para utilização do módulo de otimização desse programa. No Apêndice 02 - APDL do modelo BP-16-6 – Perfil U (AUTORA, 2018) apresenta-se a APDL (linguagem fundamental na modelagem em Ansys) de um dos 180 modelos estudados a título de ilustração.

A variável de projeto (DV) foi definida como sendo a área da seção transversal. Nos modelos otimizados, adotou-se a maior área dos respectivos perfis (U, U_e e Cantoneira), conforme Tabela do Anexo 01 - Tabelas de Perfis formados a Frio (CARVALHO et al., 2014), como ponto inicial com o objetivo de se chegar a um valor próximo do ótimo, ou seja, a menor área possível para aquele arranjo determinado.

Adotaram-se intervalos de áreas para uma melhor aproximação do ponto ótimo. Para a variável A1 – área da seção transversal dos banzos das treliças, adotaram-se valores maiores, haja vista a necessidade de maior emprego de aço nessas barras que suportam as maiores solicitações. Para as demais variáveis de projeto, A2 e A3, nas áreas da seção transversal dos montantes e das diagonais respectivamente, adotaram-se valores menores. Por tentativa e erro, buscou-se o melhor arranjo (menor volume encontrado) para alguns intervalos de área adotados, conforme pode ser observado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Combinações das variáveis de projeto buscando uma aproximação do ponto ótimo

Modelo BP-16-6					
Variáveis de Projeto					
Tipos de Perfil	Área Inicial (cm ²)	A1, A2, A3* (cm ²)		Volume (cm ³)	
		Mínimo	Máximo		
Perfil U	37,62	0,0,0	38, 30, 30		178,8
			30, 22, 22		96,95
			22, 14, 14		95,34
			14, 7, 7		133,45
			7,3.5,3.5		-
Perfil U _e	24,64	0,0,0	25, 20, 20		95,27
			20, 15, 15		94,92
			15, 10, 10		94,19
			10, 5, 5		108,56
			5,2.5,2.5		-
Perfil Cantoneira	69,29	0,0,0	70, 56, 56		165
			56, 42, 42		99,94
			42, 28, 28		94,03
			28, 14, 14		108,29
			14,7,7		-

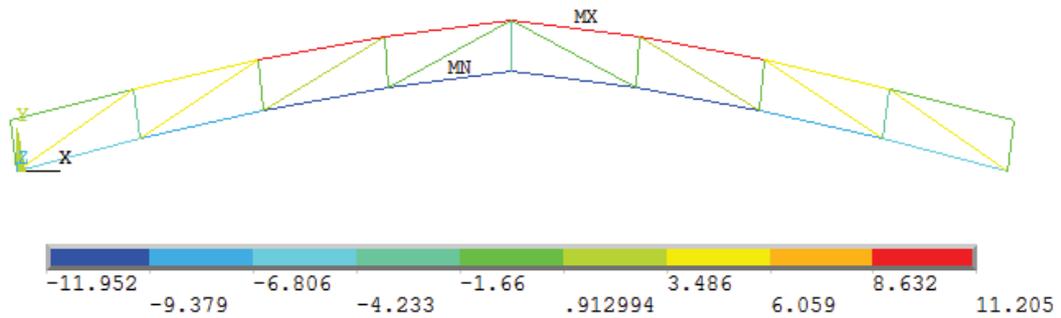
*Banzos (A1), Montantes (A2) e Diagonais (A3)

Fonte: AUTORA (2018)

Para as variáveis de estado, utilizou-se a seguinte técnica: para cada modelo analisado, as tensões axiais nas barras (SAXL) foram identificadas, a fim de se determinar as maiores solicitações para os três elementos propostos: banzos, montantes e diagonais. Na Figura 4.3 exemplifica-se essa ação para o modelo BP-16-6-Perfil U, onde as maiores solicitações podem ser observadas:

- Elemento 01 – Banzos - identificadas as barras 4 e 5 com o valor de - 11,95 MPa como sendo as de maior solicitação em módulo;
- Elemento 02 – Montantes - identificada a barra 21 com o valor de -2,75 MPa como sendo a de maior solicitação em módulo;
- Elemento 03 – Diagonais - identificadas as barras 26 e 33 com o valor de 5,82 MPa como sendo as de maior solicitação em módulo.

Figura 4.3: Identificação das solicitações axiais no Modelo BP-16-6-Perfil U



a) Tensões axiais e suas magnitudes



b) Identificação das barras

Definiram-se como variáveis de estado os intervalos entre as maiores tensões axiais do modelo e a tensão axial máxima de escoamento do aço (f_y), em módulo, considerando o coeficiente de ponderação das ações ou das resistências em geral para perfis formados a frio conforme sugerido pela norma NBR 14762 (ABNT, 2010).

$$f_{yk} = 250 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{250}{1,1} = 227 \text{ MPa}$$

Na Tabela 4.7 exemplifica-se os limites adotados para as variáveis de estado (SV's):

Tabela 4.7: Intervalos adotados para as variáveis de estado

Modelo BP-16-6				
Tipos de Perfil	Tensão correspondente aos diferentes elementos		Variáveis de Estado Tensão Axial (SAXL) MPa	
			Mínimo	Máximo
Perfil U	SAXL 1	4	-227	-18,24
	SAXL 2	21	-227	-2,75
	SAXL 3	26	5,82	227
Perfil U _e	SAXL 1	4	-227	-18,64
	SAXL 2	21	-227	-4,2
	SAXL 3	26	9,07	227
Perfil Cantoneira	SAXL 1	4	-227	-6,11
	SAXL 2	21	-227	-1,4
	SAXL 3	26	2,97	227

Fonte: AUTORA (2018)

A variável volume foi definida como função objetivo do processo de otimização. Ressalta-se que para as três variáveis em questão adotou-se uma tolerância de 0,1.

Esse procedimento foi estendido para os 180 modelos, buscando sempre um resultado mais próximo do que se pode definir como ótimo.

4.1.5 Metodologia adotada para obtenção das taxas de aço

Dos resultados de análise foi retirada a taxa de aço de cada modelo, mais especificamente de cada elemento considerado, a saber: elemento 1 (banzos), elemento 2 (montantes) e elemento 3 (diagonais). Na Tabela 4.8 mostram-se, como exemplo, os resultados da análise realizada para a tipologia BP, todos os vãos livres propostos, espaçamento de 6 metros, utilizando o Perfil U:

Tabela 4.8: Análise da tipologia BP para o espaçamento de 6 metros com emprego de perfil U

Tipologia	Elementos	Barras mais solicitadas	Área inicial (cm ²)	Volume inicial (cm ³)	Intervalo das variáveis de projeto DV's (cm ²)	Intervalo das variáveis de estado SV's (MPa)	Áreas Finais (cm ²)	Tensões finais (MPa)	Volume final (cm ³)
BP_16_6	1	4	37,62	2153,68	0 22	-227 -18	2,07	-213	95,34
	2	21			0 14	-227 -2,8	1,22	-122	
	3	26			0 14	5,82 227	1,11	213	
BP_20_6	1	5	37,62	2803,57	0 30	-227 -5,2	2,64	-215	145,99
	2	26			0 22	-227 -3,4	1,22	-104	
	3	32			0 22	6,34 227	1,12	213	
BP_24_6	1	6	37,62	3503,74	0 30	-227 -19	3,22	-216	210,49
	2	31			0 22	-227 -4,1	1,26	-121	
	3	38			0 22	6,89 227	1,21	214	
BP_28_6	1	7	37,62	4256,21	0 30	-227 -22	3,78	-218	291,01
	2	36			0 22	-227 -4,8	1,28	-139	
	3	44			0 22	7,44 227	1,43	194	
BP_32_6	1	8	37,62	5062,55	0 22	-227 -26	4,44	-216	380,91
	2	41			0 14	-227 -5,5	1,26	-162	
	3	50			0 14	227 8	1,4	214	

Fonte: AUTORA (2018)

A partir dos resultados das áreas finais, a tabela de perfis comerciais - Anexo 01- Tabelas de Perfis Formados a Frio (CARVALHO et al., 2014) foi consultada permitindo o dimensionamento de um perfil com área igual ou imediatamente superior à solicitada. Em seguida, outros dados foram obtidos com o objetivo de se verificar a taxa de aço para cada modelo. Na Tabela 4.9 esses cálculos são mostrados.

Tabela 4.9: Escolha do perfil mais adequado e cálculo das taxas de aço

Tipologia	Áreas Finais (cm ²)	Perfil U mais adequado	Dados do Perfil escolhido		Comprimento do elemento (m)	Peso (kg)	Área de Influência (m)	Taxa de aço (kg/m ²)	Σ Taxa de aço (kg/m ²)
			Área (cm ²)	Massa (kg/m)					
BP_16_6	2,07	75x40x1,2	2,25	1,77	32,08	56,78	96	0,591	0,825
	1,22	50x25x1,50	1,43	1,12	7,2	8,06		0,084	
	1,11	50x25x1,20	1,15	0,9	16	14,4		0,15	
BP_20_6	2,64	50x25x3	2,7	2,12	40,02	84,84	120	0,707	0,939
	1,22	50x25x1,50	1,43	1,12	8,8	9,86		0,082	
	1,12	50x25x1,20	1,15	0,9	20	18		0,15	
BP_24_6	3,22	75x40x2,25	3,32	2,61	48,12	125,6	144	0,872	1,14
	1,26	50x25x1,50	1,43	1,12	10,4	11,65		0,081	
	1,21	50x25x1,50	1,43	1,12	24	26,88		0,187	
BP_28_6	3,78	75x40x2,65	3,88	3,04	56,14	170,7	168	1,016	1,283
	1,28	50x25x1,50	1,43	1,12	12	13,44		0,08	
	1,43	50x25x1,50	1,43	1,12	28	31,36		0,187	
BP_32_6	4,44	100x40x2,65	4,54	3,56	64,16	228,4	192	1,19	1,514
	1,26	50x25x1,50	1,43	1,12	13,6	15,23		0,079	
	1,45	50x25x2	1,87	1,47	32	47,04		0,245	

Fonte: AUTORA (2018)

Para obtenção do peso dos elementos e conseqüentemente da estrutura utilizou-se da multiplicação entre o comprimento dos elementos e a massa dos perfis comerciais escolhidos. As taxas de aço foram obtidas a partir da divisão do peso calculado pela área de influência (largura x distância entre treliças de cobertura) de cada modelo. A partir dos valores das taxas de aço por elemento foi possível verificar a taxa de aço da estrutura, somando-as. A variável taxa de aço foi utilizada para exposição dos resultados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentam-se neste capítulo os resultados de taxas de consumo de aço para as quatro tipologias estudadas, com a variação das distâncias transversais e longitudinais para os três perfis propostos: U, U_e e Cantoneira. A taxa de consumo de aço global para cada modelo foi obtida a partir da aplicação dos princípios de análises e dimensionamento apresentados na metodologia.

Apresentam-se os resultados separados por tipologias, para que, no decorrer do trabalho, outras conclusões possam ser retiradas.

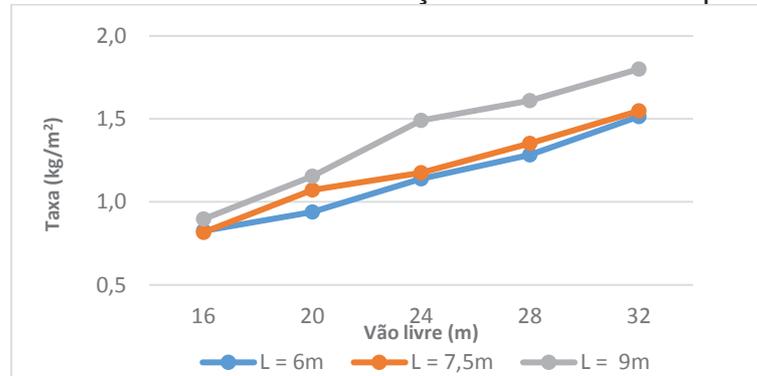
5.1 COMPARATIVO DAS TAXAS DE CONSUMO DE AÇO

As variações paramétricas consideradas na análise numérica dos modelos estruturais foram apresentadas no terceiro capítulo. A seguir, apresentam-se as variações das taxas de consumo de aço para cada tipologia proposta e para os diferentes perfis empregados, bem como a comparação dos resultados para esses diferentes perfis.

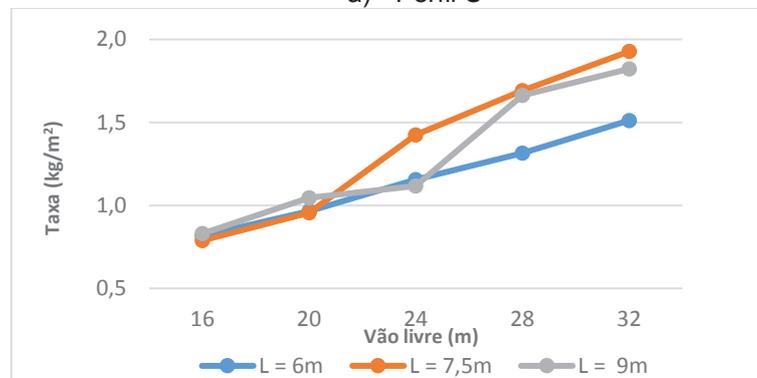
5.1.1 Taxa de consumo de aço para treliças de banzos paralelos (BP)

Apresentam-se na Figura 5.1 as taxas de consumo de aço quando empregados os perfis U, U_e e cantoneira para a tipologia BP:

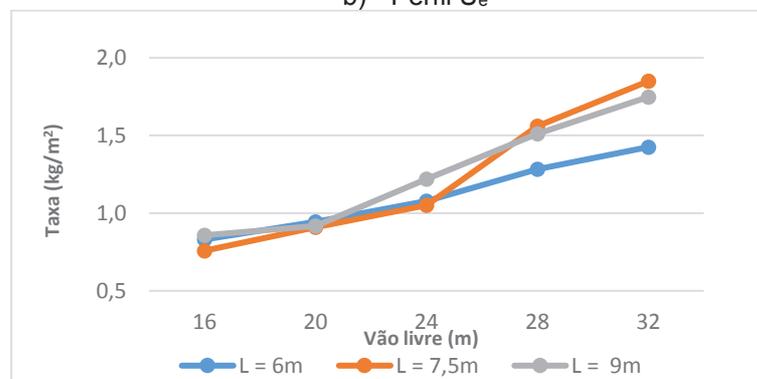
Figura 5.1: Taxa de consumo de aço considerando a tipologia BP



a) Perfil U



b) Perfil U_e



c) Perfil cantoneira

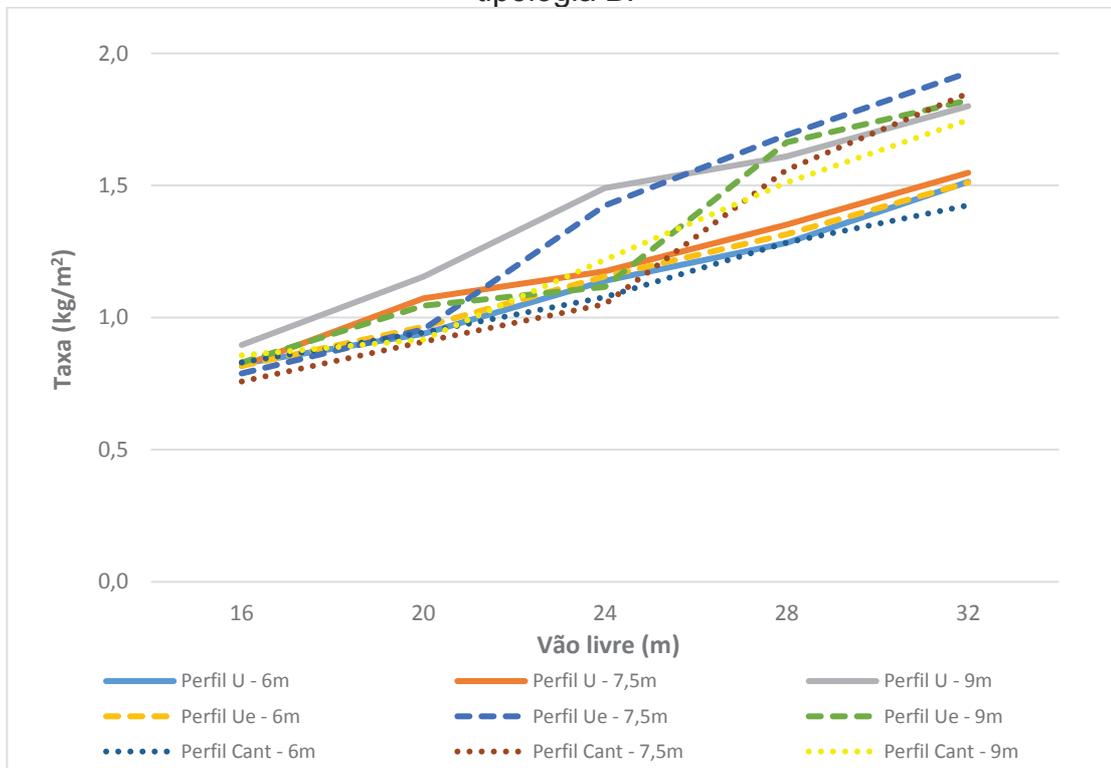
Fonte: AUTORA (2018)

Percebe-se que, no geral, há uma tendência de aumento da taxa de consumo de aço na medida em que se aumenta o vão livre da treliça de cobertura e na medida em que se aumenta o espaçamento (L) entre elas. Essa tendência é bem linearizada quando a distância entre as treliças é de 6 metros. Para as demais distâncias alguns comportamentos podem ser observados: na Figura 5.1 (a), em que se mostra o emprego do perfil U para essa tipologia, observa-se claramente a tendência natural de aumento da taxa em função do aumento das distâncias transversais e longitudinais.

