



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CENTRO TECNOLÓGICO - CTC

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

IGOR DE LIMA TEIXEIRA

**Otimização de Coberturas em Aço de Perfil Formado a Frio
de Edifícios Industriais**

Florianópolis
2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CENTRO TECNOLÓGICO - CTC

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

IGOR DE LIMA TEIXEIRA

Otimização de Coberturas em Aço de Perfil Formado a Frio de Edifícios Industriais

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito parcial para obtenção do grau
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Leandro Fleck Fadel Miguel, Dr.

Florianópolis
2020

Igor de Lima Teixeira

Otimização de Coberturas em Aço de Perfil Formado a Frio de Edifícios Industriais

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito parcial para obtenção do grau
de Bacharel em Engenharia Civil.

Data de aprovação: 13 / 10 / 2020

Prof. Leandro Fleck Fadel Miguel, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Tiago Morkis Siqueira, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Rafael Rodrigues de Souza, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

Resumo: O presente trabalho procede com a otimização estrutural de cobertura de edifício industrial, utilizando perfil de aço formado a frio (PFF), consistindo em encontrar os elementos estruturais – barras das treliças, telhas, terças, tirantes e contraventamento – de forma a minimizar o consumo de aço da cobertura. Ao algoritmo otimizador, *Search Group Algorithm (SGA)*, foram adicionados os processos de dimensionamento e verificação dos elementos baseado nos critérios das normas brasileira. Os perfis formados a frio foram divididos em dois grupos, perfis tabelados e perfis de dimensões livres, com otimização dimensional, geométrica e do distanciamento dos pórticos, para posterior comparação com solução em perfil de aço laminado.

Palavras-chave: perfil de aço formado a frio (PFF). edifício industrial. otimização estrutural. *search group algorithm (SGA)*.

ABSTRACT

Abstract: This paper presents a structural optimization of industrial building roofs, using cold-formed steel, consisting in finding the elements – truss bars, tiles, purlins, tethers and bracings – to minimize steel consumption of the roofing. To the optimization algorithm, *Search Group Algorithm (SGA)*, verification procedures of the structural elements based on the Brazilian standard criteria were added. The cold-formed steel sections were divided into two groups, one with standardized sizes and one with free sizes, with sizing, shape and spacing between frames optimization, for comparison with rolled steel section solution.

Keywords: cold-formed steel (CFS). industrial building. structural optimization. search group algorithm (SGA).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comparação entre projeto convencional e projeto otimizado	14
Figura 2 – Edifício industrial simples treliçado e de alma cheia	18
Figura 3 – Edifício industrial tipo Shed e em arco.....	19
Figura 4 – Combinações de pórticos em alma cheia e treliçados	19
Figura 5 – Partes componentes da cobertura.....	20
Figura 6 – Ilustração dos tipos de elementos componentes dos perfis formados a frio	25
Figura 7 – Representação do Método Simplificado	29
Figura 8 – Métodos de fabricação do perfil formado a frio	30
Figura 9 – Influência do trabalho a frio no aço dobrado.....	32
Figura 10 – Efeito do trabalho a frio em diferentes seções do perfil.....	33
Figura 11 – Efeito do trabalho a frio por processo de fabricação em prensa dobradeira e perfiladeira.....	33
Figura 12 – Flambagem de uma placa retangular	36
Figura 13 – Comportamento de placa isolada perfeita sob compressão	38
Figura 14 – Comportamento de placa isolada perfeita sob compressão	39
Figura 15 – Flambagem local e Flambagem distorcional de um perfil U enrijecido	42
Figura 16 – Análise de estabilidade elástica.....	43
Figura 17 – Flambagem local de um perfil pelo MLE e MSE	44
Figura 18 – Indicação das dimensões, distâncias e eixos da seção	59
Figura 19 – Exemplo de estrutura na qual ocorreu os três tipos básicos de otimização.....	64
Figura 20 – Pseudocódigo de um algoritmo genético genérico.....	66
Figura 21 – População inicial gerada aleatoriamente em um domínio bidimensional	66
Figura 22 – População inicial aplicada na função objetivo	67
Figura 23 – Grupo de Busca inicial composto por cinco membros da população	67
Figura 24 – Mutação do Grupo de Busca.....	67
Figura 25 – Grupo de Busca e Famílias para as primeiras iterações do SGA.....	68
Figura 26 – Grupo de Busca e Famílias para as últimas iterações do SGA.....	68
Figura 27 – Vista em perspectiva do projeto.....	71
Figura 28 – Possibilidades de seções transversais para treliças em PFF	72
Figura 29 – Destaque da treliça de cobertura, elementos e nós	72
Figura 30 – Seção típica – Telha trapezoidal 40	73
Figura 31 – Representação do tirante em Y e sua área de atuação	74
Figura 32 – Contraventamento vertical.....	75

Figura 33 – Mapa de isopletas	76
Figura 34 – Graus de liberdade para barra em treliça plana	80
Figura 35 – Representação da área de atuação da terça	84
Figura 36 – Comparação da massa total para otimização dimensional	92
Figura 37– Comparação da massa dos componentes para otimização dimensional	92
Figura 38 – Comparação da massa total para otimização dimensional, geométrica e de pórticos.....	97
Figura 39 – Comparação da massa dos componentes para otimização dimensional, geométrica e de pórticos.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos comuns de perfis formados a frio	26
Tabela 2 – Propriedades geométricas de linhas e arco	28
Tabela 3 – Métodos de produção	30
Tabela 4 – Chapas de aço para uso estrutural.....	31
Tabela 5 – Valores teóricos do coeficiente de flambagem k para placas	37
Tabela 6 – Valores do coeficiente de flambagem local k para elementos AA.....	40
Tabela 7 – Valores do coeficiente de flambagem local k para elementos AL	41
Tabela 8 – Coeficiente de flambagem local k_l para a seção completa em barras sob compressão.....	45
Tabela 9 – Coeficiente de flambagem local k_l para a seção completa em barras sob flexão	46
Tabela 10 – Valores máximos da relação largura/espessura	48
Tabela 11 – Coeficiente de flambagem global K por flexão de elementos isolados	51
Tabela 12 – Valores mínimos da relação D/b_w de barras com seção U enrijecido submetidas à compressão centrada para dispensar a verificação da flambagem distorcional	55
Tabela 13 – Valores mínimos da relação D/b_w de barras com seção U enrijecido sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia para dispensar a verificação da flambagem distorcional.....	60
Tabela 14 – Grupos de barras da treliça	73
Tabela 15 – Coeficientes de pressão e de forma, para telhados com duas águas.....	77
Tabela 16 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações	78
Tabela 17 – Valores dos fatores de combinação e redução para ações variáveis.....	79
Tabela 18 – Cargas admissíveis para as telhas (N/m^2)	83
Tabela 19 – Diâmetro das barras redondas treiladas	87
Tabela 20 – Otimização dimensional em perfil laminado.....	89
Tabela 21 – Otimização dimensional em PFF tabelado.....	90
Tabela 22 – Otimização dimensional em PFF livre.....	91
Tabela 23 – Comparação entre PFF tabelado e livre para otimização dimensional	93
Tabela 24 – Otimização dimensional, geométrica e de pórticos em perfil laminado.....	94
Tabela 25 – Otimização dimensional, geométrica e de pórticos em PFF tabelado.....	95
Tabela 26 – Otimização dimensional, geométrica e de pórticos em PFF livre.....	96
Tabela 27 – Comparação entre PFF tabelado e livre para otimização dimensional, geométrica e de pórticos	98

Tabela 28 – Treliça da otimização dimensional, geométrica e de pórticos em PFF livre – Método da Seção Efetiva	99
Tabela 29 - Treliça da otimização dimensional, geométrica e de pórticos em PFF livre – Método da Seção Efetiva aplicado no Método da Largura Efetiva.....	99
Tabela 30 – Comparação para PFF livre em otimização dimensional, geométrica e de pórticos entre Método da Seção Efetiva e Método da Largura Efetiva	100
Tabela 31 – Treliça da otimização dimensional, geométrica e de pórticos em PFF livre – Método da Largura Efetiva.....	100
Tabela 32 – Perfil formado a frio U simples – Dimensões, massas e propriedades geométricas	108
Tabela 33 – Perfil laminado cantoneira de abas iguais – Dimensões, massas e propriedades geométricas.....	114

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	GENERALIDADES DA OTIMIZAÇÃO	12
1.2	GENERALIDADES DO AÇO E PERFIS FORMADOS A FRIO	14
1.3	JUSTIFICATIVA.....	16
1.4	OBJETIVOS	16
1.4.1	Objetivo Geral	16
1.4.2	Objetivos Específicos	16
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS EM AÇO	18
2.2	AÇO DOBRADO A FRIO	22
2.2.1	Perfil, Elementos e Nomenclatura	24
2.2.2	Métodos de Fabricação.....	29
2.2.3	Propriedades Mecânicas e Influência do Trabalho a Frio.....	31
2.2.4	Comportamento e Conceitos para Verificação de Perfis Formados a Frio.....	34
3	DIMENSIONAMENTO NORMATIVO.....	48
3.1	BARRAS SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE TRAÇÃO.....	48
3.2	BARRAS SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO.....	50
3.2.1	Método da Largura Efetiva e Método da Seção Efetiva	51
3.3	BARRAS SUBMETIDAS À FLEXÃO.....	55
3.3.1	Método da Largura Efetiva e Método da Seção Efetiva	55
4	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL.....	62
4.1	ELEMENTOS DA OTIMIZAÇÃO	62
4.2	TIPOS DE OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	63
4.3	ALGORITMOS EVOLUTIVOS DE OTIMIZAÇÃO.....	65
4.4	SEARCH GROUP ALGORITHM.....	66
4.4.1	Parâmetros de Entrada e Função Objetivo.....	69
5	CONCEPÇÃO ESTRUTURAL.....	71
5.1	COMPONENTES.....	71
5.1.1	Treliças	71