Na Figura 5.1 (b), em que se representa a taxa de consumo de aço em perfis U_e , nota-se um aumento suave na taxa de aço consumida para o espaçamento de 9 metros, apresentando taxas inferiores aos espaçamentos menores para o vão livre de 24 metros, o que torna esse arranjo muito interessante do ponto de vista da economia. Comportamento similar é verificado na Figura 5.1 (c), para perfis cantoneira, porém para a distância de 7,5 metros entre as treliças de cobertura.

Na Figura 5.2 ilustram-se todos os perfis empregados na Tipologia BP para uma análise geral.

Figura 5.2: Taxa de consumo de aço para todos os perfis analisados na tipologia BP



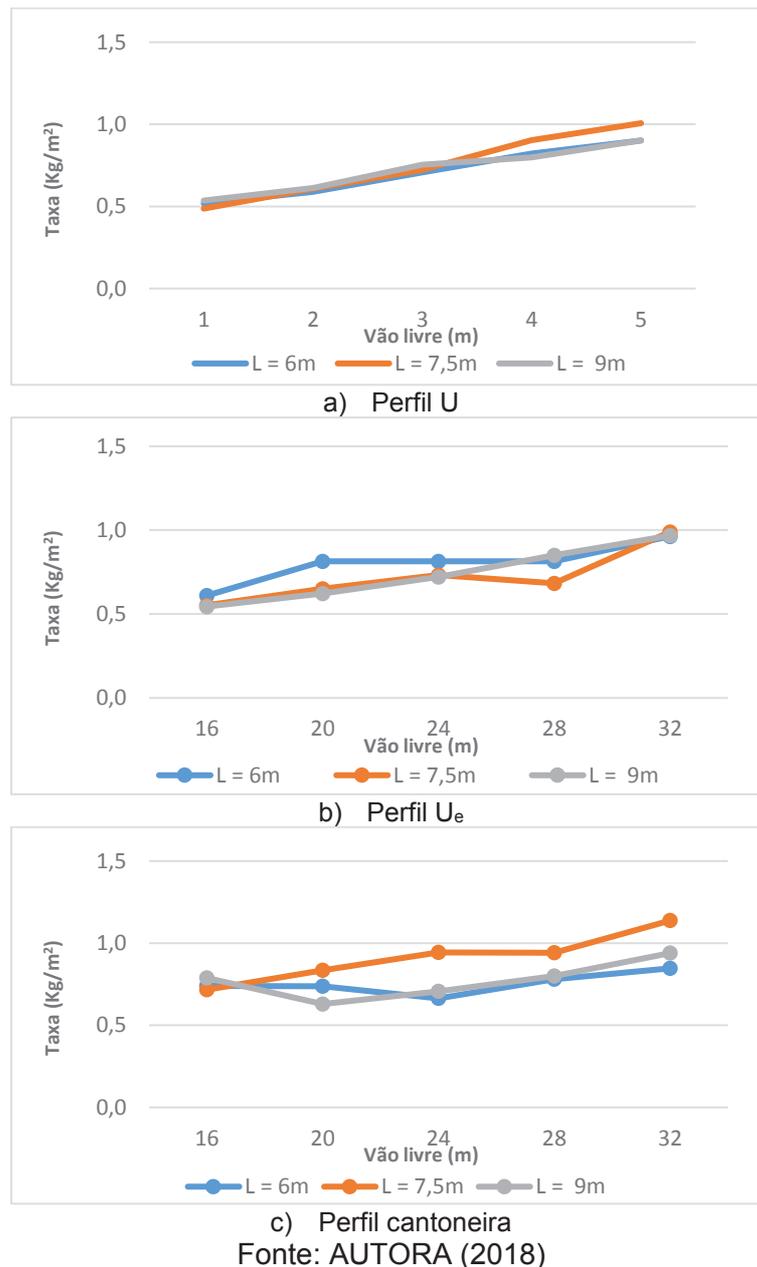
Fonte: AUTORA (2018)

Para a tipologia BP o perfil cantoneira mostra-se mais interessante: espaçado de 7,5 metros até o vão livre de 24 metros; espaçado de 6 metros para os vãos livres de 28 e 32 metros.

5.1.2 Taxa de consumo de aço para treliças trapezoidais (TP)

Apresentam-se na Figura 5.3 as taxas de consumo de aço quando empregados os perfis U, U_e e Cantoneira para a tipologia TP.

Figura 5.3: Taxa de consumo de aço considerando a tipologia TP

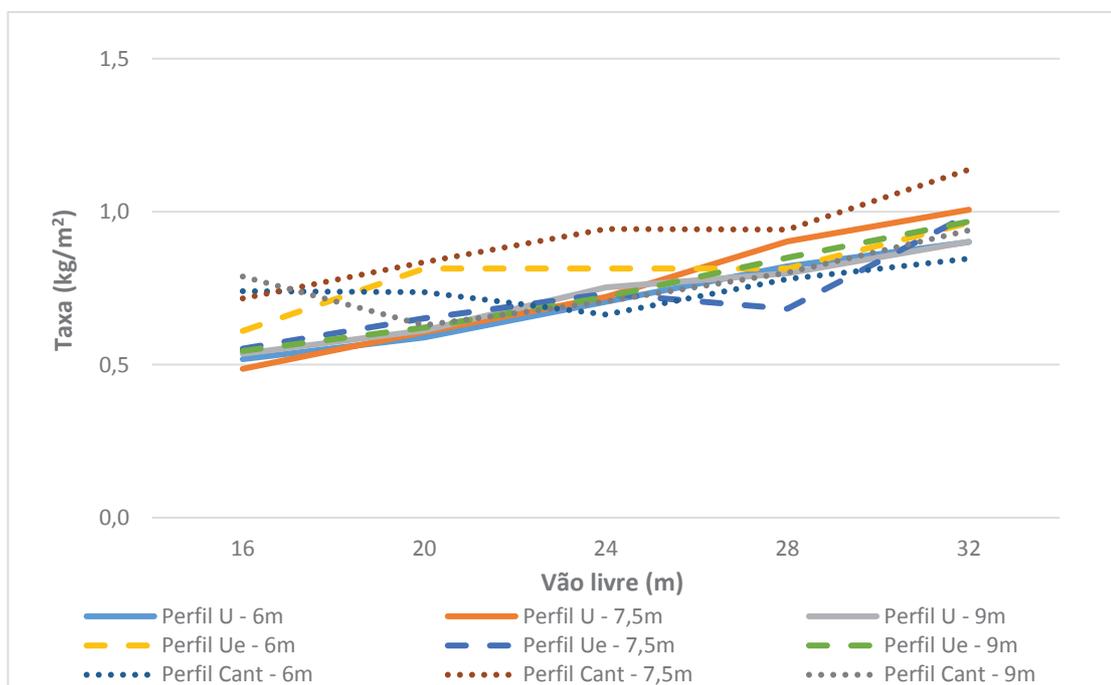


Na Figura 5.3 (a), é demonstrada a tendência natural de aumento da taxa de aço consumida em função do aumento das distâncias transversais e longitudinais. Na Figura 5.3 (b), destaca-se a queda da taxa de aço para a distância entre as treliças de

7,5 metros no vão livre de 28 metros. Na Figura 5.3 (c), nota-se o declínio na taxa de aço para o vão livre de 20 metros quando o espaçamento entre as treliças é de 9 metros com posterior ascensão da taxa. O mesmo comportamento pode ser verificado para o espaçamento de 6 metros, porém quando o vão da treliça é de 24 metros.

Na Figura 5.4 demonstram-se todos os perfis empregados na tipologia treliças trapezoidais (TP).

Figura 5.4: Taxa de consumo de aço para todos os perfis analisados na tipologia TP



Fonte: AUTORA (2018)

Para a tipologia TP, verifica-se que, para cada vão livre, uma configuração diferente é tida como mais interessante do ponto de vista de menor consumo de aço: para o vão livre de 16 metros: perfil U espaçado de 7,5 metros; para o vão livre de 20 metros: perfil U espaçado de 6 metros; para o vão livre de 24 metros: perfil cantoneira, espaçado de 6 metros; para o vão livre de 28 metros: perfil U_e, espaçado de 7,5 metros; e finalmente, para o vão livre de 32 metros, perfil cantoneira, espaçado de 6 metros.

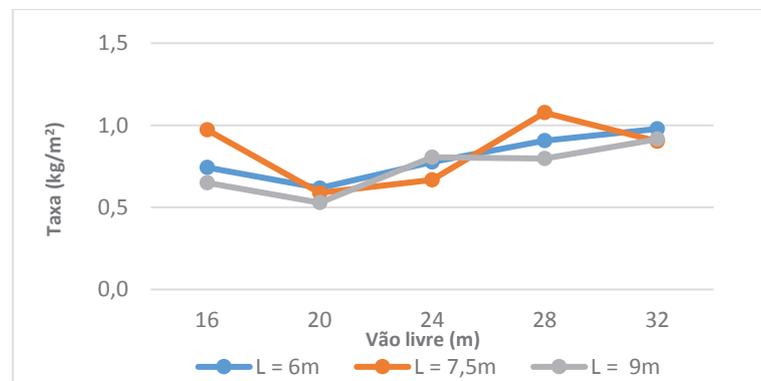
Percebe-se que, tanto para as tipologias BP ou TP, a utilização de perfis tipo U tem a tendência de crescimento linear na taxa de aço, o que proporciona uma

estimativa mais assertiva da quantidade de material empregado e, ainda, sugere o emprego de perfis comerciais com resistência muito próxima do esforço solicitante.

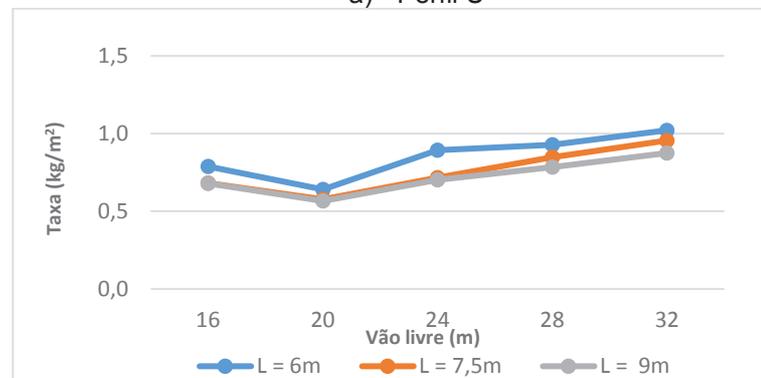
5.1.3 Taxa de consumo de aço para treliças triangulares (TT)

Apresentam-se na Figura 5.5 as taxas de consumo de aço quando empregados os perfis U, U_e e cantoneira para a tipologia TT.

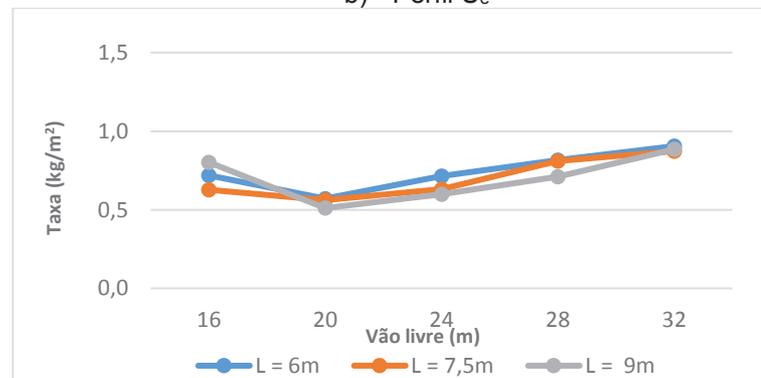
Figura 5.5: Taxa de consumo de aço considerando a tipologia TT



a) Perfil U



b) Perfil U_e



c) Perfil cantoneira

Fonte: AUTORA (2018)

Percebe-se, para os três tipos de perfis uma tendência de declínio da taxa de aço empregada para o vão livre de 20 metros, o que sugere o emprego dessa tipologia (TT) na construção de galpões com essa largura. Há que se ressaltar que as taxas de aço empregadas nessa tipologia, de uma maneira geral, são menores quando comparadas com as demais. Na Figura 5.5 (a) destaca-se o espaçamento de 7,5 metros entre as treliças de cobertura apresentando um decréscimo considerável nas taxas de aço até o vão livre de 24 metros, e, em seguida, um crescimento substancial até os 28 metros (desinteressante economicamente) vindo a declinar para o vão livre de 32 metros. Na Figura 5.5 (b) após a queda na taxa de aço para todas as distâncias consideradas até o vão livre de 20 metros, observa-se uma tendência de crescimento linear para todos os vãos livres seguintes. Um comportamento similar é notado na Figura 5.5 (c), quando da utilização do perfil cantoneira.

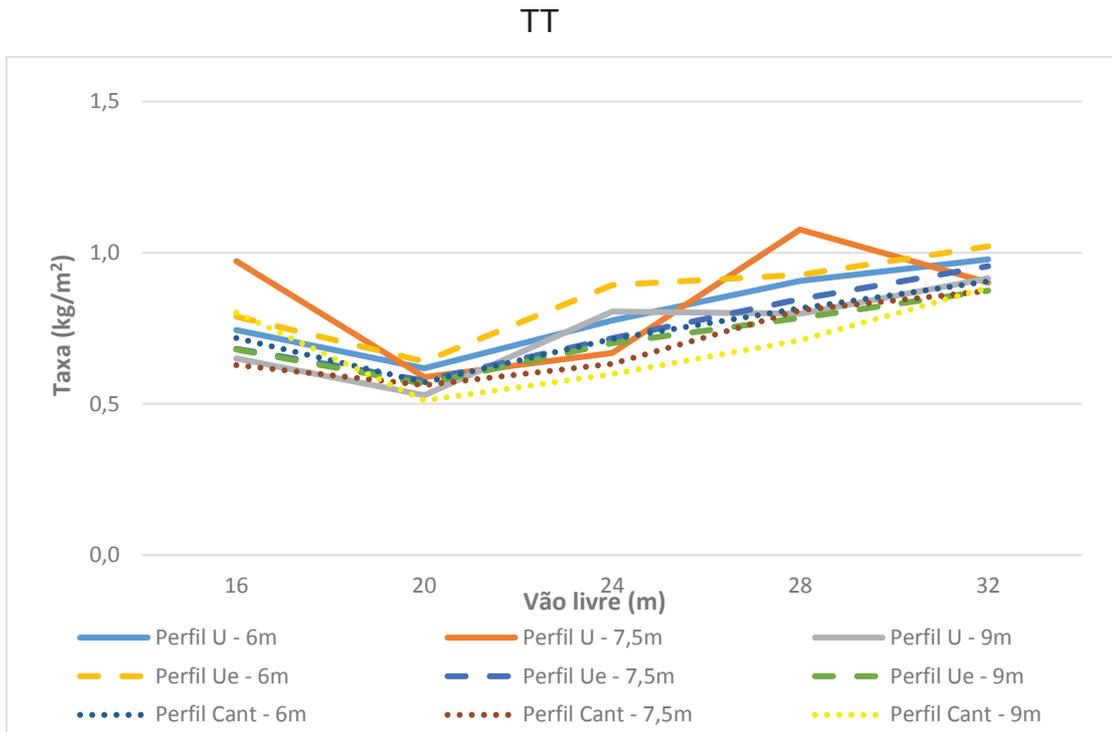
Na Figura 5.6 mostram-se todos os perfis empregados na Tipologia TT para análise geral. Observa-se que essa tipologia é interessante para todas as distâncias entre pórticos e perfis objetos desse estudo quando o galpão possui 20 metros de largura. Destaca-se ainda o perfil cantoneira espaçado de 9 metros como o mais econômico para os vãos livres de 20, 24, 28 e 32 metros, não sendo interessante apenas para o vão de 16 metros, em que o mesmo perfil espaçado de 7,5 metros se mostra mais interessante.

5.1.4 Taxa de consumo de aço para treliças arqueadas (TA)

Apresentam-se na Figura 5.7 as taxas de consumo de aço quando empregados os perfis U, U_e e cantoneira para a tipologia TA.

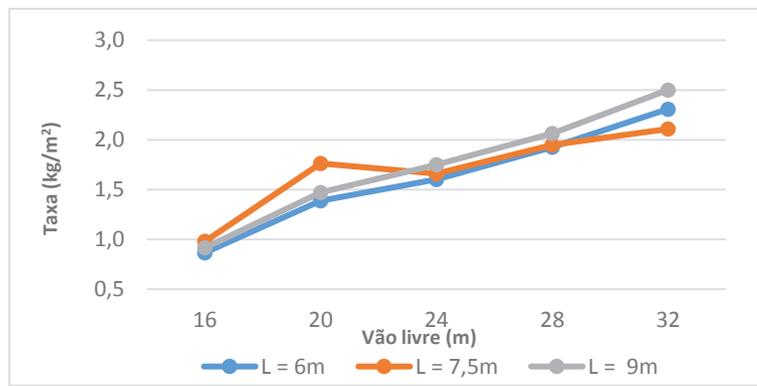
Para os três tipos de perfis, a tendência esperada de crescimento linear da taxa de aço empregada com algumas exceções: na Figura 5.7 (a) o vão livre de 20 metros mostra-se desinteressante; na Figura 5.7 (b) o destaque é o espaçamento de 6 metros no vão livre de 28 metros, que, após acréscimo linear na taxa de aço empregada, mostra um decréscimo interessante nesse ponto. Na Figura 5.7 (c) mostra-se que o perfil cantoneira traz uma linearidade do crescimento da taxa de aço empregada na medida em que se aumenta a largura e o comprimento das treliças de cobertura.