5.1.2 Telhas	73
5.1.3 Terças	73
5.1.4 Tirantes em Y	74
5.1.5 Contraventamento Vertical	74
5.2 COMBINAÇÕES DE CÁLCULO, ESFORÇOS E DIMENSIONAMENTOS.....	75
5.2.1 Peso Próprio e Sobrecarga.....	75
5.2.2 Vento	75
5.2.3 Treliças	77
5.2.4 Telhas	82
5.2.5 Terças	83
5.2.6 Tirantes em Y	85
5.2.7 Contraventamento Vertical	87
6 RESULTADOS.....	88
6.1 OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL.....	88
6.1.1 Perfil Laminado – Tabelado	88
6.1.2 Perfil Dobrado a Frio – Tabelado	90
6.1.3 Perfil Dobrado a Frio – Livre	91
6.1.4 Comparações	92
6.2 OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL, GEOMÉTRICA E DE PÓRTICOS.....	93
6.2.1 Perfil Laminado – Tabelado	94
6.2.2 Perfil Dobrado a Frio – Tabelado	95
6.2.3 Perfil Dobrado a Frio – Livre	96
6.2.4 Comparações	97
6.2.5 Método da Seção Efetiva e Método da Largura Efetiva	98
7 CONCLUSÃO.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
APÊNDICE A.....	107
PROPRIEDADES DOS PERFIS ADOTADOS.....	107

1 INTRODUÇÃO

A engenharia é uma área do conhecimento que tem o intuito de auxiliar a sociedade através do estudo e aplicação de conhecimentos técnicos e científicos. A engenharia civil, como um setor da engenharia, é responsável em utilizar esse conhecimento, adquirido desde a antiguidade por tentativas e erros e mais recentemente por pesquisas, para moldar o ambiente de acordo com as necessidades da sociedade, projetando, construindo e dando manutenção à infraestrutura necessária.

De modo geral, os aspectos que se destacam nessa evolução são: a segurança - baseado em teorias de resistência dos materiais e teorias probabilísticas que são apresentadas por normas técnicas a serem seguidas; a agilidade do processo - com o uso de diferentes materiais e métodos construtivos; o custo da obra - valor econômico necessário para as opções presentes; e a balança que define qual solução será aplicada - a viabilidade de cada alternativa. Essa busca por melhorias se dá de uma forma ampla com pesquisas que desenvolvem, validam e inserem novidades no mercado que podem impactar toda uma cadeia produtiva ou de uma forma mais pontual, com planejamento e busca das melhores condições para um projeto específico, dentro das características e limitações encontradas.

No Brasil, o setor ainda é atrasado se comparado com as grandes economias mundiais e resistente a mudanças. No entanto, a crise econômica que afeta o mundo nos últimos anos, com grandes consequências para a construção civil, aliada a uma maior consciência da sociedade com a exploração dos recursos naturais e preocupação com o meio ambiente fez com que a busca de alternativas para mudança se intensificasse. Grande parte desse avanço se deve a inserção e popularização dos computadores, o que difundiu conhecimento por todo o globo e possibilitou o uso de métodos computacionais que abriram portas para opções que antes não seriam consideradas por serem muito trabalhosas, afetando agilidade e andamentos dos projetos, além de outras opções que não eram nem conhecidas. Um exemplo disso é a otimização de estruturas através de algoritmos, assunto esse abordado nesse trabalho.

1.1 GENERALIDADES DA OTIMIZAÇÃO

Em tempos distantes, para eliminar a instabilidade e possíveis ruínas, os construtores utilizavam métodos de superdimensionamento, dando segurança para suas criações através de uma quantidade maior de material que o necessário, aumentando também a mão de obra e, conseqüentemente, todo o custo envolvido. Nos dias de hoje, após estudos de confiabilidade de estruturas, propostas como estas, de altos custos e ganhos ínfimos em segurança, são inconcebíveis e, em contrapartida, cada vez mais, projetos enxutos e

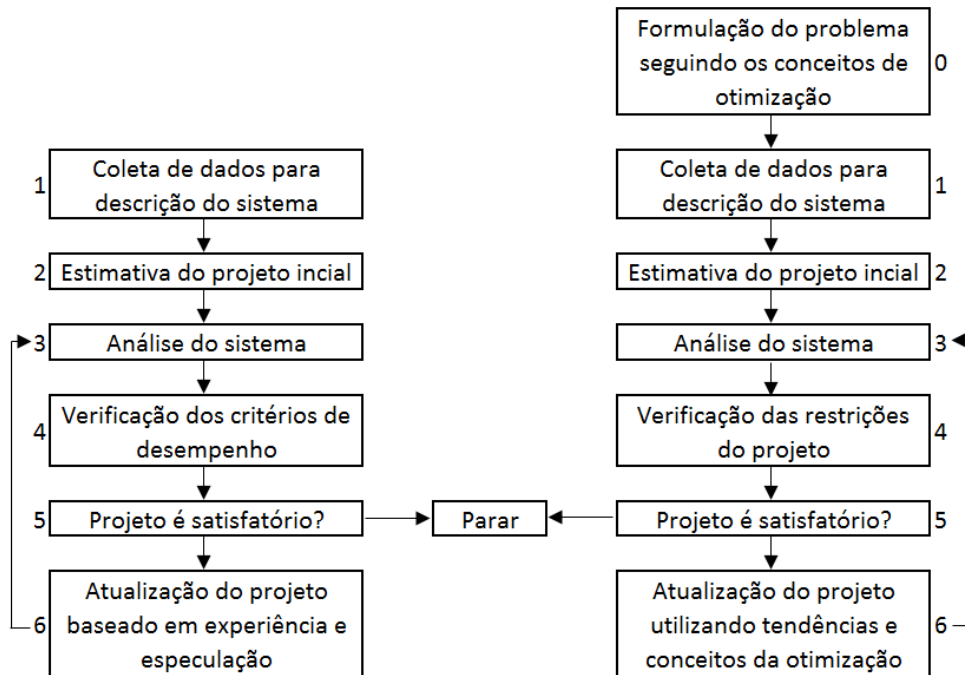
aprimoradas veem sendo utilizados, reduzindo custos ao mesmo tempo que prezam pela segurança. Entretanto, a escolha da melhor opção pode ser confusa e requerer tremendo esforço dado que a grande maioria dos projetos na área da engenharia possui inúmeras soluções admitidas por norma (SONMEZ, 2011). Antes dos métodos computacionais atuais, esses problemas relacionados a melhoria eram solucionados utilizando formulações de equações diferenciais, muitas vezes utilizando simplificações e demasiado tempo para a solução (HAFTKA; GÜRDAL, 1991).

É nessa área que se encontram as técnicas de otimização, nas quais é elaborado um sistema combinatório com o intuito de potencializar o desempenho de todas as variáveis possíveis de um projeto, levando em consideração as devidas restrições. Como é destacado por Lopez e Miguel (2013), é uma característica intrínseca de um projetista buscar projetos melhores, mais baratos e eficientes, fundamentado no seu conhecimento, normas e percepção. Contudo, sem o auxílio de *softwares* e programas especializados, esse pode ser um processo lento e comumente com erros, dado a imensa quantidade de variáveis e cálculos necessários para se certificar que determinada escolha está entre as melhores ou é, de fato, a ótima.

De acordo com Ravindran, Ragsdell e Reklaitis (2006), a teoria da otimização é um conjunto de métodos numéricos e resultados matemáticos que tem o intuito de identificar o melhor conjunto dentro de uma série de possibilidades sem que haja a necessidade de avaliar individualmente cada combinação e alternativa possível. A capacidade de determinar a melhor alternativa dentre tantas outras se dá pelo uso de cálculos iterativos e de uma programação lógica, que podem ser implantados em um computador.

A Figura 1 apresenta um fluxograma que compara métodos convencionais e otimizados de um projeto (ARORA, 2012). Segundo o autor, ambos são iterativos (representados pelo *looping* entre os blocos 6 e 3) e requerem cálculos semelhantes, porém têm suas diferenças. O método otimizado possui o bloco 0, onde o problema é formulado baseado na teoria da otimização, com definição das variáveis, condições e restrições do projeto e uma função objetivo capaz de avaliar diferentes modelos. Após análises iniciais, no bloco 4 do método convencional ocorre a verificação dos critérios de desempenho para posterior análise se o projeto é satisfatório ou se precisa de uma atualização segundo a experiência do projetista. Já no método otimizado, o bloco 4 é utilizado para verificar se as restrições do projeto estão sendo satisfeitas, seguido pelo bloco 5, onde é avaliado se é possível uma otimização, e o bloco 6 onde essas alterações ocorrem baseadas nas tendências do método de otimização, tornando o processo menos instintivo.

Figura 1 – Comparação entre projeto convencional e projeto otimizado



Fonte: Adaptado de ARORA, 2012

Na otimização clássica, os algoritmos usam procedimentos baseados no cálculo de gradientes, devido a eficiência computacional encontrada nesse tipo de processo, porém nas últimas décadas, algoritmos metaheurísticos, que possuem uma abordagem diferente, têm recebido atenção da comunidade científica (DASGUPTA; MICHALEWICZ, 1997). Conforme Bastos (2004), os primeiros são algoritmos determinísticos, que precisam de uma função objetivo contínua e diferenciável e um ponto de partida para convergir para uma solução, que pode ser apenas um mínimo local e não o mínimo global em uma função multimodal. Como problemas reais são complexos a esse ponto, essas características afetam o desempenho desses algoritmos. Já o segundo grupo é formado por algoritmos probabilísticos que são baseados em mecanismos evolutivos presentes na natureza, que com a inserção de parâmetros estocásticos na programação, avaliam diferentes áreas promissoras através da função objetivo, sendo mais eficientes para funções não-lineares, não-convexas e multimodais como os problemas de engenharia (MIGUEL; LOPEZ; MIGUEL, 2013).

1.2 GENERALIDADES DO AÇO E PERFIS FORMADOS A FRIO

A importância das ligas metálicas na construção civil é inegável. Elas podem ser utilizadas como constituinte em compósitos, como no caso do concreto armado - onde são utilizadas no formato de barra, sendo o principal responsável por resistir aos esforços de tração – ou como material único no sistema estrutural, como é o caso de treliças, pórticos e afins – onde são utilizadas como perfil nas mais variadas seções transversais. O uso de metais

em grande escala teve início com a revolução industrial no século XIX (primeiramente com o emprego de ferro fundido e posteriormente com a utilização de ferro forjado) e, com o avanço da indústria siderúrgica, atualmente é o aço a liga metálica de maior destaque na construção civil (PFEIL; PFEIL, 2009).

O aço é uma liga metálica constituída principalmente por ferro, carbono e demais elementos residuais oriundos do processo de fabricação. O carbono presente na liga tem o intuito de aumentar a resistência mecânica mas no entanto torna-a mais frágil. Também pode-se adicionar elementos para melhorar alguma característica desejada (como por exemplo resistência à corrosão), sendo esses chamados de elementos de liga. Para o seu uso estrutural, o aço deve ter boas propriedades que comprovem seu desempenho como boa ductilidade, homogeneidade, resistência mecânica e soldabilidade, como é o caso do aço ASTM A36, aço-carbono com baixo teor de carbono ($C < 0,29\%$), que é o mais utilizado em elementos estruturais (PFEIL; PFEIL, 2009).

Quando compara-se o uso do aço e do concreto armado como material estrutural, sempre existiram discussões sobre qual sistema é melhor e defensores para ambas, no entanto algumas vantagens na utilização de perfis metálicos para determinados casos são evidentes. Analisando-se as propriedades físicas, a relação peso por resistência do aço chega a ser três vezes menor que ao do concreto $f_{ck} 30 \text{ Mpa}$ e o módulo de elasticidade longitudinal é oito vezes maior. Vantagens também são observadas na produção e construção: facilidade para industrialização da produção aumentando a qualidade do produto; fácil montagem em obra com execução rápida, limpa e reaproveitável; qualidade com precisão milimétrica na produção do perfil; maior versatilidade para alterações de projeto; facilidade para retoques, reforços e posteriores manutenções necessárias (CARVALHO; GRIGOLETTI; BARBOSA, 2014).

Quanto as famílias de aço estrutural, a mais conhecida e utilizada é formada por perfis conhecidos por perfil pesado, sendo ele o perfil laminado, fabricado a quente em usinas siderúrgicas, e o perfil soldado, gerado através da associação e soldagem de chapas ou perfis laminados simples. Ambos têm os métodos de dimensionamento descritos na norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

O outro grupo se diz a respeito de perfis leves, sendo eles designados como perfis formados a frio (PFF). Conforme a norma ABNT NBR 6355:2012 – Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização, que estipula requisitos necessários de qualidade e dimensões, eles são definidos como perfis obtidos por dobramento ou por conformação contínua, sendo ambas operações realizadas com o aço em temperatura ambiente. Já os

requisitos básicos de dimensionamento são estabelecidos pela ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.

Apesar de serem comumente denominados perfis pesados e perfis leves essa designação se dá somente devido a espessura das chapas utilizadas, onde em geral perfis laminados usam chapas grossas enquanto perfis dobrados usam chapas finas, e não necessariamente estará ligado ao peso e preço da estrutura final. Segundo Carvalho, Grigoletti e Barbosa (2014), essas chapas tem espessuras variando normalmente entre 0,4 *mm* e 8,0 *mm* (apesar de chapas de até 19,0 *mm* já terem sido utilizadas nesse método) e se usadas em circunstâncias apropriadas, como cargas e vãos médios ou com perfil em forma e dimensões otimizados para a solicitação, podem resultar em economia devido à sua leveza, facilidade de fabricação, manuseio e transporte.

1.3 JUSTIFICATIVA

A motivação para o presente trabalho provém da ampliação dos conhecimentos ligados à estruturas de aço e de programação, aliando-se o dimensionamento de perfis finos de aço dobrados a frio, de uso menos frequente do que os perfis laminados, ao desenvolvimento de um algoritmo que otimize os resultados. Acrescido desse interesse, tanto o uso de perfis formados a frio, quanto a otimização de estrutura, são assuntos que vêm ganhando relevância na construção civil, com soluções competitivas e seguras desde que bem avaliadas.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Realizar a otimização, baseado no dimensionamento de uma estrutura de cobertura de edifício industrial, utilizando perfis de aço formados a frio, para se obter a menor massa, respeitando os critérios de normas que regem o problema, como ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, ABNT NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios e ABNT NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver rotinas computacionais em *softwares* de programação e cálculo computacional para verificação dos elementos conforme as normas;

- Adequar a programação aos conceitos dos algoritmos otimizadores e aplicá-la ao *Search Group Algorithm (SGA)*;
- Utilizar as otimizações dimensional, geométrica e do número de pórticos para os elementos da cobertura do galpão, modificando as seções transversais, altura da treliça e espaçamento entre pórticos no objetivo de uma estrutura mais leve;
- Empregar tanto perfis tabelados quanto perfis de dimensões livres, para comparação entre si e também em relação aos resultados com perfis laminados.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Capítulo 2 – *Fundamentação Teórica*: separado em duas seções, sendo a primeira referente às estruturas dos edifícios industriais, e a segunda, à conceitos necessários para o entendimento dos perfis formados a frio.

Capítulo 3 – *Dimensionamento Normativo*: trata do processo de cálculo dos esforços resistentes pertinentes ao problema de acordo com a ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.

Capítulo 4 – *Otimização Estrutural*: apresenta os conceitos de otimização, descrevendo elementos e tipos de otimização, além de apresentar o funcionamento do algoritmo utilizado no problema estudado.

Capítulo 5 – *Concepção Estrutural*: detalha o problema a ser estudado, abordando os casos de carregamento e as verificações necessárias para o dimensionamento que garantem a segurança da estrutura.

Capítulo 6 – *Resultados*: apresenta os resultados para as otimizações propostas quanto aplicadas ao problema estudado.

Capítulo 7 – *Conclusão*: contém as considerações finais a respeito do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS EM AÇO

Segundo Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA, 2008), apesar da diferença do custo específico do aço em comparação com outros materiais, produtos industrializados como as estruturas metálicas, quando planejadas e executadas corretamente, oferecem vantagens capazes de reverter o custo final da obra, fazendo valer, assim, a sua escolha. Um dos mais frequentes usos para esse tipo de estrutura é em coberturas e construções de edifícios industriais, apresentando rapidez, versatilidade e economia.

Os edifícios industriais, também conhecidos como galpões, são construções geralmente de um pavimento, com sistema estrutural constituído por um conjunto de pórticos regularmente espaçados, tendo sua cobertura apoiada em um sistema de tesouras e treliças ou terças e vigas (CBCA, 2010). Por utilizarem um sistema de repetição, seus elementos estruturais podem facilmente ser padronizados e industrializados em um processo de fabricação que garanta a qualidade do material e precisão nas dimensões dos elementos. Com a utilidade de cobrir e fechar grandes áreas fornecendo abrigo, eles podem ser utilizados como aplicações para fábricas, estádios e depósitos, protegendo instalações e produtos armazenados no interior.