Figura 5.6: Taxa de consumo de aço para todos os perfis analisados na tipologia TT

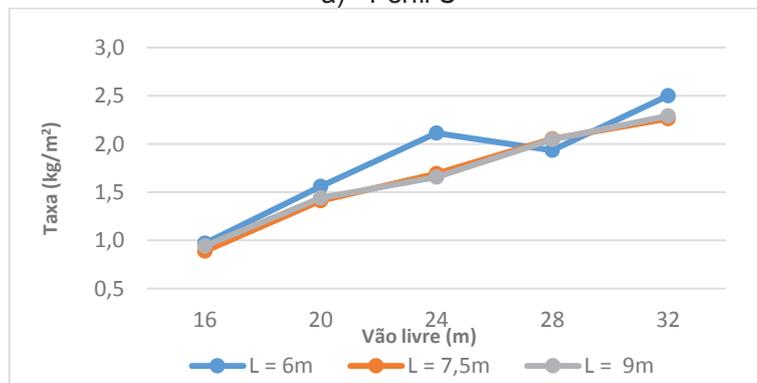


Fonte: AUTORA (2018)

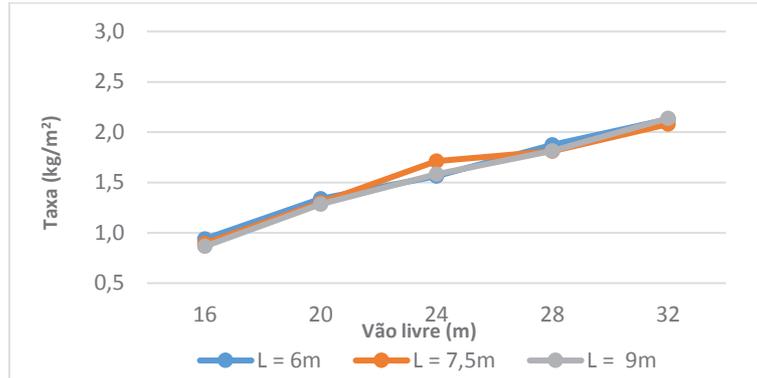
Figura 5.7: Taxa de consumo de aço considerando a tipologia TA



a) Perfil U



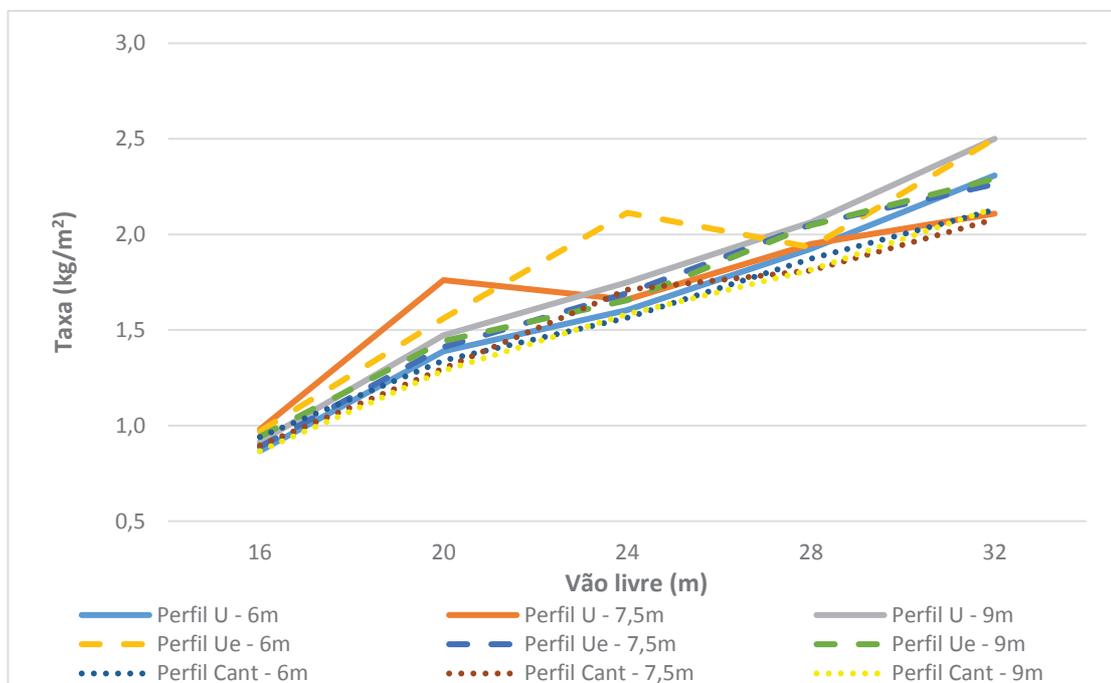
b) Perfil Ue



c) Perfil cantoneira
 Fonte: AUTORA (2018)

Na Figura 5.8 demonstram-se todos os perfis empregados na Tipologia TA para análise geral. Novamente o perfil cantoneira se destaca quando comparado com os demais, mostrando as menores taxas de aço empregadas nos diferentes vãos livres e para diferentes espaçamentos entre treliças.

Figura 5.8: Taxa de consumo de aço para todos os perfis analisados na tipologia TA



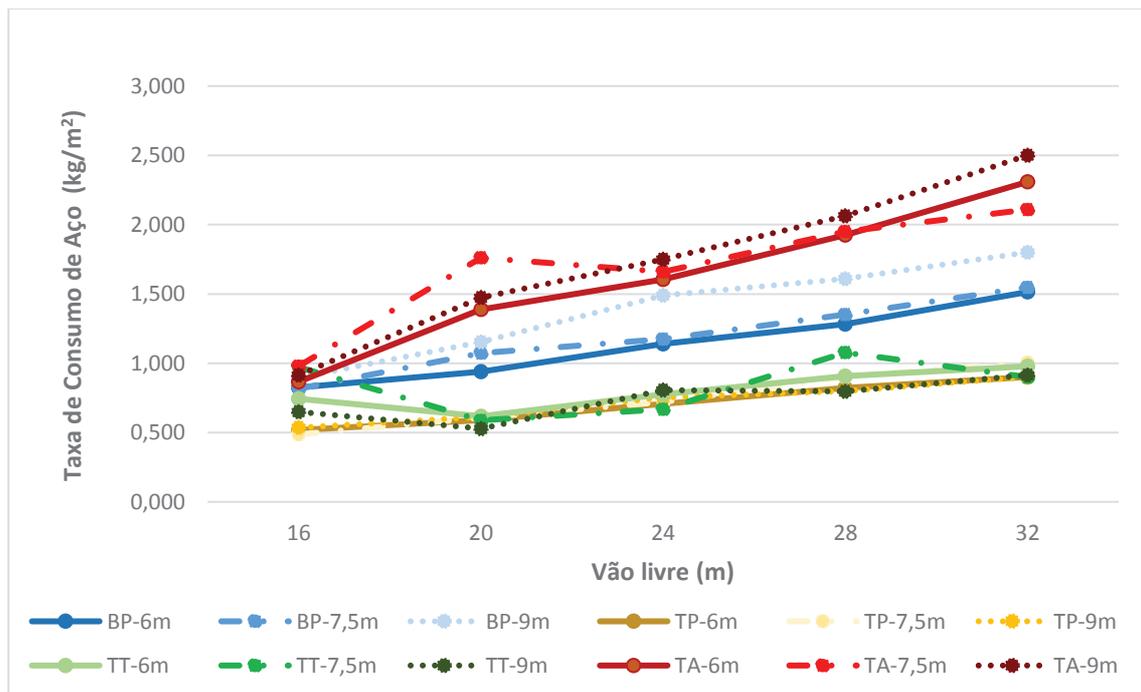
Fonte: AUTORA (2018)

5.1.5 Taxa de consumo de aço - Perfil U - todas as tipologias

Apresentam-se na Figura 5.9 as taxas de consumo de aço quando empregado o Perfil U, para todas as tipologias estudadas. Para os modelos BP e TP verifica-se a tendência da taxa de aço de ser crescente na medida em que se aumenta a largura transversal das treliças de cobertura. Para os modelos referentes à treliça triangular (TT) ressalta-se a tendência de linearidade, apresentada a partir do vão livre de 20 metros, sendo que para o vão livre de 16 metros a tipologia TP mostra-se mais favorável em todas as distâncias adotadas entre as treliças de cobertura.

A tipologia de treliça arqueada (TA) tem os piores resultados quando comparada com as demais tipologias, porém sugere algumas análises se tratada de forma isolada: devido a variação expressiva dos resultados para o modelo TA-20-7,5, verifica-se que, para o vão livre de 20 metros, esse modelo apresenta o pior desempenho; ao passo que, para o vão livre de 32 metros, nota-se um bom desempenho do emprego desse perfil (a taxa de aço com tendência de estabilidade entre os vãos livres de 28 e 32 metros).

Figura 5.9: Taxa de consumo de aço para todas as tipologias (BP, TP, TT e TA) – emprego do perfil U



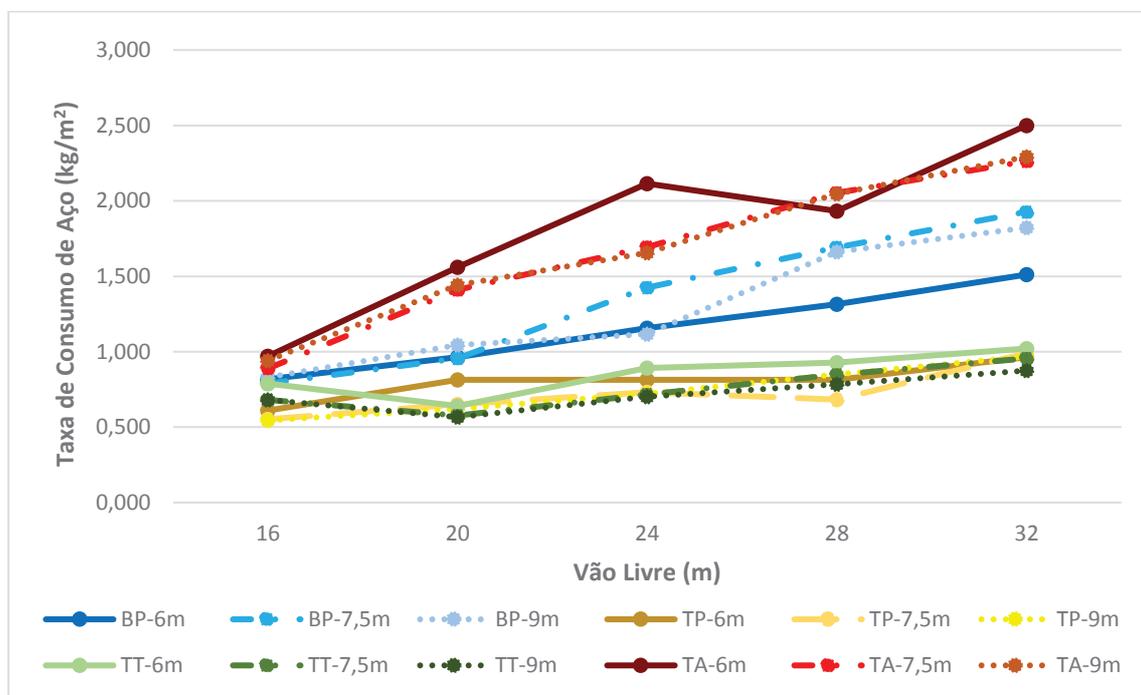
Fonte: AUTORA (2018)

É possível afirmar que, de modo geral, as tipologias que apresentam melhor desempenho no que se refere ao menor consumo de aço são treliças triangulares (TT) e as treliças trapezoidais (TP). Para o vão livre de 16 metros destacam-se as treliças trapezoidais espaçadas em 7,5 metros; para o vão livre de 20 metros, o destaque é a tipologia triangular, espaçada de 9 metros; em seguida, na largura de 24 metros, o melhor desempenho é também da treliça triangular, porém espaçada de 7,5 metros; para os vãos de 28 e 32 metros tem-se resultados muito próximos entre a treliça triangular espaçada de 9 metros e a treliça trapezoidal espaçada de 6 em 6 metros.

5.1.6 Taxa de consumo de aço - Perfil U_e - todas as tipologias

Apresentam-se na Figura 5.10 as taxas de consumo de aço quando empregado o Perfil U_e, para todas as tipologias estudadas.

Figura 5.10: Taxa de consumo de aço para todas as tipologias (BP, TP, TT e TA) – emprego do perfil U_e



Fonte: AUTORA (2018)

O emprego do perfil U_e para as diversas tipologias demonstra a mesma tendência do Perfil U em que o melhor desempenho é obtido com o emprego de

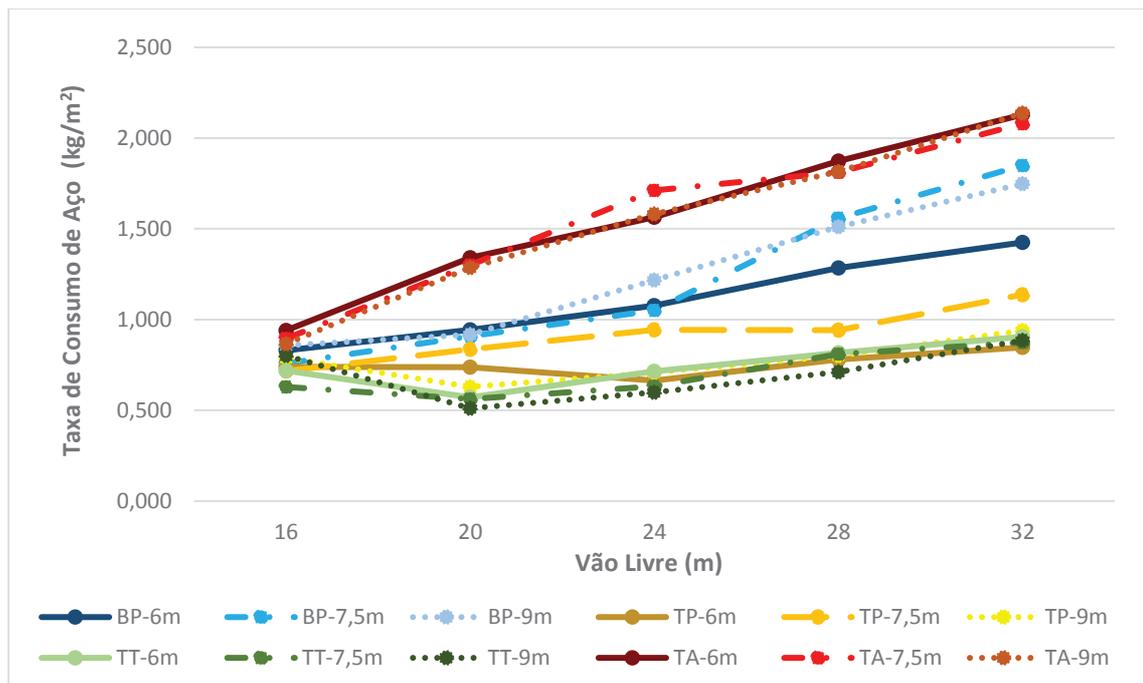
treliças triangulares (TT) e de treliças trapezoidais (TP). Percebe-se um desempenho ruim nas treliças de tipologias arqueadas e de banzos paralelos, com destaque para o modelo TA-24-6, que apresentou um pico considerável na taxa de aço necessária para suportar as cargas solicitantes.

Destaca-se o bom desempenho da tipologia TT para o vão livre de 20 metros, para todos os espaçamentos propostos. Destaca-se, ainda, o desempenho semelhante dos modelos TT espaçados entre 7,5 e 9 metros para os vãos livres de 16, 20 e 24 metros, o que permite uma escolha aleatória sem prejuízos. Para os vãos livres de 16 e 28 metros o melhor desempenho é da tipologia TP no espaçamento de 9 e 7,5 metros, respectivamente. Para os intervalos de 20, 24 e 32 metros recomenda-se a utilização da tipologia TT, com destaque para os intervalos de 7,5 e 9 metros.

5.1.7 Taxa de consumo de aço - Perfil Cantoneira- todas as tipologias

Apresentam-se na Figura 5.11 as taxas de consumo de aço quando empregado o perfil cantoneira, para todas as tipologias estudadas.

Figura 5.11: Taxa de consumo de aço para todas as tipologias (BP, TP, TT e TA) – emprego do perfil cantoneira



Fonte: AUTORA (2018)

O emprego do perfil cantoneira para as diversas tipologias demonstra uma tendência parecida com a tendência dos perfis U e U_e, mantendo, de uma maneira geral, os melhores desempenhos para as tipologias TT e TP. Ressalta-se que para o vão livre de 16 metros a treliça triangular espaçada de 9 em 9 metros mostra-se completamente desfavorável, ao passo que para os intervalos de 20, 24 e 28 metros ela se destaca, demonstrando o melhor desempenho no que se refere ao baixo consumo de aço. Contudo, a mesma tipologia TT destaca-se para o vão livre de 16 metros, porém espaçada de 7,5 metros. Apenas para o vão livre de 32 metros a tipologia TP se destaca, no espaçamento de 6 metros, mas há que se considerar que o resultado é muito próximo dos modelos TT e do modelo TP espaçado de 9 em 9 metros.

5.1.8 Taxa de Consumo de Aço para o espaçamento de 6 metros

Apresentam-se na Figura 5.15 alguns histogramas mostrando o desempenho dos diferentes perfis para as tipologias do estudo em questão, com o espaçamento de 6 metros entre as treliças de cobertura.