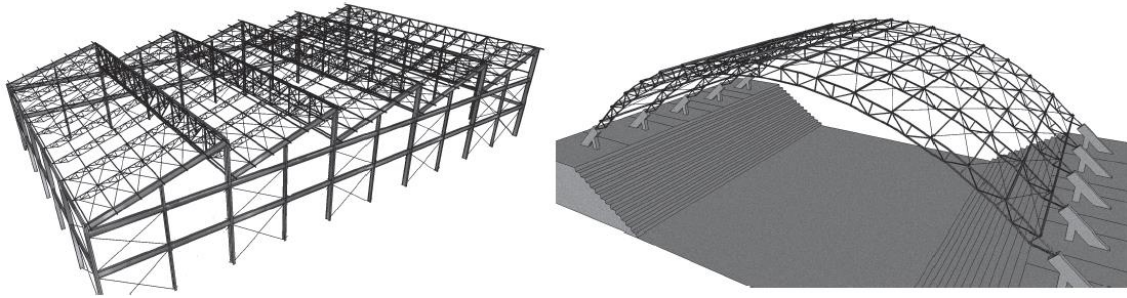
Devido às amplas condições de uso, edifícios industriais podem variar entre uma grande gama de tipologias, cada uma mais adequada às necessidades do projeto em questão. Diferentes tipos como vãos simples, múltiplos, geminados, tipo Shed e em arco são algumas das alternativas e podem ser visualizados nas Figuras 2 e 3 (CBCA, 2010). Os elementos estruturais constituintes dos pórticos planos também apresentam variações, nas quais as duas colunas e a viga de cobertura que compõem a estrutura principal podem variar em uma combinação entre o uso de perfis de alma cheia e o uso de treliças (NETO, 2007).

Figura 2 – Edifício industrial simples treliçado e de alma cheia



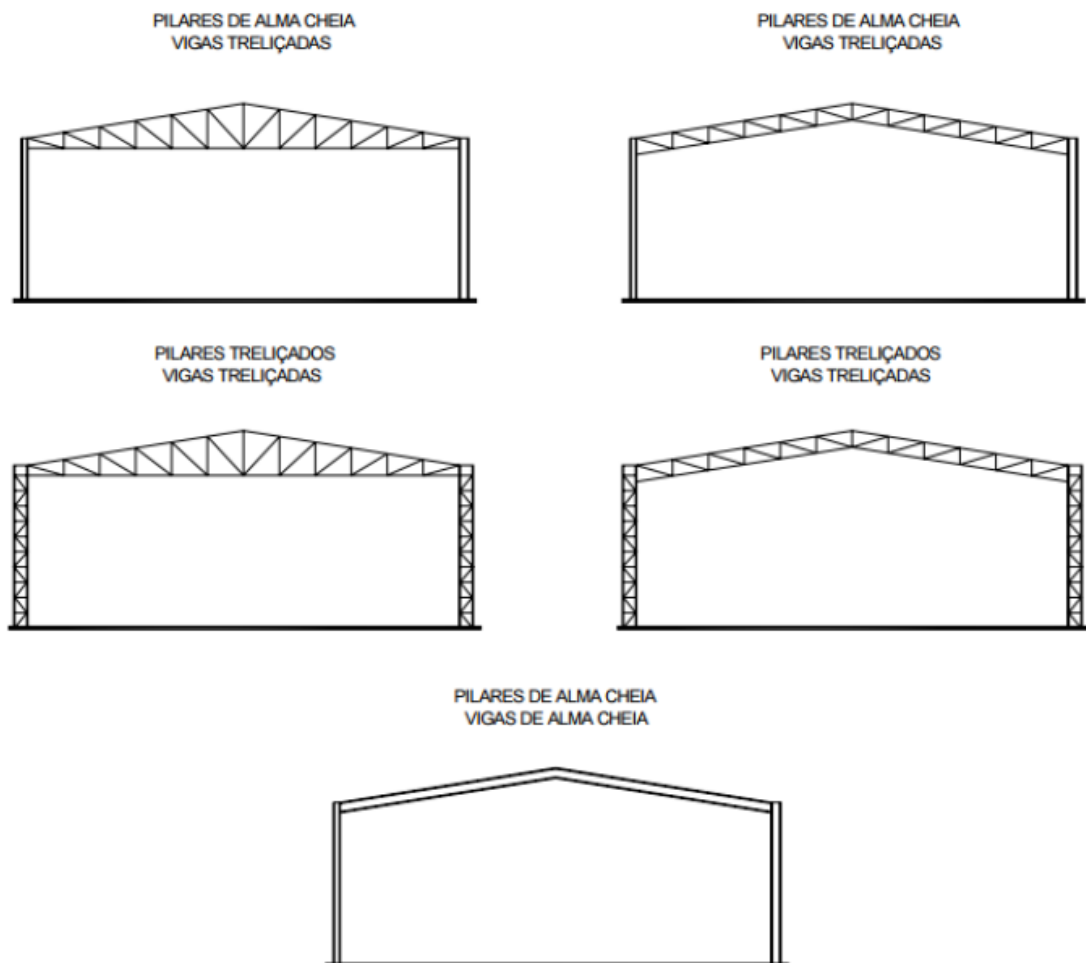
Fonte: CBCA, 2010

Figura 3 – Edifício industrial tipo Shed e em arco



Fonte: CBCA, 2010

Figura 4 – Combinações de pórticos em alma cheia e treliçados



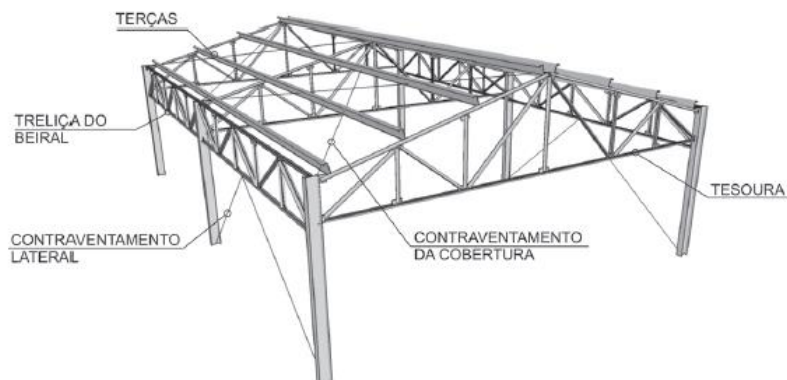
Fonte: NETO, 2007

Segundo Nogueira (2009), existe uma maior ou menor transmissão dos momentos fletores em decorrência da escolha da solução estrutural, determinando assim o grau de continuidade entre os elementos. As soluções em perfil de alma cheia são geralmente formados por perfis laminados ou soldados em seção I e competitivos com vão livre em torno de 20 metros, com vantagens na fabricação, transporte e montagem por utilizarem menos peças, assim como possuem menor número de ligações e travamentos (BELLEI, 2004). As

soluções de pórticos treliçados podem utilizar, além dos perfis laminados e soldados, também os perfis formados a frio com seção U e cantoneira, possibilitando a obtenção de um esforço resistente equivalente à um perfil de alma cheia, com menor consumo de aço. A disposição dos elementos é julgada pelo projetista de acordo com padrões estruturais, funcionais, econômicos e estéticos de maneira com que diagonais e montantes sejam posicionados de forma que as cargas transmitidas pelas terças sejam aplicadas nos nós e os elementos sejam submetidos apenas a esforços normais.

Por serem estruturas esbeltas e leves sujeitas às ações de vento, os pórticos transversais precisam de elementos que promovam estabilização longitudinal, sendo eles: contraventamentos horizontais, no plano da cobertura; e verticais, nas paredes laterais entre pórticos, garantindo assim rigidez espacial para a estrutura. Os contraventamentos horizontais, juntamente com as terças, formam um sistema na cobertura que dá suporte às telhas e tornam os pontos de apoio das terças nos pórticos em pontos indeslocáveis, reduzindo assim o comprimento de flambagem do banzo superior da cobertura.

Figura 5 – Partes componentes da cobertura



Fonte: CBCA, 2010

Comparados com a construção em sistemas de concreto armado, seja construído em loco ou pré-moldado, os galpões em aço devem ser dimensionados com extremo cuidado para carregamentos que podem não ser tão relevantes em outras situações. A velocidade básica do vento, assim como rugosidade do terreno e os obstáculos em sua volta têm grande influência na solicitação da estrutura e na combinação de ações, frequentemente invertendo as solicitações normais nos elementos da cobertura, como o banzo superior, que pode trabalhar tracionado ou comprimido, e dependendo da sua esbelteza, ter na pequena força de compressão a sua carga condicionante para o dimensionamento (BLESSMANN, 1986). Como exemplo, Madeira (2009) destaca a situação típica de carregamento em estruturas de aço e de concreto, destacando suas diferenças em alguns pontos:

- a. O peso próprio de uma cobertura plana em aço está na faixa de 0,15 a 0,30 kN/m^2 , enquanto em concreto armado os valores estão entre 2 a 3 kN/m^2 ;
- b. Seguindo a norma ABNT NBR 8800:2008, a sobrecarga para o dimensionamento de uma estrutura de cobertura em aço deve ser de 0,25 kN/m^2 e representa em torno de 50% da ação em uma combinação entre peso próprio e sobrecarga, junto aos seus coeficientes de ponderação, da norma ABNT NBR 14762:2010. Em uma estrutura de concreto armado, a sobrecarga representa um valor de 10% para essa mesma combinação;
- c. Devido às ações do vento na estrutura que podem prevalecer sobre às cargas gravitacionais, gerando um somatório de forças que acarreta em um efeito global de sucção nas faces do galpão, os elementos podem ser solicitados por esforços de sentido contrários.