Conforme Figura 5.12 (a), para o vão livre de 16 metros, destaca-se o perfil U_e como sendo o de menor emprego de aço; para o vão livre de 20 metros, destaca-se o perfil U como o de melhor desempenho, embora o perfil cantoneira tenha um resultado muito próximo; para a largura de 24 metros o melhor desempenho é do perfil cantoneira; para o vão livre de 28 metros, o destaque é duplo: perfil U com um valor muito próximo do resultado do perfil cantoneira; e finalmente, para o vão livre de 32 metros, o perfil cantoneira mostra-se como o de melhor desempenho.

Conforme Figura 5.12 (b), para os vãos livres de 16 e 20 metros, destaca-se o perfil U como sendo o de menor emprego de aço; para as larguras de 24, 28 e 32 metros, o perfil cantoneira apresentou melhor desempenho.

Conforme Figura 5.12 (c), para todos os vãos livres da tipologia TT, destaca-se o perfil cantoneira como sendo o de menor emprego de aço, e, portanto, o que apresentou melhor desempenho.

Conforme Figura 5.12 (d), para o vão livre de 16 metros, destaca-se o perfil U como sendo o de menor emprego de aço; para os demais, destaca-se o perfil cantoneira como sendo o de melhor desempenho.

Figura 5.12: Taxa de consumo de aço para as tipologias em análise L= 6m



Fonte: AUTORA (2018)

Na Tabela 5.1 mostra-se o resumo dos perfis que apresentaram os melhores desempenhos para as diferentes tipologias.

O emprego de perfis formados a frio do tipo cantoneira não é muito comum em treliças de cobertura, embora exista a possibilidade. Assim, na Tabela 5.2 comparam-se os melhores desempenhos entre o emprego de perfis U e U_e.

Tabela 5.1: Perfis com menores consumo de aço para todas as tipologias considerando o espaçamento entre as treliças de 6 metros

Tipologias	Vão Livre (m)				
	16	20	24	28	32
BP	Perfil U _e	Perfil U	Perfil Cant	Perfil U	Perfil Cant
TP	Perfil U	Perfil U	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant
TT	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant
TA	Perfil U	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant

Fonte: AUTORA (2018)

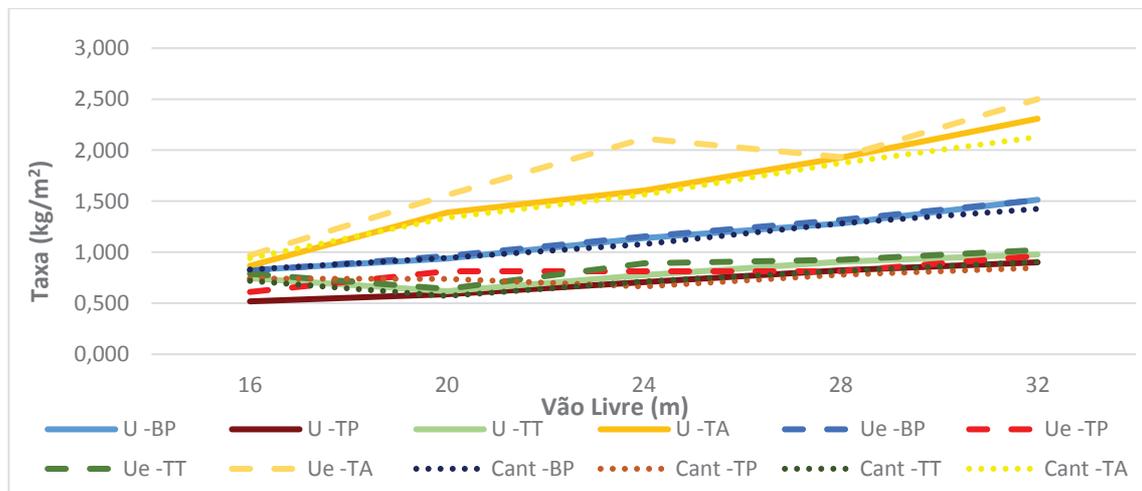
Tabela 5.2: Comparação entre os perfis U e U_e quanto as taxas de consumo de aço considerando o espaçamento entre as treliças de 6 metros

L = 6m	Tipologias	Perfis	Vão Livre (m)				
			16	20	24	28	32
			BP	U	0,825	0,939	1,14
		U _e	0,818	0,965	1,155	1,315	1,511
	TP	U	0,518	0,59	0,706	0,821	0,901
		U _e	0,61	0,815	0,815	0,814	0,964
	TT	U	0,744	0,618	0,776	0,906	0,978
		U _e	0,788	0,64	0,893	0,927	1,021
	TA	U	0,867	1,389	1,604	1,925	2,309
		U _e	0,97	1,56	2,114	1,934	2,500

Fonte: AUTORA (2018)

Na Figura 5.13 ilustra-se a comparação de todas as tipologias para a distância de 6 metros entre as treliças.

Figura 5.13: Taxas de consumo de aço considerando o espaçamento entre as treliças de 6 metros – todos os perfis e todas as tipologias



Fonte: AUTORA (2018)

As observações são para os seguintes modelos: para o vão livre de 16 metros, destaca-se a treliça do tipo trapezoidal (TP) com emprego do Perfil U; para o vão livre de 20 metros, destaca-se a mesma tipologia (TP), porém, com o emprego do perfil cantoneira, embora com um valor muito próximo do modelo TP, Perfil U; para os demais vãos livres, a saber: 24, 28 e 32 metros, o destaque também é da tipologia TP, com utilização do perfil cantoneira. Ressalta-se que o segundo melhor desempenho para todos os vãos livres é da tipologia TP, com o emprego do perfil U. Destaca-se, ainda, a linearidade de crescimento da taxa de aço quando da utilização do modelo TP, perfil U, o que sugere um melhor aproveitamento dos perfis comerciais empregados.

5.1.9 Taxa de Consumo de Aço para o espaçamento de 7,5 metros

Apresentam-se na Figura 5.14 alguns histogramas mostrando o desempenho dos diferentes perfis para as tipologias do estudo em questão, com o espaçamento de 7,5 metros entre as treliças de cobertura.

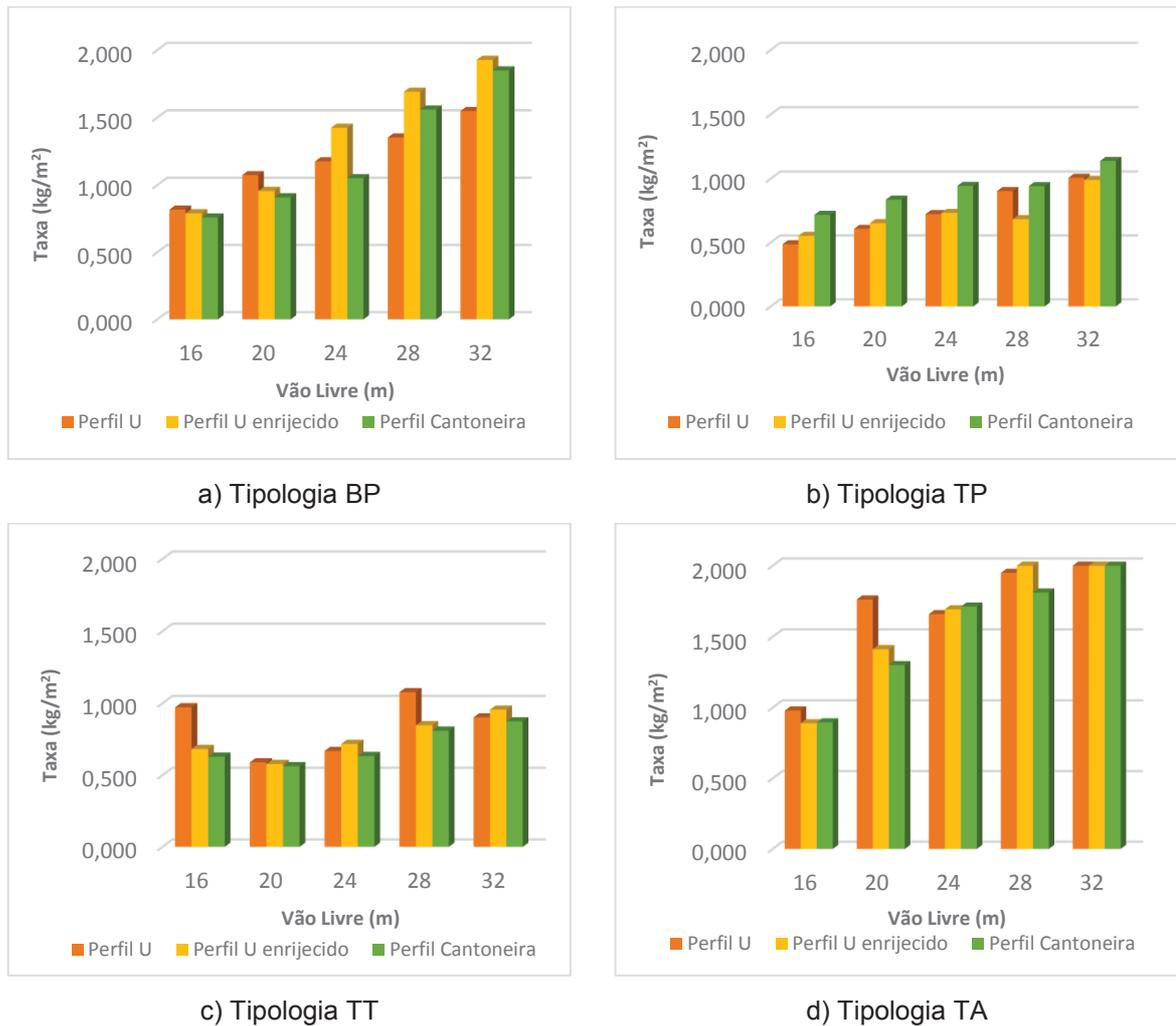
Conforme Figura 5.14 (a), para os vãos livres de 16, 20 e 24 metros, o melhor desempenho é do perfil cantoneira. Para os demais vãos livres, o destaque é do perfil U que representa as menores taxas de aço empregadas.

Conforme Figura 5.14 (b), para os vãos livres de 16, 20 e 24 metros o melhor desempenho é do perfil U. Para os demais vãos livres, o destaque é do perfil U_e que representa as menores taxas de aço empregadas.

Conforme Figura 5.14 (c), para todos os vãos livres da tipologia TT, destaca-se o perfil cantoneira como sendo o de menor emprego de aço, e, portanto, o que apresentou melhor desempenho.

Conforme Figura 5.14 (d), para o vão livre de 16 metros, destaca-se o perfil U_e como sendo o de menor emprego de aço, embora o perfil cantoneira tenha um resultado muito próximo; para o vão livre de 20 metros, destaca-se o perfil cantoneira como o de melhor desempenho; para a largura de 24 metros, o melhor desempenho é do perfil U; para os vãos livres de 28 e 32 metros, o destaque é do perfil cantoneira, que apresentou o melhor desempenho.

Figura 5.14: Taxa de consumo de aço para as tipologias em análise L= 7,5 metros



Fonte: AUTORA (2018)

Na Tabela 5.3 mostra-se o resumo dos perfis que apresentaram os melhores desempenhos para as diferentes tipologias:

Tabela 5.3: Perfis com menores consumo de aço para todas as tipologias considerando o espaçamento entre as treliças de 7,5 metros

Tipologias	Vão Livre (m)				
	16	20	24	28	32
BP	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil U	Perfil U
TP	Perfil U	Perfil U	Perfil U	Perfil U _e	Perfil U _e
TT	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant
TA	Perfil U _e	Perfil Cant	Perfil U	Perfil Cant	Perfil Cant

Fonte: AUTORA (2018)

Considerando que o emprego de perfis formados a frio do tipo cantoneira não é muito comum em treliças de cobertura, apesar de existir a possibilidade, na Tabela 5.4 comparam-se os melhores desempenhos entre o emprego de perfis U e U_e.

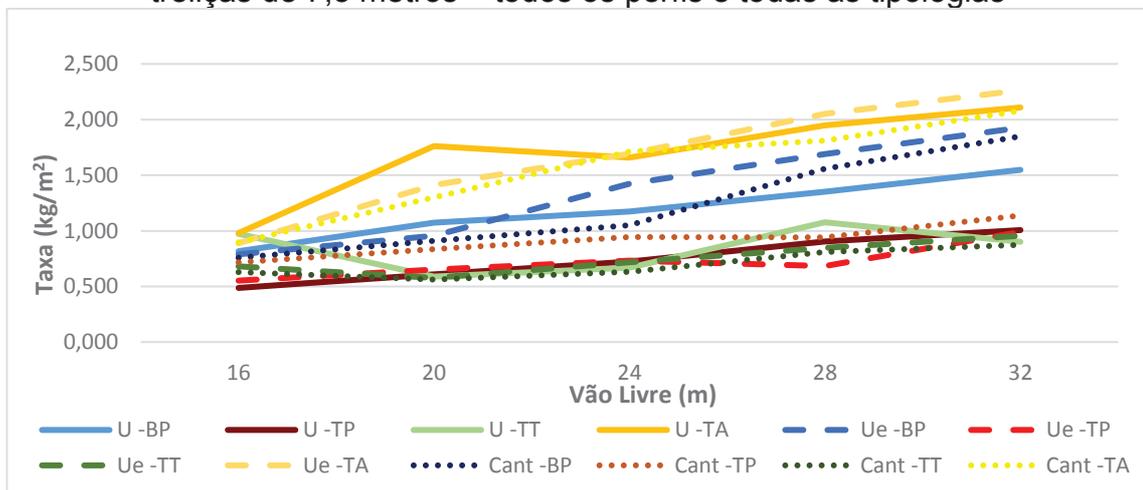
Tabela 5.4: Comparação entre os perfis U e U_e das taxas de consumo de aço considerando o espaçamento entre as treliças de 7,5 metros

	Tipologias	Perfis	Vão Livre (m)				
			16	20	24	28	32
			L = 7,5m	BP	U	0,817	1,073
U _e	0,789	0,956			1,424	1,691	1,927
TP	U	0,487		0,607	0,722	0,903	1,006
	U _e	0,552		0,652	0,732	0,683	0,99
TT	U	0,972		0,588	0,668	1,077	0,901
	U _e	0,682		0,577	0,717	0,847	0,955
TA	U	0,980		1,761	1,659	1,949	2,109
	U _e	0,889		1,411	1,693	2,052	2,263

Fonte: AUTORA (2018)

Na Figura 5.15 ilustra-se a comparação de todas as tipologias para a distância de 7,5 metros entre as treliças.

Figura 5.15: Taxas de consumo de aço considerando o espaçamento entre as treliças de 7,5 metros – todos os perfis e todas as tipologias



Fonte: AUTORA (2018)

Os melhores desempenhos são dos seguintes modelos: para o vão livre de 16 metros, destaca-se a treliça do tipo trapezoidal (TP) com emprego do Perfil U; para os vãos livres de 20, 24 e 32 metros, destaca-se a tipologia (TT) com o emprego do perfil cantoneira; para o vão livre de 28 metros, o destaque é da treliça do tipo trapezoidal (TP), com utilização do perfil U_e.

5.1.10 Taxa de Consumo de Aço para o espaçamento de 9 metros

Apresentam-se na Figura 5.16 alguns histogramas mostrando o desempenho dos diferentes perfis para as tipologias do estudo em questão, com o espaçamento de 9 metros entre as treliças de cobertura.

Figura 5.16: Taxa de consumo de aço para as tipologias em análise L= 9 metros



Fonte: AUTORA (2018)

Conforme Figura 5.16 (a), para os vãos livres de 16, 20 e 24 metros, destaca-se o perfil U_e como sendo o de menor emprego de aço; para os vãos livres de 28 e 32 metros, destaca-se o perfil U como o de melhor desempenho.

Conforme Figura 5.16 (b), para o vão livre de 16 metros, destaca-se o perfil U_e como sendo o de menor emprego de aço; para o vão livre de 20 metros, destaca-se o

perfil U como sendo o de melhor desempenho; para a largura de 24 metros o melhor desempenho é do perfil cantoneira; para os vãos livres de 28 e 32 metros o destaque é do perfil U que apresentou o melhor desempenho.

Conforme Figura 5.16 (c), para o vão livre de 16 metros, destaca-se o perfil U como sendo o de menor emprego de aço; para os demais vãos livres, destaca-se o perfil cantoneira como o de melhor desempenho.

Conforme Figura 5.16 (d), para todos os vãos livres da tipologia TA, destaca-se o perfil cantoneira como sendo o de menor emprego de aço.

Na Tabela 5.5 mostra-se o resumo dos perfis que apresentaram os melhores desempenhos para as diferentes tipologias.

Tabela 5.5: Perfis com menores consumo de aço para todas as tipologias considerando o espaçamento entre as treliças de 9 metros

Tipologias	Vão Livre (m)				
	16	20	24	28	32
BP	Perfil U _e	Perfil U _e	Perfil U _e	Perfil U	Perfil U
TP	Perfil U _e	Perfil U	Perfil Cant	Perfil U	Perfil U
TT	Perfil U	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant
TA	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant

Fonte: AUTORA (2018)

Considerando que o emprego de perfis formados a frio do tipo cantoneira não é muito comum em treliças de cobertura, apesar de existir a possibilidade, na Tabela 5.6 comparam-se os melhores desempenhos entre o emprego de perfis U e U_e.

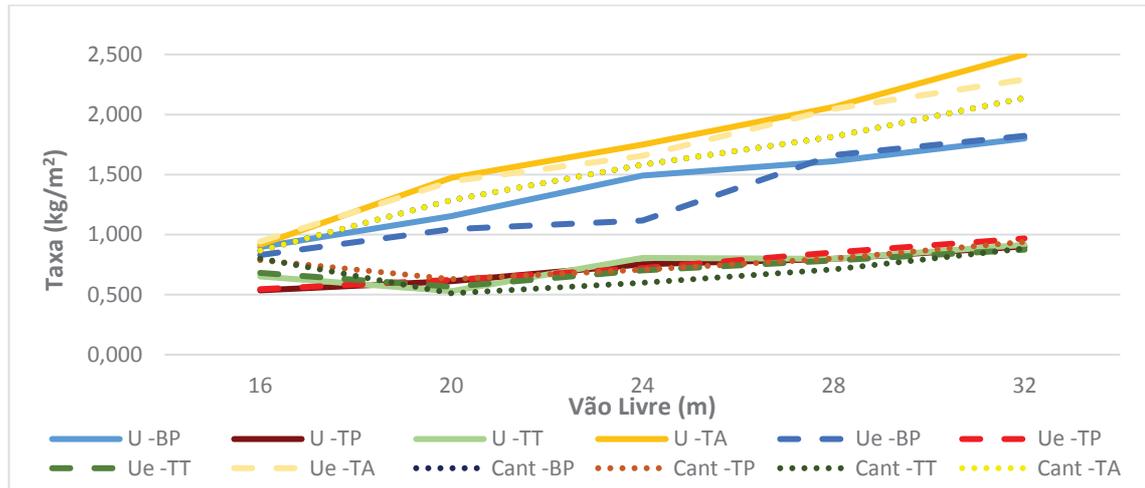
Tabela 5.6: Comparação entre os perfis U e U_e das taxas de consumo de aço considerando o espaçamento entre as treliças de 9 metros

L = 9m	Tipologias	Perfis	Vão Livre (m)				
			16	20	24	28	32
			BP	U	0,897	1,155	1,491
	U _e	0,830	1,045	1,116	1,663	1,822	
TP	U	0,536	0,612	0,753	0,798	0,902	
	U _e	0,545	0,622	0,721	0,850	0,968	
TT	U	0,651	0,528	0,806	0,798	0,915	
	U _e	0,680	0,566	0,701	0,784	0,875	
TA	U	0,915	1,472	1,749	2,063	2,500	
	U _e	0,942	1,443	1,655	2,047	2,292	

Fonte: AUTORA (2018)

Na Figura 5.17 ilustra-se a comparação de todas as tipologias para a distância de 9 metros entre as treliças.

Figura 5.17: Taxas de consumo de aço considerando o espaçamento entre as treliças de 9 metros – todos os perfis e todas as tipologias



Fonte: AUTORA (2018)

Os melhores desempenhos são dos seguintes modelos: para o vão livre de 16 metros, destaca-se a treliça do tipo trapezoidal (TP) com emprego dos Perfis U e U_e; para os vãos livres de 20, 24 e 32 metros, destaca-se a tipologia (TT) com o emprego do perfil cantoneira, embora outros perfis tenham mostrado resultados bem próximos, como o modelo TT - Perfil U para o vão de 20 metros e os modelos TP – Perfil U e U_e e o modelo TT com o emprego do Perfil U.

5.2 MELHORES MODELOS CONSIDERANDO A MENOR TAXA DE AÇO

De posse dos dados apresentados nos tópicos anteriores, foi possível montar a Tabela 5.7, que mostra os perfis que apresentaram as menores taxas de aço empregado. Ressalta-se a importância da verificação de custos de fabricação e montagem para dar suporte a decisão de qual perfil se mostraria mais econômico, porém essa análise não configura objeto de estudo desse trabalho.

Tabela 5.7: Perfis que apresentam as menores taxas de aço empregado

Tipologias	L (m)	Vão Livre (m)				
		16	20	24	28	32
BP	6	Perfil U _e	Perfil U	Perfil U	Perfil U	Perfil Cant
	7,5	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil U	Perfil U
	9	Perfil U _e	Perfil U _e	Perfil U _e	Perfil U	Perfil U
TP	6	Perfil U	Perfil U	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant
	7,5	Perfil U	Perfil U	Perfil U	Perfil U _e	Perfil U _e
	9	Perfil U _e	Perfil U	Perfil Cant	Perfil U	Perfil U
TT	6	Perfil Cant				
	7,5	Perfil Cant				
	9	Perfil U	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant
TA	6	Perfil U	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant	Perfil Cant
	7,5	Perfil U _e	Perfil Cant	Perfil U	Perfil Cant	Perfil Cant
	9	Perfil Cant				

Fonte: AUTORA (2018)

Na Tabela 5.8 mostram-se quais tipologias apresentam as menores taxas de aço necessário para as solicitações propostas. Considerando a utilização mais comum de perfis U e U_e para emprego em tesouras de cobertura de galpões, a comparação dos resultados entre eles é apresentada em seguida, por meio das Tabelas 5.9 e 5.10.

Tabela 5.8: Tipologias que apresentam as menores taxas de aço empregado

L (m)	Tipologias	Vão Livre (m)				
		16	20	24	28	32
6	TP	x		x	x	x
	TT		x			
7,5	TP	x			x	
	TT		x	x		x
9	TP	x				
	TT		x	x	x	x

Fonte: AUTORA (2018)

Tabela 5.9: Menores taxas de aço empregado – Perfis U e U_e

Tipologias	L (m)	Vão Livre (m)				
		16	20	24	28	32
BP	6	Perfil U _e	Perfil U	Perfil U	Perfil U	Perfil U _e
	7,5	Perfil U _e	Perfil U _e	Perfil U	Perfil U	Perfil U
	9	Perfil U _e	Perfil U _e	Perfil U _e	Perfil U	Perfil U
TP	6	Perfil U	Perfil U	Perfil U	Perfil U _e	Perfil U
	7,5	Perfil U	Perfil U	Perfil U	Perfil U _e	Perfil U _e
	9	Perfil U _e	Perfil U	Perfil U _e	Perfil U	Perfil U
TT	6	Perfil U				
	7,5	Perfil U _e	Perfil U _e	Perfil U	Perfil U _e	Perfil U
	9	Perfil U	Perfil U	Perfil U _e	Perfil U _e	Perfil U _e
TA	6	Perfil U				
	7,5	Perfil U _e	Perfil U _e	Perfil U	Perfil U	Perfil U
	9	Perfil U	Perfil U _e	Perfil U _e	Perfil U _e	Perfil U _e

Fonte: AUTORA (2018)

Na Tabela 5.10 mostram-se as tipologias que apresentam melhor desempenho, considerando os perfis U e U_e.

Tabela 5.10: Tipologias que apresentaram as menores taxas de aço empregado
Perfis U e U_e

L (m)	Tipologias	Vão Livre (m)				
		16	20	24	28	32
6	TP	x	x	x	x	x
	TT					
7,5	TP	x			x	
	TT		x	x		x
9	TP	x				
	TT		x	x	x	x

Fonte: AUTORA (2018)

Verifica-se nas Tabelas 5.8 e 5.10 que, quanto menor o espaçamento entre as treliças de cobertura, mais interessante é a escolha pela tipologia TP, ao passo que, quanto maior for esse espaço, a tipologia TT mostra-se como mais vantajosa em termos de economia de aço empregado.

6 CONSIDERAÇÕES E SUGESTÕES

Neste Capítulo apresentam-se as considerações finais sobre o estudo realizado, considerando, principalmente, a variação da taxa de consumo de aço para as diversas tipologias. Vale lembrar os parâmetros adotados que dão suporte para tais resultados: as tipologias, os diferentes vãos livres e o espaçamento das treliças, os tipos de perfis, as solicitações de carga e demais parâmetros necessários para análise de estruturas. Apresentam-se, ainda, sugestões para trabalhos futuros.

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De posse dos resultados, é possível afirmar que, de modo geral, as tipologias que apresentaram melhor desempenho no que se refere ao menor consumo de aço são as treliças triangulares (TT) e as treliças trapezoidais (TP). Por outro lado, observa-se o alto consumo de aço nas treliças arqueadas (TA) para todos os modelos. A tipologia treliça de banzos paralelos (BP) também apresentou taxas elevadas de consumo de aço para as solicitações propostas.

Ressalta-se que, para todos os perfis estudados, considerando as quatro tipologias e todas as variáveis, para o vão livre de 16 metros, as taxas de consumo de aço têm valores muito próximos, no intervalo de 0,5 a 1 kg/m². Para os demais intervalos percebe-se certa tendência de linearidade dos resultados, porém com grande variação de resultados entre as diversas tipologias.

Quando a tipologia triangular (TT) é empregada para o vão livre de 16 metros, nota-se, para os três tipos de perfis, uma tendência de declínio da taxa de aço empregada, o que sugere o emprego dessa tipologia na construção de galpões com essa largura.

Apesar da taxa de consumo de aço ser normalmente tomada como critério inicial para comparação das tipologias de galpões de uso geral, outros fatores devem ser considerados. Ao analisar as taxas de aço, os perfis cantoneira formados a frio mostram-se mais interessantes em grande parte dos modelos. Porém, esses perfis são mais susceptíveis a módulos de instabilidade, e, por essa razão, não são comumente utilizados em estruturas de telhado.

Quando descartadas as cantoneiras e verificada a comparação entre os perfis U e U_e nota-se uma variação considerável entre eles. Porém, na maioria dos casos, os valores das taxas de aço ficam muito próximos.

Revisitando os gráficos, ressalta-se a linearidade dos resultados quando se emprega o perfil U, principalmente para as tipologias BP e TP, o que sugere bons resultados em termos de aproximação do ponto ótimo e da escolha do perfil comercial com resistência muito próxima do esforço solicitante. Tais resultados proporcionam uma estimativa mais assertiva da quantidade de material empregado, evitando estruturas robustas onde não são necessárias.

Galpões com espaçamento entre as treliças de cobertura de 6 metros apresentam taxas menores de aço empregado para o modelo TP (treliça trapezoidal) para todos os vãos livres estudados. Para o espaçamento de 7,5 metros, a treliça triangular TT se destaca para os vãos livres de 20, 24 e 32 metros, sendo que para os demais vãos o modelo TP se mostra mais econômico. Para o espaçamento de 9 metros, a treliça triangular TT se destaca para todos os vãos, com exceção do vão de 16 metros, no qual o modelo TP prevalece com os melhores resultados. Essa comparação sugere que, quanto menor o espaçamento entre as treliças de cobertura do galpão, mais interessante será o emprego da tipologia TP, ao passo que quanto maior for esse espaçamento a adoção da tipologia TT mostra-se mais favorável.

Para realização desse trabalho, considerou-se os banzos, os montantes e as diagonais das treliças em distintos elementos, com o objetivo de se obter uma maior aproximação do ponto ótimo durante a rotina de otimização. Tal separação em elementos poderia sugerir a adoção de diferentes perfis numa mesma treliça com o intuito de se atingirem menores taxas de aço. No entanto, sob o ponto de vista de fabricação e montagem, a adoção de uma grande variedade de perfis em um mesmo elemento estrutural tenderia a elevar o custo de fabricação e dificultar ou até mesmo

inviabilizar a montagem, podendo superar a vantagem de racionalização requerida com a adoção de diferentes perfis para cada elemento da treliça.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros sugerem-se os seguintes temas:

- Avaliar a influência dos módulos de instabilidade em perfis cantoneira formados a frio;
- Realizar estudos que contemplem os custos de montagem das estruturas de cobertura para diferentes perfis formados a frio;
- Analisar sistemas estruturais para galpões industriais com ponte rolante;
- Empregar outras ferramentas de otimização em sistemas estruturais para galpões compostos por perfis formados a frio;
- Verificar o deslocamento em sistemas estruturais para galpões compostos por perfis formados a frio;
- Realizar análise econômica dos sistemas estruturais para galpões industriais.

REFERÊNCIAS

ANSYS. **Users Manual for revision 11.** Swanson Analysis Systems Inc. Inc., Houston, PA, 2010.

ANTUNES, D. S. **Otimização de Treliças Planas Baseada em Confiabilidade.** 2014. Trabalho de Diplomação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123: Forças Devidas ao Vento em Edificações.** Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800: Projeto de Estruturas de Aço e de Estrutura Mistas de Aço e Concreto de Edifícios.** Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14762: Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio.** Rio de Janeiro, 2010.

BASTOS, E. A. **Otimização de Seções Retangulares de Concreto Armado Submetidas à Flexo-Compressão Oblíqua Utilizando Algoritmos Genéticos.** 2004. Dissertação de Mestrado, UFRJ, 2004.

BECK, A. T. **Um Método para análise de Confiabilidade para Elementos Finitos.** 1999. Dissertação de Mestrado, UFSC, 1999.

BRASIL. **Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas.** Ministério da Industria e do Comércio. Secretaria de Tecnologia Industrial (MIC/STI). Brasília, 1986.

CARVALHO, P. R. M.; GRIGOLETTI, G.; BARBOSA, G.D. **Curso Básico de Perfis de Aço Formados a Frio,** 3ª Edição, Evangraf, Porto Alegre, 2014.

CARVALHO, L. N. M.; **Análise de Galpão em Estrutura Metálica: Avaliação das Ações do Vento Típicas para as Diversas Regiões Brasileiras.** 2017. Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, Ceará, 2017.

CHAN, S.L.; CHUI, P. P. T. **Non-Linear Static and Cyclic Analysis of Steel Frames with Semi-rigid Connections,** Elsevier, Oxford, 2000.

CHAVES, M. R. **Avaliação do Desempenho de Soluções Estruturas para Galpões Leves**. 2007. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, 2007.

CHEN, W. F.; KIM, S-E. **LRFD Steel Design using Advanced Analysis**. CRC Press, Inc., Florida, USA, 1997.

CORSO, L. L.; GOMES, H. M. **Otimização baseada em confiabilidade para minimização do peso das treliças**, Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Mecânica Computacional, 2008.

CROCE, S. E.; FERREIRA, E. G.; LEMONGE, A. C. C. **A Genetic Algorithm for Structural Optimization of Steel Truss Roofs**. XXV Cilamce, UFPE, Recife, PE. Brasil, 2004.

GERE, J.M. e WEAVER, J.W. **Análise de Estruturas Reticuladas**. 3º Edição, Guanabara, Rio de Janeiro, 1987.

GUERRA, C. **Otimização Paramétrica de Estruturas Treliçadas por Algoritmos Genéticos**. 2008. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS, 2008.

HAFTKA, R., GURDAL, Z. **Elements of Structural Optimization**, Kluwer Academics Publishers, 1991.

HOLTZ, G. C. C. **Traçado automático de envoltórias de esforços em Estruturas Planas utilizando um Algoritmo Evolucionário**. 2005. Dissertação de Mestrado, PUC-RIO, 2005.

MACHADO, F. C. S. **Análise Inelástica de Segunda Ordem de Sistemas Estruturais Metálicos**. 2005. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, 2005.

MARINHO, I. J. P. **Otimização de estruturas via Ansys**. 2004. Tese de Doutorado, PUC RIO. Sistema Maxwell. Cap. 04.

OLIVIERI, B. P. **Otimização do Projeto de Pontes Protendidas Pré-moldadas pelo método dos Algoritmos Genéticos**. 2004. Dissertação de Mestrado, UFRJ, 2004.

PINHO, F. O. **Galpões em Pórticos de Aço**. Construção Metálica, n.70. p.21-27. Mai-Jun, 2005.

PRAVIA, Z. M. C.; CHIARELLO, J. A. Programa Visual Ventos: Determinação de forças devidas ao vento em edificações de base retangular e cobertura a duas águas segundo a NBR 6123. **COBENGE – XXXI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**, 2003, Rio de Janeiro. p. 1-9.

NOGUEIRA, G.S. **Avaliação de Soluções Industriais para Galpões compostos por perfis de aço formados a frio**. 2009. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, 2009.

RODRIGUES, T.A. **Dimensionamento Otimizado de Vigas Mistas Aço-Concreto**. 2018. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, 2018.

SALES, J. J.; MUNAIAR NETO, J.; MALITE, M.; GONÇALVES, R. M. **Cobertura em Arco Metálico Treliçado – Exemplo de Cálculo**. São Carlos: SET/ESSC/USP, 1994.

SANTOS, A. F. dos. **Estruturas Metálicas – Projeto e Detalhes para Fabricação**, McGraw Hill do Brasil, São Paulo, 1977.

SELKE, C. A. C.; PEREIRA, L. T. V.; FONSECA, J. S. O.; MARCZAK, R. J.; ALVES, D. B.; LUERSEN, M. A. **Apostila de Elementos Finitos utilizada na Disciplina de Análise Estrutural Avançada**. UFRGS, 2002.

SOMMER, R.C. **Otimização de Estruturas por Algoritmos Genéticos Submetidas a Restrições de Flexibilidade e Flambagem**. 2010. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UTRGS, 2010.

SOUZA, R. P. **Otimização de Treliças com Restrição de Falha Combinando Técnicas de Programação de Algoritmos Contínuos e Discretos**. 2009. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS, 2009.

SOUZA, T. N. **Otimização de Pórticos com Programação Linear Sequencial**. 2012. Trabalho de Diplomação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS, 2012.

SOUZA, F. T. **Análise teórico-experimental da estabilidade de colunas perfuradas em perfis de aço formados a frio de seções tipo rack**. 2013. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, 2013.

VAZ, L. E. **Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas**, Editora Campus, Rio de Janeiro, 2009.