O projeto estrutural é constituído de um procedimento iterativo com um ciclo entre as etapas de análise, avaliação e revisão com o intuito de se chegar na proposta mais adequada de forma consciente e racional. Smith (1996) apresenta esse processo nos seguintes passos:

1. Concepção do esboço da estrutura de forma a satisfazer as necessidades do projeto;
2. Estudos preliminares de custos das alternativas possíveis, envolvendo métodos construtivos e materiais;
3. Elaboração de projetos de análise preliminares das melhores alternativas discutidas no item anterior;
4. Escolha da melhor alternativa para uma melhor avaliação;
5. Realização do projeto final que deve envolver:
 - a. Escolha de um método de análise estrutural;
 - b. Determinação dos diferentes tipos de carregamento e suas combinações;
 - c. Análise estrutural utilizando as dimensões e elementos previamente considerados na fase preliminar;
 - d. Estudo dos resultados para confirmação de desempenho e restrições necessárias do projeto;
 - e. Redimensionamento dos elementos até uma configuração ideal, repetindo os passos (c) e (d);

6. Confirmação se os perfil e elementos necessários estão disponíveis no mercado;
7. Inspeção da estrutura durante a sua execução.

2.2 AÇO DOBRADO A FRIO

De acordo com o Instituto Americano do Ferro e do Aço - AISI (2016), os perfis de aço formado a frio são formados por uma ou mais chapas de espessura variando comumente de 0,4 mm a aproximadamente 6,4 mm, no entanto sendo possível a fabricação de perfis com placas e barras grossa de até 25 mm. Já no Brasil, as Normas brasileiras ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio e ABNT NBR 6355:2012 – Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização definem o perfil estrutural de aço formado a frio como “perfil obtido por dobramento, em prensa dobradeira, de tiras cortadas de chapas ou bobinas, ou por conformação contínua em conjunto de matrizes rotativas, a partir de bobinas laminadas a frio ou a quente, revestidas ou não, sendo ambas as operações realizadas com o aço em temperatura ambiente”. A norma ABNT NBR 6355:2012 também traz todos os requisitos de designação, processo, inspeção e aceitação ou rejeição dos perfis para série comercial, incluindo características dimensionais e tolerância nas deformações obtidas na fabricação.

Yu e LaBoube (2010) citam que chapas dobradas começaram a ser utilizadas na Inglaterra e nos Estados Unidos por volta de 1850, no entanto só por volta da década de 40 é que seu uso foi mais aceito na construção civil após estudos desenvolvidos pelo professor George Winter na Universidade de Cornell. Essas pesquisas tinham como propósito entender mais a fundo o comportamento de perfis estruturais das chapas finas de aço dobrado a frio para o desenvolvimento de métodos de cálculos e elaboração de uma norma específica, dando origem em 1946 a “*Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*” do Instituto Americano de Ferro e do Aço, a qual é revisada periodicamente, sendo a última no ano de 2016. Esta norma tem reconhecimento mundial desde as edições iniciais e serve como referência para diversas linhas de pesquisas e outros códigos relativos ao tópico.

No Brasil, o primeiro projeto de norma de perfis formados a frio foi publicado em 1967 - NB 143/67 – Cálculo de estruturas de aço constituídas por perfis leves - baseado na norma norte-americana AISI/62 (JAVARONI, 1999). Apesar da norma e dos cursos ministrados em universidades, haviam incertezas por parte dos profissionais e construtores quanto ao uso dos perfis dobrados devido ao atraso industrial do Brasil em relação as potências mundiais que já utilizavam o método e também pela preferência do uso do concreto armado. Sendo

assim, só no final da década de 90 é que construtoras adotaram o uso dos PFF para os seus projetos. Com uma norma brasileira defasada, os projetistas se utilizavam de normas estrangeiras, até que em 2001 em um projeto da Associação Brasileira da Construção Metálica (ABCEM), juntamente com docentes e profissionais do setor e baseados em normas como AISI/96, EUROCODE 3/93 e AS/NZS 4600/96, remodelou a norma brasileira para a versão ABNT NBR 14762:2001 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Mais recentemente, a norma foi atualizada no ano de 2010, sendo a ABNT NBR 14762:2010 a norma vigente no momento.

Assim como a ABNT NBR 8800:2008, a ABNT NBR 14762:2010 é fundamentada no método dos estados-limites e determina os requisitos essenciais que devem ser cumpridos no dimensionamento de perfis estruturais de aço formados a frio, formados por tiras ou chapas de aço-carbono à temperatura ambiente, conectados por soldas ou parafusos, indicados para estruturas de edifícios ou qualquer outro fim estrutural desde que sejam avaliadas suas particularidades.

No Brasil, devido às suas características geográficas e meteorológicas que resultam em carregamentos mínimos ou nulos de acúmulo de neve, baixa intensidade de ações sísmicas e velocidades moderadas de vento, os perfil finos formados a frio se revelam como uma alternativa muito viável, tanto em termos técnicos quanto econômicos, podendo superar até outros países que são considerados potências quanto ao seu uso como material construtivo para estruturas leves como pavilhões industriais, coberturas e até mesmo conjunto de casas populares (NOBRE; RABELO, 2016). Diversos estudiosos como Yu e LaBoube (2010), Carvalho, Grigoletti e Barbosa (2014) ressaltam os benefícios do uso de perfis formados a frio na construção, e até mesmo algumas vantagens sobre o uso de perfis laminados:

1. Vantagens se comparado a outros materiais:
 - a. Leveza combinada a alta resistência e rigidez;
 - b. Facilidade de pré-fabricação, produção em massa, montagem e instalação, diminuindo atrasos devido ao clima;
 - c. Economia no transporte e manuseio pela leveza, além de ser um material reciclável e permitir a desmontagem para aproveitamento em outro local;
 - d. Material homogêneo de qualidade uniforme, com precisão de detalhes e medidas e sem o uso de formas em obra;
 - e. Não combustível, a prova de cupins e de decomposição.

2. Vantagens se comparado aos perfis laminados:

- a. Facilidade de produção com pouco maquinário e baixo custo de estoque, dado que com um número reduzido de espessura de chapas pode se produzir perfis que solucionam a grande maioria dos casos encontrados, possibilitando construções em locais afastados dos grandes centros;
- b. Perfis finos formados a frio são geralmente leves, facilitando a produção e montagem com pouca mão de obra, especialmente para cargas baixas e vãos curtos ou médios;
- c. Chapas finas podem ser dobradas economicamente em perfis especiais, de formato específico para as condições encontradas do projeto, resultando em uma otimização das dimensões para que o valor da resistência do perfil seja compatível com a sua solicitação e, dessa forma, economizando recursos em busca do mínimo peso de aço e custo da obra;
- d. Aproveitamento da resistência pós-flambagem junto a dimensões otimizadas e adequadas à instabilidades locais e global, obtendo uma alta relação resistência/peso;
- e. Possibilidade da produção de perfis que se encaixem, facilitando e reduzindo custos de transporte.

Segundo Nobre e Rabelo (2016), ainda que frequentemente abordada de forma similar aos perfis laminados e soldados, a verificação de capacidade de perfis formados a frio é costumeiramente mais complexa, dada sua esbelteza elevada e manifestação de instabilidades locais que os levam a trabalhar em regime de resistência pós-flambagem, além do possível uso de seções transversais únicas. Yu e LaBoube (2010) afirmam que o comportamento e o desempenho desses dois tipos de perfis quando submetidos a carregamento diferem em vários aspectos de forma significativa, de modo que os critérios para perfis laminados não oferecem segurança o suficiente para serem aplicados em projetos de perfis formados a frio.

2.2.1 Perfil, Elementos e Nomenclatura

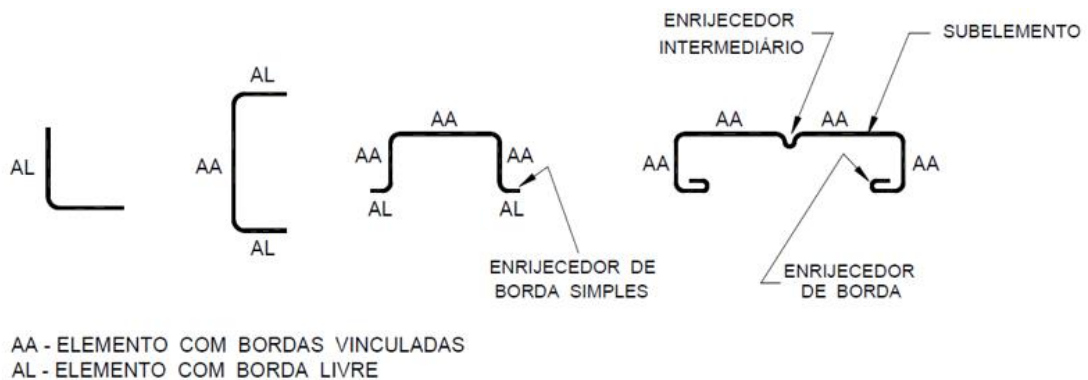
Além da definição de perfil já apresentado anteriormente, as normas brasileiras ABNT NBR 6355:2012 e ABNT NBR 14762:2010 estabelecem outras definições importantes para o tópico. A definição de elemento é dada como qualquer parte constituinte do perfil, normalmente sendo mesa, alma e enrijecedor os elementos planos (chamados simplesmente de elementos por serem mais relevantes) e as dobras os elementos curvos. Subelemento é a parte compreendida entre a borda do elemento até um enrijecedor intermediário ou entre

enrijecedores intermediários seguidos. Enrijecedores são elementos adicionados à forma do perfil de maneira a aumentar a capacidade de carga da seção, principalmente na flambagem local, e podem ser adicionados ao longo de um elemento ou na sua extremidade.