ANEXO

ANEXO 01 – Tabelas de Perfis Formados a Frio (CARVALHO et al., 2014)

Perfil	P	A
U	(kg/m)	(cm ²)
50 x 25 x 1,20	0,9	1,15
50 x 25 x 1,50	1,12	1,43
50 x 25 x 2,00	1,47	1,87
50 x 25 x 2,25	1,64	2,08
50 x 25 x 2,65	1,9	2,42
50 x 25 x 3,00	2,12	2,7
75 x 40 x 1,20	1,42	1,81
75 x 40 x 1,50	1,77	2,25
75 x 40 x 2,00	2,33	2,97
75 x 40 x 2,25	2,61	3,32
75 x 40 x 2,65	3,04	3,88
75 x 40 x 3,00	3,42	4,35
75 x 40 x 3,35	3,79	4,82
75 x 40 x 3,75	4,2	5,35
75 x 40 x 4,25	4,71	5,99
75 x 40 x 4,75	5,2	6,62
100 x 40 x 1,20	1,66	2,11
100 x 40 x 1,50	2,06	2,63
100 x 40 x 2,00	2,72	3,47
100 x 40 x 2,25	3,05	3,88
100 x 40 x 2,65	3,56	4,54
100 x 40 x 3,00	4,01	5,1
100 x 40 x 3,35	4,44	5,66
100 x 40 x 3,75	4,94	6,29
100 x 40 x 4,25	5,54	7,06
100 x 40 x 4,75	6,13	7,81
100 x 40 x 6,3	7,88	10,04
100 x 50 x 1,2	1,85	2,35
100 x 50 x 1,5	2,3	2,93
100 x 50 x 2	3,04	3,87
100 x 50 x 2,25	3,4	4,33
100 x 50 x 2,65	3,98	5,07

Perfil	P	A
U	(kg/m)	(cm ²)
100 x 50 x 3	4,48	5,7
100 x 50 x 3,35	4,97	6,33
100 x 50 x 3,75	5,52	7,04
100 x 50 x 4,25	6,21	7,91
100 x 50 x 4,75	6,88	8,76
100 x 50 x 6,3	8,87	11,3
100 x 75 x 2,65	5,02	6,39
100 x 75 x 3	5,66	7,2
100 x 75 x 3,35	6,28	8,01
100 x 75 x 3,75	7	8,91
100 x 75 x 4,25	7,87	10,03
100 x 75 x 4,75	8,74	11,13
100 x 75 x 6,3	11,34	14,45
100 x 75 x 8,00	13,83	17,62
125 x 50 x 1,2	2,08	2,65
125 x 50 x 1,5	2,59	3,3
125 x 50 x 2	3,43	4,37
125 x 50 x 2,25	3,84	4,9
125 x 50 x 2,65	4,5	5,73
125 x 50 x 3	5,07	6,45
125 x 50 x 3,35	5,63	7,17
125 x 50 x 3,75	6,26	7,98
125 x 50 x 3,25	7,04	8,97
125 x 50 x 4,75	7,81	9,95
125 x 50 x 6,3	10,1	12,87
300 x 100 x 2,65	10,22	13,02
300 x 100 x 3	11,54	14,7
300 x 100 x 3,35	12,86	16,38
300 x 100 x 3,75	14,36	18,29
300 x 100 x 4,25	16,22	20,66
300 x 100 x 4,75	18,06	23,01
300 x 100 x 6,3	23,7	30,2
300 x 100 x 8	29,53	37,62

Perfil	P (kg/m)	A (cm ²)
Ue		
50 x 25 x 10 x 1,20	1,06	1,35
50 x 25 x 10 x 1,50	1,3	1,65
50 x 25 x 10 x 2,00	1,68	2,14
50 x 25 x 10 x 2,25	1,86	2,37
50 x 25 x 10 x 2,65	2,13	2,72
50 x 25 x 10 x 3,00	2,36	3,01
75 x 40 x 15 x 1,20	1,67	2,13
75 x 40 x 15 x 1,50	2,06	2,63
75 x 40 x 15 x 2,00	2,7	3,44
75 x 40 x 15 x 2,25	3,01	3,83
75 x 40 x 15 x 2,65	3,49	4,44
75 x 40 x 15 x 3,00	3,89	4,96
100 x 40 x 17 x 1,20	1,94	2,47
100 x 40 x 17 x 1,50	2,4	3,06
100 x 40 x 17 x 2,00	3,15	4,02
100 x 40 x 17 x 2,25	3,52	4,48
100 x 40 x 17 x 2,65	4,09	5,21
100 x 40 x 17 x 3,00	4,58	5,83
100 x 40 x 17 x 3,35	5,05	6,43
100 x 50 x 17 x 1,20	2,13	2,71
100 x 50 x 17 x 1,50	2,64	3,36
100 x 50 x 17 x 2,00	3,47	4,42
100 x 50 x 17 x 2,25	3,87	4,93
100 x 50 x 17 x 2,65	4,51	5,74
100 x 50 x 17 x 3,00	5,05	6,43
100 x 50 x 17 x 3,35	5,57	7,1
125 x 50 x 17 x 2,00	3,86	4,92
125 x 50 x 17 x 2,25	4,31	5,49
125 x 50 x 17 x 2,65	5,03	6,4
125 x 50 x 17 x 3,00	5,63	7,18
125 x 50 x 17 x 3,35	6,23	7,94
125 x 50 x 20 x 3,75	7,08	9,01

Perfil	P (kg/m)	A (cm ²)
Ue		
150 x 60 x 20 x 2,00	4,66	5,94
150 x 60 x 20 x 2,25	5,21	6,64
150 x 60 x 20 x 2,65	6,09	7,75
150 x 60 x 20 x 3,00	6,84	8,71
150 x 60 x 20 x 3,35	7,57	9,65
150 x 60 x 20 x 3,75	8,4	10,7
150 x 60 x 20 x 4,25	9,41	11,99
150 x 60 x 20 x 4,75	10,39	13,24
200 x 75 x 20 x 2,00	5,92	7,54
200 x 75 x 20 x 2,25	6,63	8,44
200 x 75 x 25 x 2,65	7,75	9,87
200 x 75 x 25 x 3,00	8,72	11,11
200 x 75 x 25 x 3,35	9,68	12,33
200 x 75 x 25 x 3,75	10,75	13,7
200 x 75 x 25 x 4,25	12,08	15,39
200 x 75 x 25 x 4,75	13,38	17,04
200 x 75 x 30 x 6,30	18,23	23,22
300 x 85 x 25 x 2,25	7,96	10,14
300 x 85 x 25 x 2,00	8,92	11,37
300 x 85 x 25 x 2,65	10,45	13,32
300 x 85 x 25 x 3,00	11,78	15,01
300 x 85 x 25 x 3,35	13,1	16,68
300 x 85 x 25 x 3,75	14,58	18,58
300 x 85 x 25 x 4,25	16,42	20,91
300 x 85 x 25 x 4,75	18,23	23,22
300 x 85 x 25 x 6,3	24,16	30,78
300 x 100 x 25 x 2,65	11,08	14,11
300 x 100 x 25 x 3,00	12,49	15,91
300 x 100 x 25 x 3,35	13,88	17,69
300 x 100 x 25 x 3,75	15,46	19,7
300 x 100 x 25 x 4,25	17,42	22,19
300 x 100 x 25 x 4,75	19,34	24,64

Perfil	P (kg/m)	A (cm ²)
Cantoneira		
30 x 2	0,89	1,13
30 x 2,25	0,99	1,27
30 x 2,65	1,16	1,47
30 x 3	1,3	1,65
40 x 2	1,2	1,53
40 x 2,25	1,35	1,72
40 x 2,65	1,57	2
40 x 3	1,77	2,25
50 x 2	1,52	1,93
50 x 2,25	1,7	2,17
50 x 2,65	1,99	2,53
50 x 3	2,24	2,85
50 x 3,35	2,48	3,17
50 x 3,75	2,76	3,52
50 x 4,25	3,1	3,95
50 x 4,75	3,44	4,38
50 x 6,3	4,43	5,65
60 x 2	1,83	2,33
60 x 2,25	2,05	2,62
60 x 2,65	2,41	3,06
60 x 3	2,71	3,45
60 x 3,35	3,01	3,84
60 x 3,75	3,35	4,27
60 x 4,25	3,77	4,8
60 x 4,75	4,18	5,33
60 x 6,3	5,42	6,91
80 x 3	3,65	4,65
80 x 3,35	4,06	5,18
80 x 3,75	4,53	5,77
80 x 4,25	5,1	6,5
80 x 4,75	5,67	7,23
80 x 6,3	7,4	9,43
80 x 8	9,11	11,61

Perfil	P (kg/m)	A (cm ²)
Catoneira		
100 x 3,75	5,71	7,27
100 x 4,25	6,44	8,2
100 x 4,75	7,17	9,13
100 x 6,3	9,38	11,95
100 x 8	11,63	14,81
100 x 9,5	13,6	17,32
100 x 12,5	17,35	22,1
125 x 4,75	9,03	11,5
125 x 6,3	11,85	15,1
125 x 8	14,77	18,81
125 x 9,5	17,33	22,07
125 x 12,5	22,25	28,35
125 x 16	27,67	35,24
150 x 4,75	10,9	13,88
150 x 6,3	14,32	18,25
150 x 8	17,91	22,81
150 x 9,5	21,06	26,82
150 x 12,5	27,16	34,6
150 x 16	33,95	43,24
175 x 4,75	12,76	16,25
175 x 6,3	16,8	21,4
175 x 8	21,05	26,81
175 x 9,5	24,78	31,57
175 x 12,5	32,06	40,85
175 x 16	40,23	51,24
200 x 4,75	14,62	18,63
200 x 6,3	19,27	24,55
200 x 8	24,19	30,81
200 x 9,5	28,51	36,32
200 x 12,5	36,97	47,1
200 x 16	46,51	59,24
200 x 19	54,39	69,29

APÊNDICES

APÊNDICE 01 – Solicitações de Cargas (AUTORA, 2018)

	TIPOLOGIA			TRELIÇA ARQUEADA						
	Distância entre pórticos (m)	Banzos	Largura seção transversal (m)	Cargas - nós extremos (kN)	Cargas - Demais nós (kN)	Cargas - nós extremos (kN)	Cargas - Demais nós (kN)	Cargas - nós extremos (kN)	Cargas - Demais nós (kN)	
				Perfil U enrijecido		Perfil U		Perfil Cantoneira		
COMBINAÇÃO ÚLTIMA NORMAL OU DE CONSTRUÇÃO- V = 90°	6	Superior	16	2,49	4,98	2,39	4,79	2,14	4,28	
			20	3,24	6,47	3,14	6,28	2,89	5,77	
			24	3,41	6,82	3,31	6,63	3,06	6,12	
			28	3,41	6,82	3,31	6,63	3,06	6,12	
			32	3,59	7,17	3,49	6,98	3,24	6,47	
	7,5		16	3,16	6,32	3,23	6,46	2,81	5,62	
			20	4,09	8,19	4,16	8,32	3,74	7,49	
			24	4,31	8,62	4,38	8,76	3,96	7,92	
			28	4,31	8,62	4,38	8,76	3,96	7,92	
			32	4,53	9,06	4,60	9,20	4,18	8,36	
	9		16	3,83	7,66	4,06	8,13	3,48	6,96	
			20	4,95	9,90	5,18	10,37	4,60	9,20	
			24	5,21	10,43	5,45	10,89	4,86	9,72	
			28	5,21	10,43	5,45	10,89	4,86	9,72	
			32	5,48	10,95	5,71	11,42	5,13	10,25	
	6		Inferior	16	5,01	11,73	4,82	10,11	4,31	9,22
				20	5,76	13,22	5,57	11,61	5,06	10,72
				24	5,93	13,57	5,74	11,95	5,23	11,06
				28	5,93	13,57	5,74	11,95	5,23	11,06
				32	6,11	13,92	5,92	12,31	5,41	11,42
	7,5			16	6,36	13,23	6,50	13,47	5,66	12,00
				20	7,29	15,10	7,43	15,34	6,59	13,87
				24	7,51	15,53	7,65	15,77	6,81	14,31
				28	7,51	15,53	7,65	15,77	6,81	14,31
				32	7,73	15,97	7,87	16,22	7,03	14,75
9	16	7,71		16,01	8,18	16,83	7,01	14,79		
	20	8,83		18,25	9,30	19,07	8,13	17,02		
	24	9,09		18,77	9,56	19,59	8,39	17,55		
	28	9,09		18,77	9,56	19,59	8,39	17,55		
	32	9,36		19,30	9,82	20,12	8,66	18,08		

TIPOLOGIA		TRELIÇA TRAPEZOIDAL								
Distância entre pórticos (m)	Banzos	Largura seção transversal (m)	Cargas - nós extremos (kN)	Cargas - Demais nós (kN)	Cargas - nós extremos (kN)	Cargas - Demais nós (kN)	Cargas - nós extremos (kN)	Cargas - Demais nós (kN)		
			Perfil U enrijecido		Perfil U		Perfil Cantoneira			
COMBINAÇÃO ÚLTIMA NORMAL OU DE CONSTRUÇÃO- V = 90°	6	Superior	16	4,26	8,52	4,17	8,33	3,91	7,82	
			20	4,35	8,70	4,25	8,51	4,00	8,00	
			24	4,46	8,93	4,37	8,73	4,11	8,22	
			28	4,55	9,10	4,46	8,91	4,20	8,40	
			32	4,64	9,28	4,55	9,09	4,29	8,58	
	7,5		16	5,38	10,76	5,45	10,90	5,03	10,06	
			20	5,49	10,98	5,56	11,12	5,14	10,28	
			24	5,63	11,25	5,70	11,39	5,28	10,55	
			28	5,74	11,48	5,81	11,62	5,39	10,78	
			32	5,85	11,70	5,92	11,84	5,50	11,00	
	9		16	6,48	12,95	6,71	13,42	6,13	12,25	
			20	6,63	13,27	6,87	13,74	6,28	12,57	
			24	6,79	13,58	7,02	14,05	6,44	12,88	
			28	6,93	13,85	7,16	14,32	6,57	13,15	
			32	7,06	14,12	7,29	14,59	6,71	13,42	
	6		Inferior	16	6,78	14,25	6,59	13,94	6,08	13,13
				20	6,87	14,43	6,68	14,12	6,17	13,31
				24	6,98	14,65	6,79	14,34	6,28	13,53
				28	7,07	14,83	6,88	14,52	6,37	13,71
				32	7,16	15,01	6,97	14,70	6,46	13,89
7,5	16	8,58		17,98	8,72	18,20	7,88	16,85		
	20	8,69		18,20	8,83	18,42	7,99	17,08		
	24	8,83		18,47	8,96	18,69	8,13	17,35		
	28	8,94		18,69	9,08	18,91	8,24	17,57		
	32	9,05		18,92	9,19	19,14	8,35	17,80		
9	16	10,36		21,66	10,82	22,41	9,66	20,54		
	20	10,51		21,97	10,98	22,72	9,81	20,85		
	24	10,67		22,29	11,14	23,03	9,97	21,17		
	28	10,80		22,56	11,27	23,30	10,10	21,43		
	32	10,94		22,82	11,41	23,57	10,24	21,70		

	TIPOLOGIA			TRELIÇA TRIANGULAR					
	Distância entre pórticos (m)	Banzos	Largura seção transversal (m)	Cargas - nós extremos (kN)	Cargas - Demais nós (kN)	Cargas - nós extremos (kN)	Cargas - Demais nós (kN)	Cargas - nós extremos (kN)	Cargas - Demais nós (kN)
				Perfil U enrijecido		Perfil U		Perfil Cantoneira	
COMBINAÇÃO ÚLTIMA NORMAL OU DE CONSTRUÇÃO- V = 90°	6	Superior	16		8,52		7,82		7,82
			20		8,70		8,00		8,00
			24		8,93		8,22		8,22
			28		9,10		8,40		8,40
			32		9,28		8,58		8,58
	7,5		16		10,76		10,06		10,06
			20		10,98		10,28		10,28
			24		11,25		10,55		10,55
			28		11,48		10,78		10,78
			32		11,70		11,00		11,00
	9		16		12,95		12,25		12,25
			20		13,27		12,57		12,57
			24		13,58		12,88		12,88
			28		13,85		13,15		13,15
			32		14,12		13,42		13,42
	6	Inferior	16	7,64	14,25	7,29	13,13	7,29	13,13
			20	7,73	14,43	7,38	13,31	7,38	13,31
			24	7,84	14,65	7,49	13,53	7,49	13,53
			28	7,93	14,83	7,58	13,71	7,58	13,71
			32	8,02	15,01	7,67	13,89	7,67	13,89
	7,5		16	9,60	17,98	9,25	16,85	9,25	16,85
			20	9,71	18,20	9,36	17,08	9,36	17,08
			24	9,85	18,47	9,50	17,35	9,50	17,35
			28	9,96	18,69	9,61	17,57	9,61	17,57
32			10,07	18,92	9,72	17,80	9,72	17,80	
9	16		11,54	21,66	11,19	20,54	11,19	20,54	
	20		11,70	21,97	11,35	20,85	11,35	20,85	
	24		11,85	22,29	11,50	21,17	11,50	21,17	
	28		11,99	22,56	11,64	21,43	11,64	21,43	
	32		12,12	22,82	11,77	21,70	11,77	21,70	