Outros conceitos importantes são: a espessura representada por t , a qual é a própria espessura da chapa de aço excluído o revestimento; largura nominal do elemento, que é a largura total do elemento incluindo os locais de dobra e medida do plano da seção transversal, sendo utilizada para designar o perfil; largura do elemento b , sendo a largura da parte plana do elemento; largura efetiva b_{ef} , sendo a largura fictícia de um elemento reduzida devido à instabilidade local e utilizada para os cálculos de dimensionamento.

Os elementos planos estão divididos em duas categorias: os com bordas vinculadas (AA; apoio-apoio), que têm ambas extremidades vinculadas a outros elementos na direção longitudinal e também são conhecidos por elementos enrijecidos; e os com borda livre (AL; apoio-livre), onde apenas uma borda é vinculada a outro elemento enquanto a outra extremidade permanece sem conectividade.

Figura 6 – Ilustração dos tipos de elementos componentes dos perfis formados a frio



Fonte: ABNT NBR 6355:2012 - Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização

Também por norma, a designação do perfil é feita na forma tipo do perfil x dimensões dos lados x espessura, com todos os valores em milímetros, sendo que a letra “e” quando presente no tipo do perfil faz referência a utilização de enrijecedores. Por exemplo, existem os perfis U 150 x 50 x 2,00 e Ue 150 x 60 x 20 x 2,00. Segundo Yu e LaBoube (2010), a espessura de perfis estruturais individuais variam geralmente entre 1,20 mm e 6,30 mm e a largura entre 50 mm e 300 mm, sendo possível a utilização de tamanhos maiores. Esses perfis podem ser tanto utilizados como componente estrutural principal para edificações de 6 pavimentos, quanto como componente estrutural secundário ao ser utilizado em conjunto com perfis de aço laminado.

Quanto às características geométricas dos perfis para utilização em cálculos, tanto as normas quanto outras literaturas consagradas oferecem tabelas para os perfis mais comuns,

sendo eles cantoneira de abas iguais, cantoneira de abas desiguais, U simples, U enrijecido, Z enrijecido a 90°, Z enrijecido a 45°, cartola e outros (CBCA, 2014).

Tabela 1 – Tipos comuns de perfis formados a frio

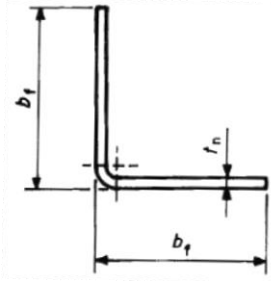
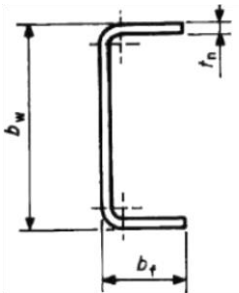
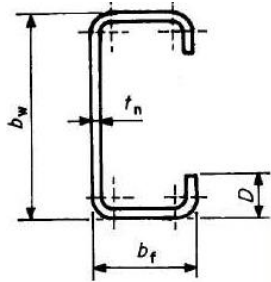
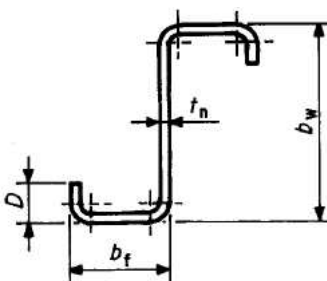
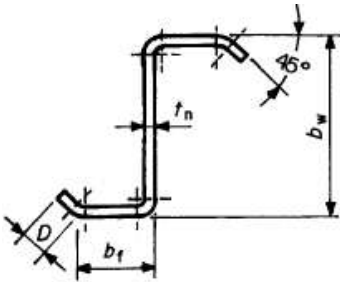
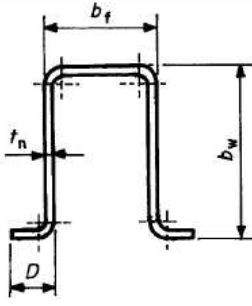
Série	Seção Transversal	Designação
Cantoneira de abas iguais		$L \ b_f \times t_n$ Exemplo: L 50 x 3,00
U simples		$U \ b_w \times b_f \times t_n$ Exemplo: U 150 x 50 x 2,65
U enrijecido		$U_e \ b_w \times b_f \times D \times t_n$ Exemplo: U 150 x 60 x 20 x 2,65
Z enrijecido a 90°		$Z_{90} \ b_w \times b_f \times D \times t_n$ Exemplo: Z ₉₀ 200 x 75 x 20 x 2,25

Tabela 1 (continuação)

Série	Seção Transversal	Designação
Z enrijecido a 45°		$Z_{45} b_w \times b_f \times D \times t_n$ Exemplo: $Z_{45} 200 \times 75 \times 20 \times 2,25$
Cartola		$Cr b_w \times b_f \times D \times t_n$ Exemplo: $Cr 100 \times 50 \times 20 \times 3,35$
As dimensões devem ser apresentadas em milímetros.		

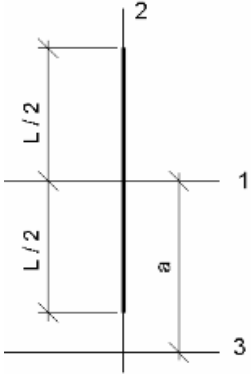
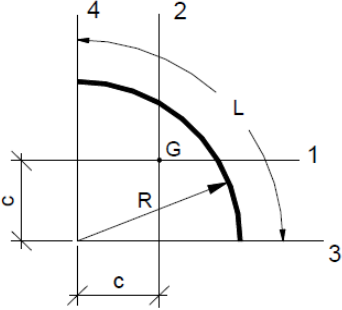
Fonte: ABNT NBR 6355:2012 - Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização

Os perfis de aço dobrado a frio oferecem a possibilidade da elaboração de um formato não convencional, dando oportunidade ao projetista de criar um padrão econômico de perfil, no qual as suas características geométricas serão melhor aproveitadas. Para esses casos de perfis especiais as tabelas de características geométricas logicamente não apresentarão diretamente os valores para uso, sendo necessário sua determinação através de cálculos. Usualmente para esses casos, as opções utilizadas para o cálculo das características são o Método Linear, o Método Simplificado e o uso de prontuários de resistência dos materiais que contém expressões para características especiais como constate de empenamento, momento de inércia à torção e centro de cisalhamento.

As simplificações e hipóteses admitidas na ABNT NBR 6355:2012 supõem os perfis com seção transversal bruta, espessura constante da parte plana, sem revestimentos e com raio de dobramento compatível à espessura. Devido à fina espessura das chapas, o Método Linear considera que toda a matéria do perfil está concentrada na linha média da seção e, portanto, o perfil pode ser subdividido em elementos básicos, com representação de linhas retas para as partes planas (mesa, alma, enrijecedor de borda) e de arcos para as dobras. Posteriormente, pode-se calcular as propriedades da seção e os valores obtidos devem ser

multiplicados pela espessura do perfil para se obter características próximas à realidade. No cálculo da constante de empenamento e da posição do centro de torção, as dobras são consideradas como cantos retos.

Tabela 2 – Propriedades geométricas de linhas e arco

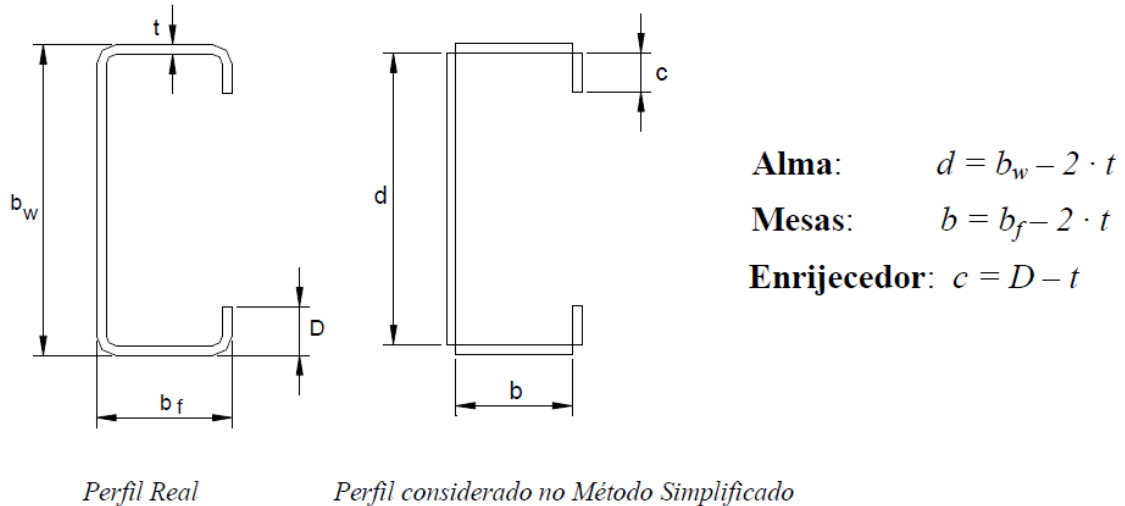
Elemento primário	Características geométricas
	$I_1 = \frac{L^3}{12}$ $I_2 = 0$ $I_3 = I_1 + La^2$
	$L = 1,571R ; c = 0,637R$ $I_1 = I_2 = 0,149R^3$ $I_3 = I_4 = 0,785R^3$ $I_{12} = -0,137R^3$ $I_{34} = 0,5R^3$