	TIPOLOGIA			TRELIÇA BANZOS PARALELOS					
	Distância entre pórticos (m)	Banzos	Largura seção transversal (m)	Cargas - nós extremos (KN)	Cargas - Demais nós (KN)	Cargas - nós extremos (KN)	Cargas - Demais nós (KN)	Cargas - nós extremos (KN)	Cargas - Demais nós (KN)
				Perfil U enrijecido		Perfil U		Perfil Cantoneira	
COMBINAÇÃO ÚLTIMA NORMAL OU DE CONSTRUÇÃO- V = 90°	6	Superior	16	4,26	8,52	4,17	8,33	3,91	7,82
			20	4,35	8,70	4,25	8,51	4,00	8,00
			24	4,46	8,93	4,37	8,73	4,11	8,22
			28	4,55	9,10	4,46	8,91	4,20	8,40
			32	4,64	9,28	4,55	9,09	4,29	8,58
	7,5		16	5,38	10,76	5,28	10,57	5,03	10,06
			20	5,49	10,98	5,40	10,79	5,14	10,28
			24	5,63	11,25	5,53	11,06	5,28	10,55
			28	5,74	11,48	5,64	11,29	5,39	10,78
			32	5,85	11,70	5,75	11,51	5,50	11,00
	9	16	6,48	12,95	6,38	12,76	6,13	12,25	
		20	6,63	13,27	6,54	13,08	6,28	12,57	
		24	6,79	13,58	6,69	13,39	6,44	12,88	
		28	6,93	13,85	6,83	13,66	6,57	13,15	
		32	7,06	14,12	6,96	13,93	6,71	13,42	
	6	Inferior	16	6,78	14,33	6,59	14,04	6,08	13,25
			20	6,87	14,51	6,68	14,21	6,17	13,43
			24	6,98	14,74	6,79	14,44	6,28	13,65
			28	7,07	14,92	6,88	14,62	6,37	13,83
			32	7,16	15,10	6,97	14,80	6,46	14,01
	7,5		16	8,58	18,08	8,39	17,78	7,88	16,99
			20	8,69	18,30	8,50	18,00	7,99	17,22
			24	8,83	18,57	8,63	18,27	8,13	17,48
			28	8,94	18,79	8,75	18,50	8,24	17,71
32			9,05	19,02	8,86	18,72	8,35	17,93	
9	16	10,36	21,78	10,16	21,48	9,66	20,69		
	20	10,51	22,09	10,32	21,79	9,81	21,00		
	24	10,67	22,41	10,48	22,11	9,97	21,32		
	28	10,80	22,67	10,61	22,38	10,10	21,59		
	32	10,94	22,94	10,75	22,64	10,24	21,86		

APÊNDICE 02 – APDL do modelo BP-16-6 – Perfil U

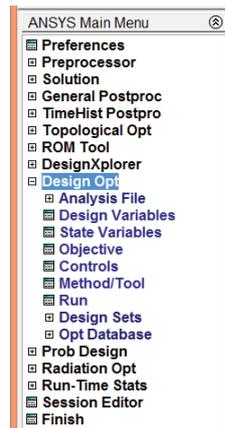
APDL – Análise da Estrutura – Modelo BP-16-6 Perfil U	
<p>! Indicação da área inicial da seção transversal do Perfil</p> <p>*SET, A1,37.62 *SET, A2,37.62 *SET, A3,37.62</p> <p>/PREP7</p> <p>! Definição do tipo de elemento</p> <p>ET,1,LINK8</p> <p>! Definição das constantes reais para os três elementos: banzos, diagonais e montantes</p> <p>R,1,A1, , R,2,A2, , R,3,A3, ,</p> <p>!Definição das propriedades dos materiais</p> <p>MPTEMP,,,,,,,,, MPTEMP,1,0 MPDATA,EX,1,,2.1e6 MPDATA,PRXY,1,,0.3</p> <p>!Criação dos nós</p> <p>N,1,,,,,,,,, N,2,2,0.2,,,,, N,3,4,0.4,,,,, N,4,6,0.6,,,,, N,5,8,0.8,,,,, N,6,10,0.6,,,,, N,7,12,0.4,,,,, N,8,14,0.2,,,,, N,9,16,0,,,,, N,10,1,0.8,,,,, N,10,0,0.8,,,,, N,11,2,1,,,,, N,12,4,1.2,,,,, N,13,6,1.4,,,,, N,14,8,1.6,,,,, N,15,10,1.4,,,,, N,16,12,1.2,,,,, N,17,14,1,,,,, N,18,16,0,,,,, N,18,16,0.8,,,,,</p>	<p>! Criação dos elementos</p> <p>SECNUM, TSHAP,LINE TYPE, 1 MAT, 1 REAL, 1 !Banzos ESYS, 0</p> <p>e,1,2 e,2,3 e,3,4 e,4,5 e,5,6 e,6,7 e,7,8 e,8,9 e,10,11 e,11,12 e,12,13 e,13,14 e,14,15 e,15,16 e,16,17 e,17,18</p> <p>TYPE, 1 MAT, 1 REAL, 2 ! Montantes ESYS, 0</p> <p>SECNUM, TSHAP,LINE</p> <p>e,1,10 e,2,11 e,3,12 e,4,13 e,5,14 e,6,15 e,7,16 e,8,17 e,9,18</p> <p>TYPE, 1 MAT, 1 REAL, 3 ! Diagonais ESYS, 0</p> <p>SECNUM, TSHAP,LINE</p> <p>e,1,11 e,2,12</p>

<p>e,3,13 e,4,14 e,14,6 e,15,7 e,16,8 e,17,9</p> <p>FINISH /SOL /GO</p> <p>!Definição das Condições de Apoio</p> <p>D,1, , , , , UX, UY, , , , /GO D,9, , , , , UY, , , , , /GO</p> <p>!Aplicação de cargas</p> <p>F,1,FY,6.59 F,2,FY,14.04 F,3,FY,14.04 F,4,FY,14.04 F,5,FY,14.04 F,6,FY,14.04 F,7,FY,14.04 F,8,FY,14.04 F,9,FY,6.59 F,10,FY,4.17 F,11,FY,8.33 F,12,FY,8.33 F,13,FY,8.33 F,14,FY,8.33 F,15,FY,8.33 F,16,FY,8.33 F,17,FY,8.33 F,18,FY,4.17 /GO</p> <p>!Solucionar</p> <p>SOLVE</p> <p>!Definição do volume</p> <p>/POST1 ETABLE,VOL,VOLU, SSUM *GET,VOLUME,SSUM, ,ITEM,VOL</p>	<p>!Definição do Esforço Axial – SAXL</p> <p>ETABLE,SAXL,LS,1</p> <p>*GET,SAXL1,ELEM,1,ETAB,SAXL *GET,SAXL2,ELEM,2,ETAB,SAXL *GET,SAXL3,ELEM,3,ETAB,SAXL *GET,SAXL4,ELEM,4,ETAB,SAXL *GET,SAXL5,ELEM,5,ETAB,SAXL *GET,SAXL6,ELEM,6,ETAB,SAXL *GET,SAXL7,ELEM,7,ETAB,SAXL *GET,SAXL8,ELEM,8,ETAB,SAXL *GET,SAXL9,ELEM,9,ETAB,SAXL *GET,SAXL10,ELEM,10,ETAB,SAXL *GET,SAXL11,ELEM,11,ETAB,SAXL *GET,SAXL12,ELEM,12,ETAB,SAXL *GET,SAXL13,ELEM,13,ETAB,SAXL *GET,SAXL14,ELEM,14,ETAB,SAXL *GET,SAXL15,ELEM,15,ETAB,SAXL *GET,SAXL16,ELEM,16,ETAB,SAXL *GET,SAXL17,ELEM,17,ETAB,SAXL *GET,SAXL18,ELEM,18,ETAB,SAXL *GET,SAXL19,ELEM,19,ETAB,SAXL *GET,SAXL20,ELEM,20,ETAB,SAXL *GET,SAXL21,ELEM,21,ETAB,SAXL *GET,SAXL22,ELEM,22,ETAB,SAXL *GET,SAXL23,ELEM,23,ETAB,SAXL *GET,SAXL24,ELEM,24,ETAB,SAXL *GET,SAXL25,ELEM,25,ETAB,SAXL *GET,SAXL26,ELEM,26,ETAB,SAXL *GET,SAXL27,ELEM,27,ETAB,SAXL *GET,SAXL28,ELEM,28,ETAB,SAXL *GET,SAXL29,ELEM,29,ETAB,SAXL *GET,SAXL30,ELEM,30,ETAB,SAXL *GET,SAXL31,ELEM,31,ETAB,SAXL *GET,SAXL32,ELEM,32,ETAB,SAXL *GET,SAXL33,ELEM,33,ETAB,SAXL</p>
--	---

APÊNDICE 03 – Tutorial do Módulo de Otimização do Ansys (AUTORA, 2018)

O processo de otimização no Ansys é resolvido na Aba **Design Opt**, conforme ilustrado na Figura 01.

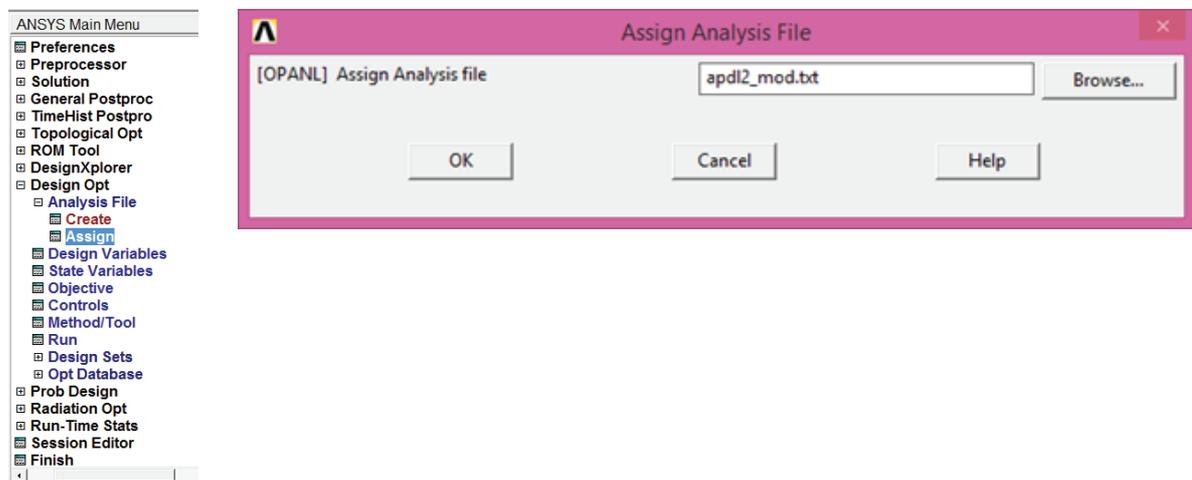
Figura 01- Menu de otimização



Uma importante observação a ser feita é que, antes de qualquer operação, o elemento deve ser criado no Ansys com todas as condições de apoio, carregamento etc. Em seguida ele deve ser analisado para que as variáveis (projeto, estado e função objetivo) se tornem parâmetros de base para a otimização.

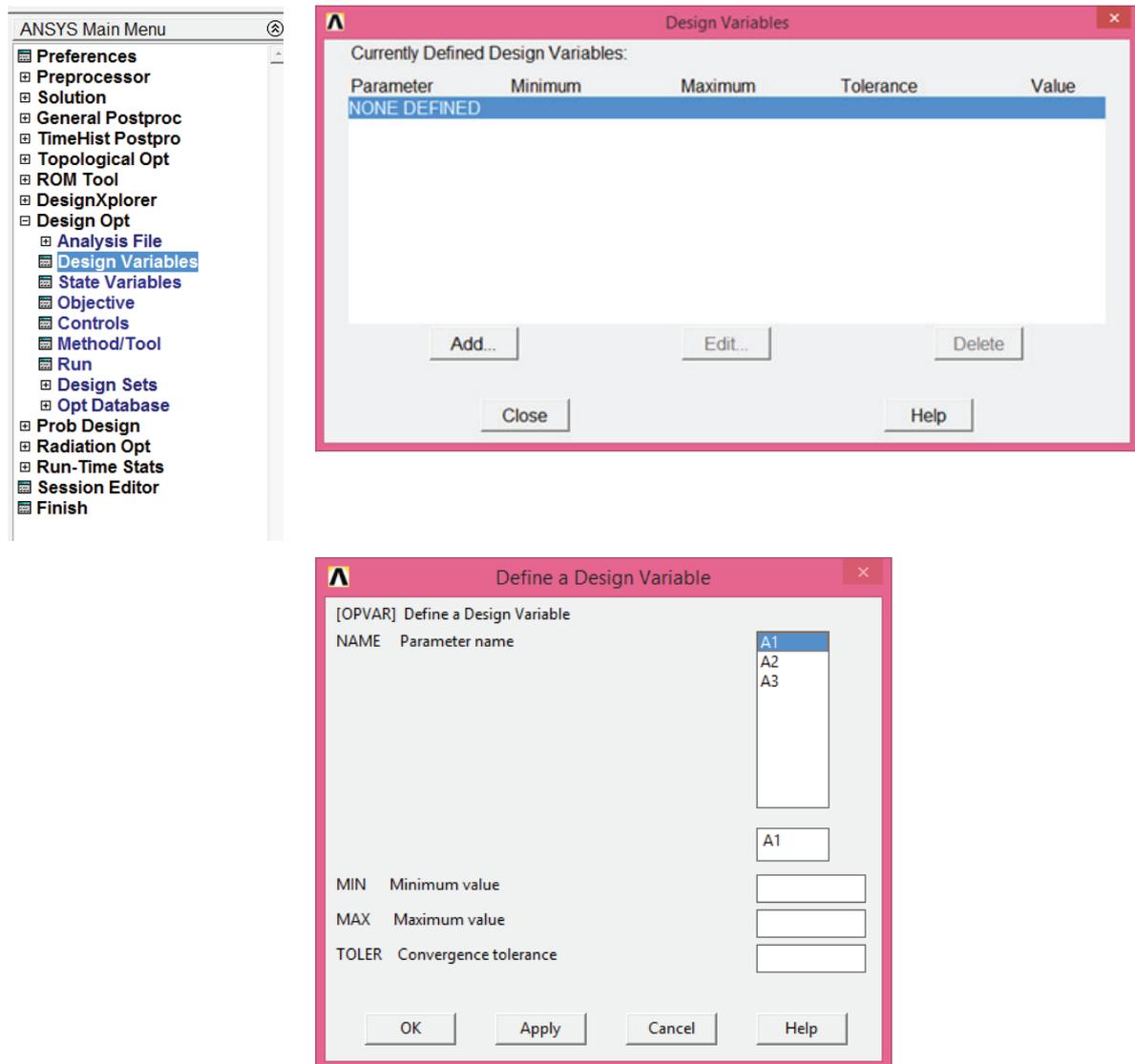
Assim, é necessário importar o arquivo de análise para o módulo de otimização, ou, a APDL que foi escrita durante o processo de criação e análise da estrutura, conforme ilustrado nas Figuras 02 e 03.

Figuras 02 e 03- Importando a APDL



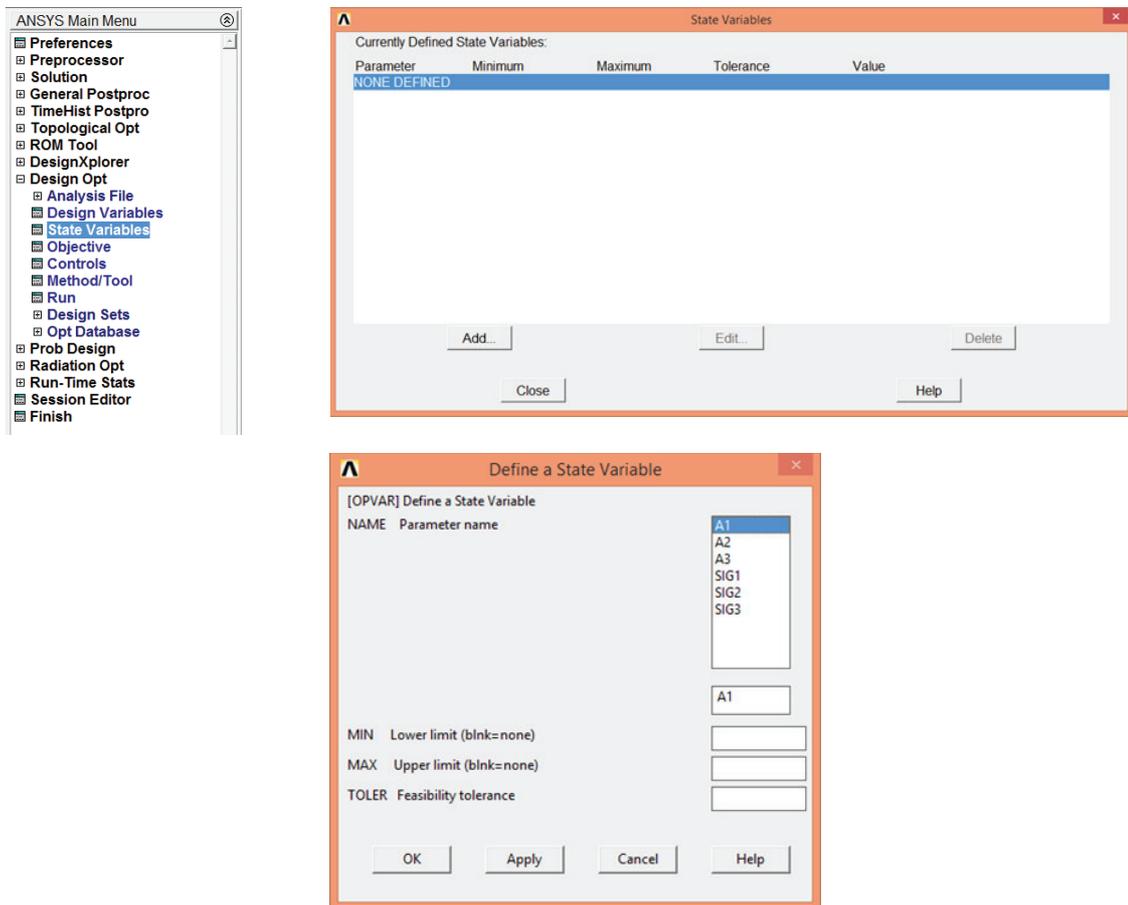
O próximo passo é definir os limites e a tolerância das **variáveis de projeto** conforme já parametrizadas na análise da estrutura. Ressalta-se que não se definem variáveis de projeto com valores menores que zero. Nas Figuras 04, 05 e 06 trazem uma sequência de imagens ilustrando o processo.