Fonte: CARVALHO; GRIGOLETTI; BARBOSA, 2014

Carvalho, Grigoletti e Barbosa (2014) sugerem o Método Simplificado, desconsiderando as características geométricas das dobras entre elementos e representando-os com cantos vivos, compondo o perfil como um conjunto de retângulos. Assim como o procedimento descrito anteriormente, este também é um método aproximado com foco na simplicidade e rapidez, se mostrando uma opção viável já que oferece resultados significativamente bons e, por vezes, melhores que o Método Linear. Esses retângulos têm como base a espessura característica da própria chapa de aço enquanto que a altura deve ser determinada pela análise das bordas, se o elemento é de bordas vinculadas AA ou com borda livre AL e o ângulo da dobra. Para dobras em ângulo reto (90°) e elementos AA este valor será a largura nominal (usada na descrição do perfil) reduzida por duas vezes a espessura da chapa e para elementos AL a redução será de uma vez a espessura. Outros exemplos são para elementos AL e dobra 45°, onde a diminuição é de metade da espessura

e elemento AA com uma dobra, e elementos AA com uma dobra a 90° e outra a 45°, onde o valor a ser diminuído é uma vez a espessura.

Figura 7 – Representação do Método Simplificado



Fonte: CARVALHO; GRIGOLETTI; BARBOSA, 2014

2.2.2 Métodos de Fabricação

Dos métodos de fabricação citados em norma, o primeiro em prensa dobradeira - também chamada de prensa viradeira - é um método com menor custo financeiro investido nos equipamentos porém de maior mão de obra e menor produção se comparado ao segundo método de conformação. A prensa é de funcionamento simples e composta por dois instrumentos: a mesa na qual tem o formato da dobra desejada e pelo punção que exerce uma pressão o suficiente para dobrar a chapa á conformando de acordo com a mesa. Repetindo os processos de reposicionamento da chapa para efetuar mais dobras, se chega ao perfil com a geometria final desejada de forma descontínua. Para uma melhor produtividade, na faixa de 20 metros/minuto para perfis simples, é recomendado o uso de uma prensa guilhotina que fica responsável por cortar as chapas previamente no comprimento desejado, que variam entre 3 a 6 metros, mas podendo chegar à 14 metros em condições especiais (CARVALHO; GRIGOLETTI; BARBOSA, 2014).

Como já citado, pelo processo de conformação contínua se obtém uma maior produção e menor utilização de mão de obra, fatores que qualificam esse método para o processo industrial de fabricação em grande escala e comercialização desses perfis pelas empresas siderúrgicas. O método se dá pela passagem de tiras de aço, com largura previamente definida pela geometria do perfil, por conjuntos de cilindros dispostos em sequência, sendo cada par deles responsável por uma dobra até se atingir o perfil desejado. Usualmente a velocidade de fabricação varia de 23 a 46 metros/minuto, podendo chegar até

92 metros/minuto, e a bateria de cilindros entre 6 a 15 pares, dependendo da complexidade do perfil. Os perfis formados por esse modo praticamente não têm restrição de comprimento, mas estão limitados ao esforço do maquinário e dimensões dos cilindros, formando perfis comumente com largura total da chapa de 915 mm e espessura de 19 mm (YU; LABOUBE, 2010).

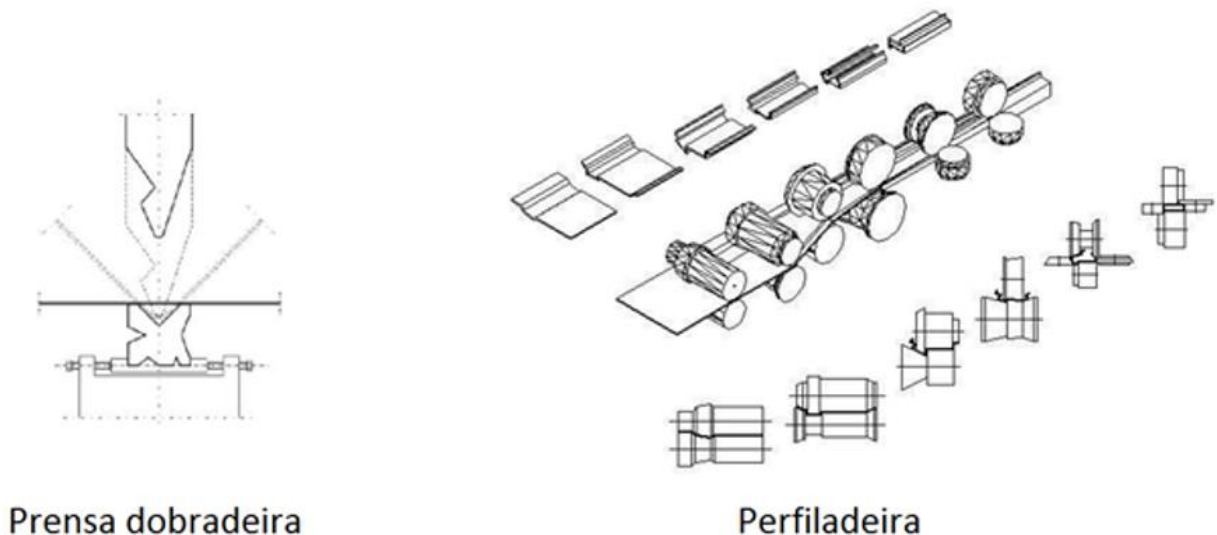
A tabela a seguir resume as informações apresentadas:

Tabela 3 – Métodos de produção

Conformação Descontínua	Conformação Contínua
Muita flexibilidade para produzir diversas formas de perfis	Pouca flexibilidade para produzir diversas formas de perfis
Produção de uma série mesmo com poucas ferramentas	Cada série precisa de um trem de perfilação
Baixo custo de equipamento	Alto custo de equipamento
Regulagem simples do equipamento	Regulagem do equipamento requer cuidados
Tensões residuais menores que na perfiladeira	Tensões residuais maiores que na dobradeira
Pequena produção	Produção em massa
Perfis curtos	Perfis com comprimento praticamente ilimitado
Razoável mão de obra envolvida	Pouca mão de obra envolvida

Fonte: CARVALHO; GRIGOLETTI; BARBOSA, 2014

Figura 8 – Métodos de fabricação do perfil formado a frio



Fonte: CARVALHO; GRIGOLETTI; BARBOSA, 2014

2.2.3 Propriedades Mecânicas e Influência do Trabalho a Frio

Carvalho, Grigoletti e Barbosa (2014) apresentam na Tabela 4 os aços mais utilizados comercialmente, com limites de escoamento e ruptura e espessuras disponíveis no mercado. Outros aços com características mecânicas adequadas para admitir o trabalho a frio também são aceitos por norma, inclusive aços sem qualidade estrutural aos quais deve se impor um limite de 180 MPa para resistência ao escoamento e 300 MPa para resistência à ruptura.

Tabela 4 – Chapas de aço para uso estrutural

Aço	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Espessuras disponíveis (mm)	Características
SAE 1010 ¹	180	330		Aço comercial
ASTM A36	250	400	2,0 a 150	Estrutural
ASTM A570 GR36	250	365	2,0 a 5,84	Estrutural
COS-AR-COR 400	250	380	2,0 a 100	Aço patinável
COS-CIVIL 300	300	400	2,0 a 150	Estrutural especial
USI-SAC-300	300	400	2,0 a 12,7	Aço patinável
COS-AR-COR 400 E	300	380	2,0 a 12,7	Aço patinável
CSN-COR 420	300	420	2,0 a 6,3	Aço patinável
COS-CIVIL 350	350	490	2,0 a 50,8	Estrutural especial
ASTM A570 GR50	345	450	2,0 a 5,84	Estrutural
USI-SAC-350	350	485	2,0 a 12,7	Aço patinável
USI-LN 380	380	490	2,0 a 12,7	Estrutural especial
COS-AR-COR 500	375	490	2,65 a 50,8	Aço patinável

1- Esse aço não tem qualidade estrutural. Entretanto, seu emprego é tolerado desde que seja adotado o limite de escoamento como 180 MPa