Figuras 04, 05 e 06- Definição das variáveis de projeto



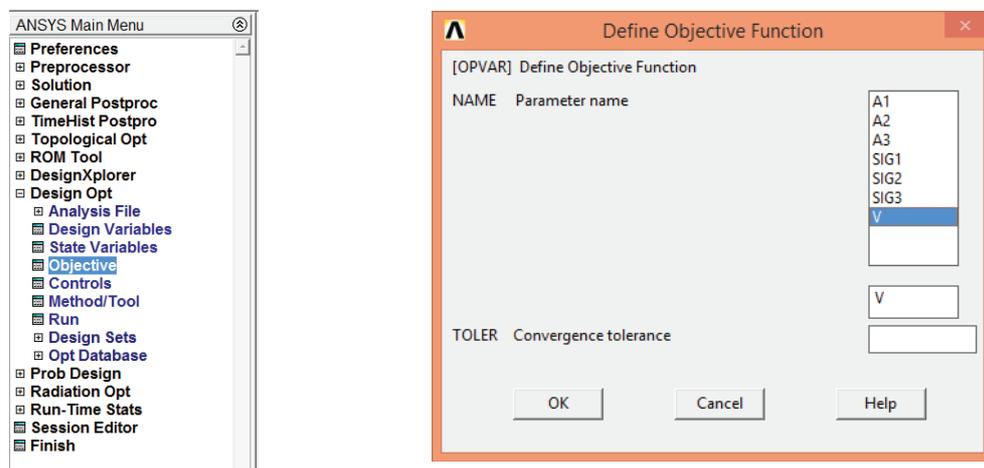
Em seguida, serão definidos os limites e a tolerância das **variáveis de estado** conforme já parametrizadas na análise da estrutura, conforme demonstrado na sequência de imagens das Figuras 07, 08 e 09.

Figuras 07, 08 e 09 - Definição das variáveis de estado



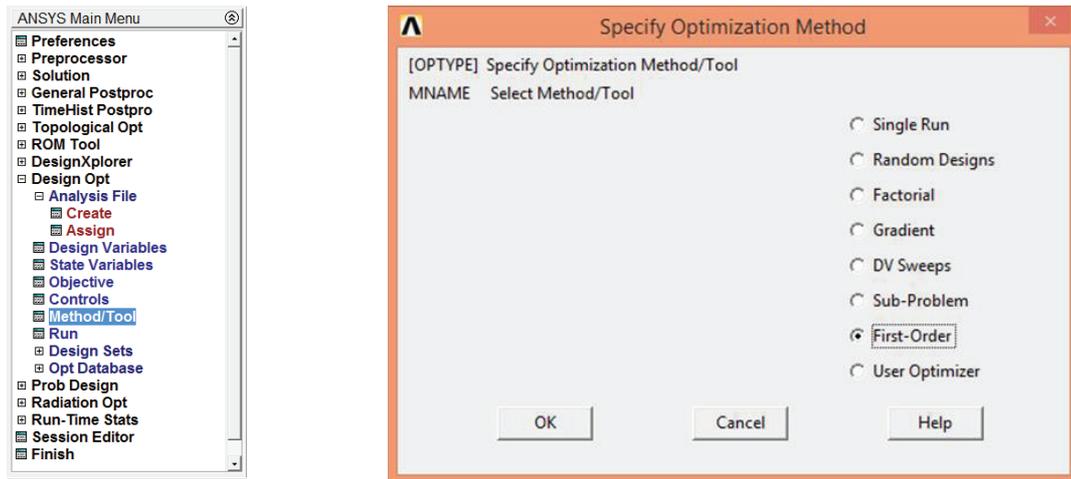
Por último, define-se a **função objetivo**, bem como seu limite. Ressalta-se que a função objetivo é sempre minimizada no Ansys. Nas Figuras 10 e 11 ilustra-se o processo:

Figuras 10 e 11 - Definição da função objetivo



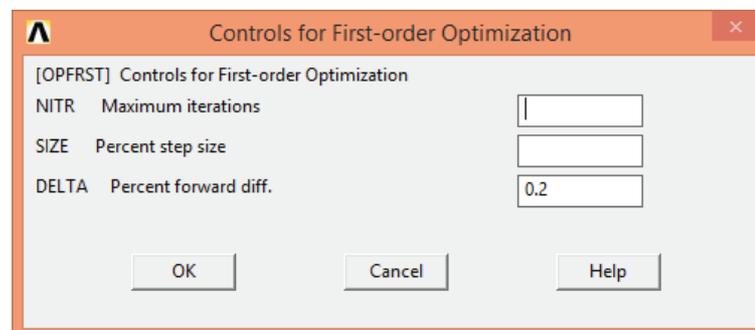
Após definidas as variáveis e a função objetivo, deve-se especificar o método de otimização a ser utilizado. Nas Figuras 12 e 13, mostra-se como escolher um dos possíveis métodos de otimização disponíveis no programa.

Figuras 12 e 13 - Métodos de Otimização



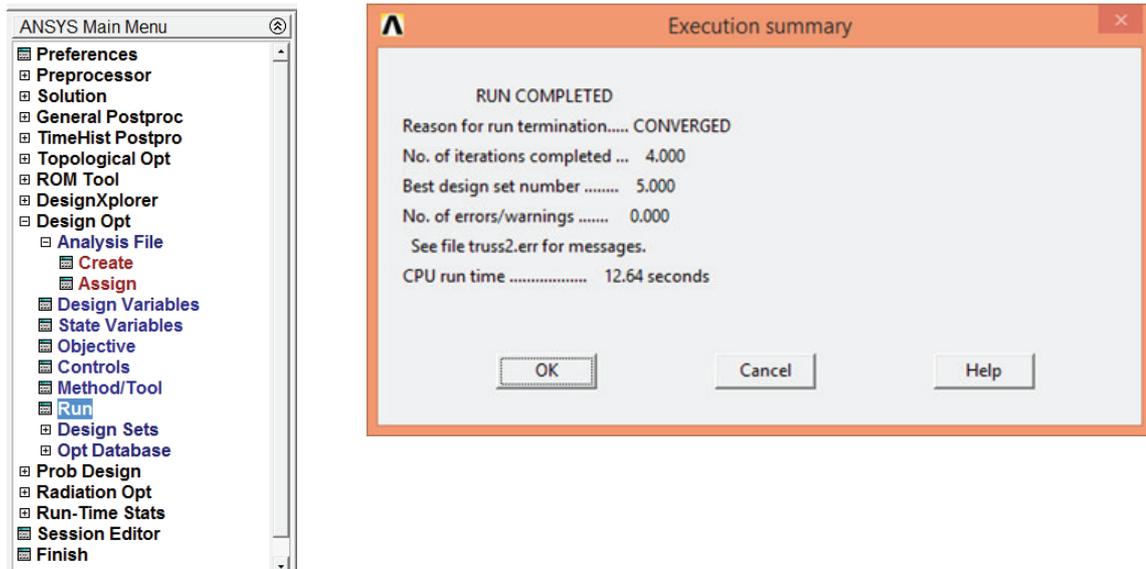
Após selecionado o método, deve-se definir o número de interações máximo para tentativa de convergência. Também define-se a porcentagem das pesquisas de linha, geralmente utilizado o padrão de 100%, e ainda o percentual de diferença de frente aplicada ao intervalo da variável de projeto que é usado para calcular o gradiente. O padrão do Ansys para esse parâmetro é 0,2%. Na Figura 14 mostra-se a caixa de definição dos controles de otimização.

Figura 14 - Controles da Otimização



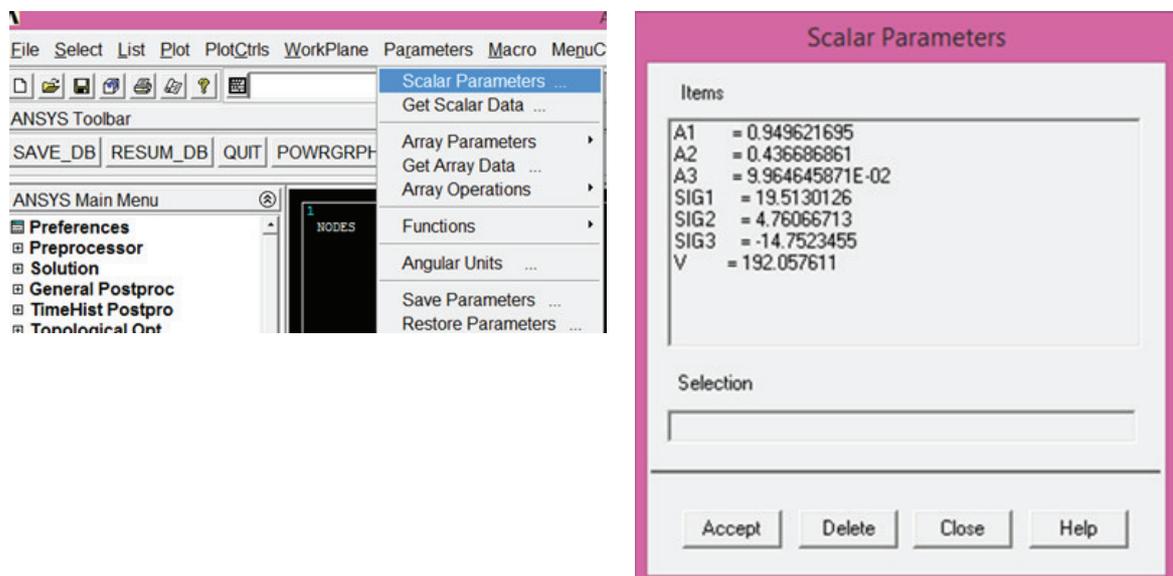
Após todas as definições, inicia-se o processo de otimização. O programa retornará com a quantidade de interações, os erros e o tempo de processamento. Nas Figuras 15 e 16 ilustram a execução da otimização propriamente dita, bem como um resumo do processo.

Figuras 15 e 16 - Execução da Otimização



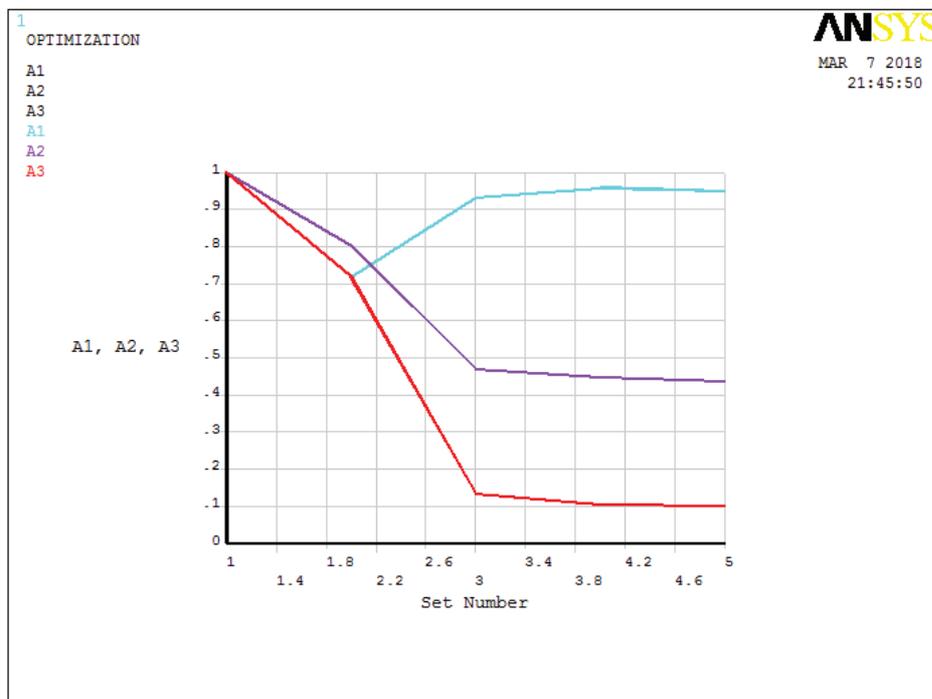
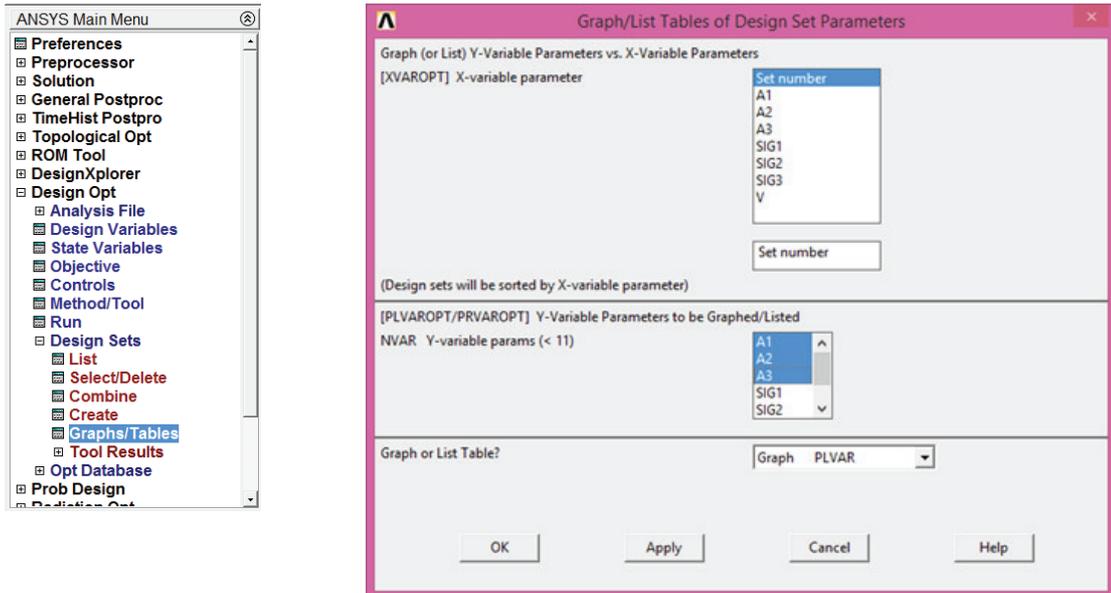
Os resultados dos parâmetros da otimização podem ser visualizados conforme Figura 17 e 18, e, mais comumente, a convergência pode ser demonstrada por meio de gráficos.

Figuras 17 e 18 – Visualização de Resultados



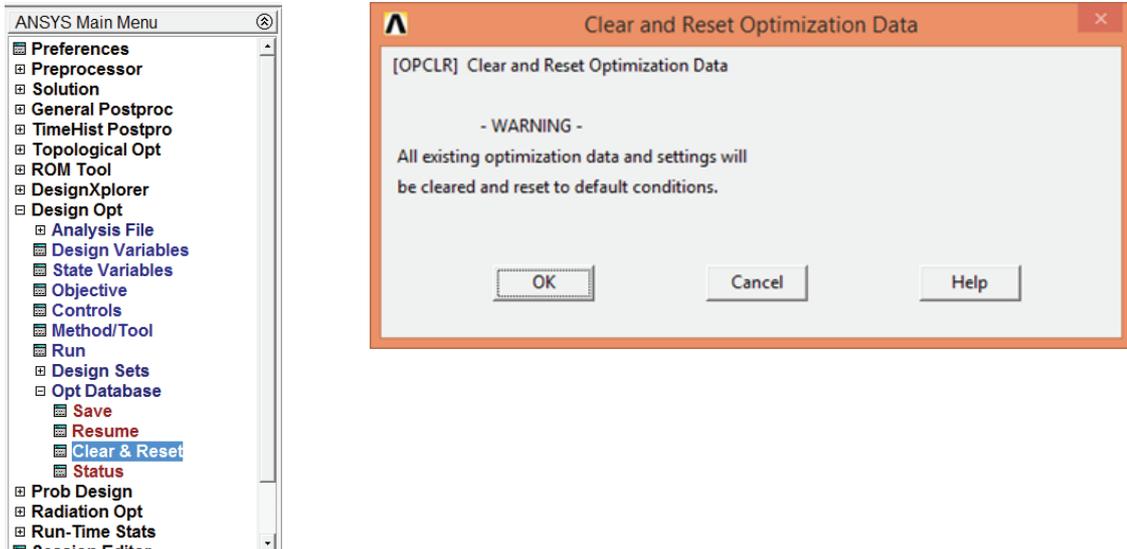
As imagens a seguir, Figuras 19, 20 e 21, ilustram a demonstração da convergência por meio de gráfico.

Figuras 19, 20 e 21 - Visualização de resultados



Para redefinir as variáveis e seus respectivos limites/tolerância, é necessário limpar os dados conforme rotina ilustrada nas Figuras 22 e 23.

Figuras 22 e 23 - Limpando os dados



Para finalizar, deve-se limpar toda a memória, bem como a área de trabalho para reiniciar as análises (Figura 24).

Figura 24 - Limpando o programa