Fonte: CARVALHO; GRIGOLETTI; BARBOSA, 2014

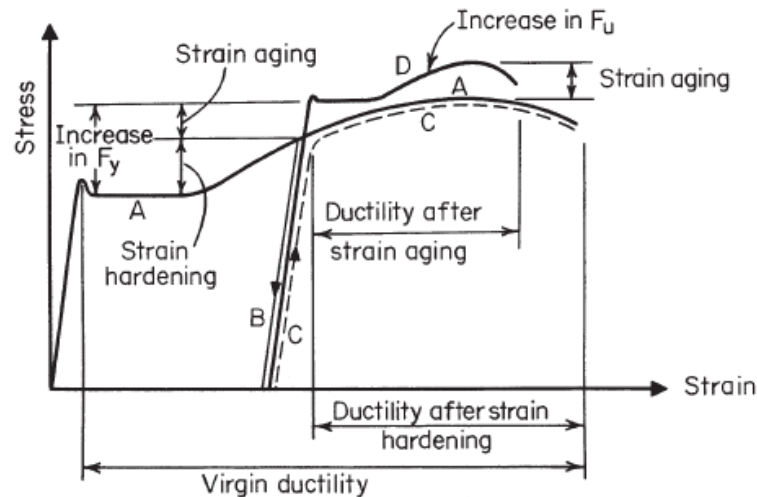
Assim como em projetos de perfil laminado, os perfis formados a frio tem características mecânicas do aço em geral com valores determinados em norma:

- Módulo de elasticidade $E = 200.000 \text{ MPa}$;
- Coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$;
- Módulo de elasticidade transversal $G = 77.000 \text{ MPa}$;
- Coeficiente de dilatação térmica $\beta = 12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;
- Massa específica $\rho = 7.850 \text{ kg/m}^3$.

Além das resistência ao escoamento, resistência à ruptura e as características citadas acima, outras propriedades são de extrema importância para o uso do aço no dimensionamento estrutural. Diversas bibliografias como Pinheiro (2005), Pfeil e Pfeil (2009) e Yu e LaBoube (2010) evidenciam a ductilidade, dureza, resistência à fadiga, resistência à corrosão e soldabilidade como relevantes para as chapas, além de claro durabilidade e conformabilidade, características essenciais para aplicação em perfis dobrados a frio.

Contudo, apesar da grande maioria das características permanecerem inalteradas durante o trabalho a frio, algumas propriedades mecânicas se alteram e merecem ser discutidas, principalmente a influencia na resistência ao escoamento, ruptura e ductilidade dos perfis. O dobramento da chapa, quer utilizando dobradeira ou perfilação, acarreta em um fenômeno conhecido por encruamento ou envelhecimento, onde o elemento é carregado até a zona plástica (gerando uma deformação permanente e alterando a estrutura do material), para depois ser descarregado e posteriormente carregado novamente quando for empregado na construção. Esse processo gera um aumento em ambas resistências ao escoamento e à ruptura, sendo mais pronunciada no escoamento e conseqüentemente diminuindo o patamar entre escoamento e ruptura, no entanto também faz com que o material se torne mais frágil.

Figura 9 – Influência do trabalho a frio no aço dobrado

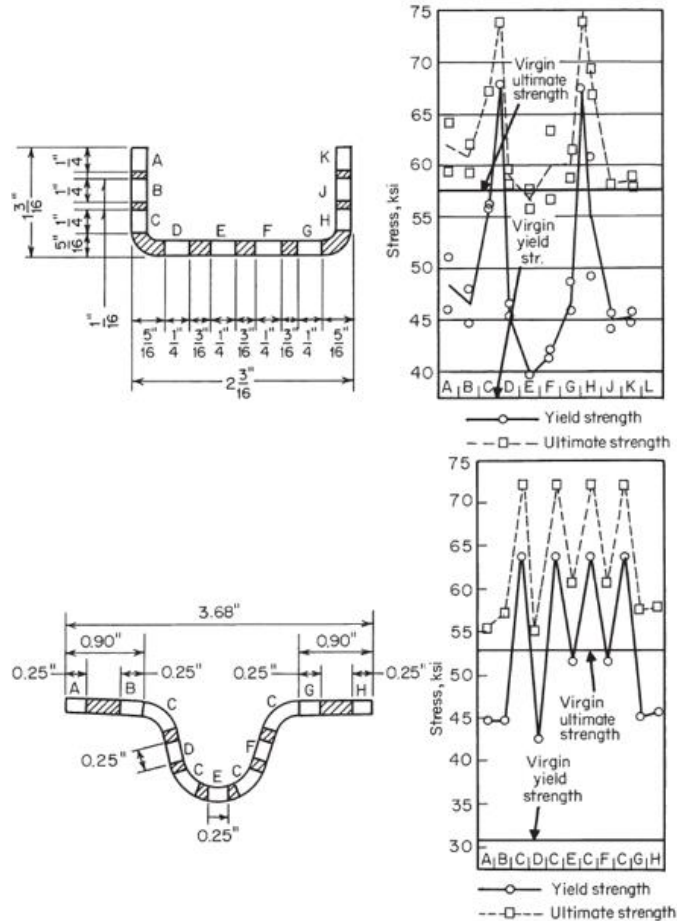


Fonte: YU; LABOUBE, 2010

Como a região da dobra é mais sujeita ao trabalho do que a parte plana, ela também é a mais influenciada pelo fenômeno do encruamento, fazendo com que a seção tenha diferentes propriedades em diferentes partes como pode ser visto na Figura 10. Esse desequilíbrio faz com que os efeitos de flambagem e escoamento comecem sempre pelas partes planas da seção, devido a sua menor resistência. Como analisado que o efeito é maior nas zonas de dobra, o processo de fabricação influencia na alteração das características do perfil. No processo descontínuo, a prensa faz o carregamento direto na região da curva,

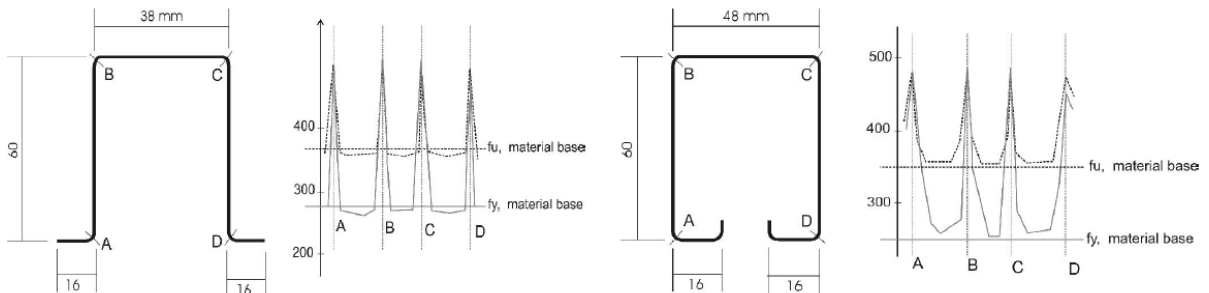
concentrando assim os efeitos mais nesse região. Já no processo contínuo em perfiladeiras, todo o perfil está sobre tensão dos roletes, fazendo com que as partes planas também tenham um acréscimo, mesmo que muito inferior ao da parte conformada.

Figura 10 – Efeito do trabalho a frio em diferentes seções do perfil



Fonte: YU; LABOUBE, 2010

Figura 11 – Efeito do trabalho a frio por processo de fabricação em prensa dobradeira e perfiladeira



Fonte: CBCA, 2014

Segundo a norma ABNT NBR 14762:2010, a resistência ao escoamento do aço modificada f_{ya} , levada em consideração o efeito do trabalho a frio, pode ser substituída da resistência ao escoamento do aço virgem f_y para o dimensionamento, desde que esse valor

tenha sido determinado por ensaios de norma. Ademais, os perfis submetidos à compressão ou flexão devem ser perfis constituídos por elementos não esbeltos ($\lambda_p = 0,673$) ou apresentar seção com área efetiva igual a área do perfil. Segundo Carvalho, Grigoletti e Barbosa (2014), na realidade do dimensionamento estrutural de perfis formados a frio é mais comum o uso de perfis esbeltos, além de nem sempre ser plausível o ensaio para perfis especiais, sendo assim, é habitual o uso das características físicas da chapa de aço virgem, deixando o aumento do limite de escoamento como um resguardo para a estrutura.

2.2.4 Comportamento e Conceitos para Verificação de Perfis Formados a Frio

De acordo com Halliday, Resnick e Walker (2009), quando um objeto tem seu momento linear e angular constante ele se encontra em equilíbrio e no caso em que essas constantes são nulas, ou seja, não ocorre translação e rotação, o objeto se encontra em equilíbrio estático. A concepção de equilíbrio estático está dividida em três condições: equilíbrio estável, equilíbrio neutro e equilíbrio instável. Na forma estável, o corpo retorna ao mesmo estado de equilíbrio após ter sido deslocado pela atuação de uma força. No equilíbrio neutro, o corpo ao ser deslocado encontra um equilíbrio estático diferente do inicial. Finalmente, no modo instável, o corpo ao ser submetido a uma força que provoque seu deslocamento, não encontra mais um ponto de equilíbrio permanente.

Para estruturas formadas a frio, que são caracterizadas por serem esbeltas, este é um conceito importante quando submetidas à compressão ou flexão, já que estas estruturas estão sujeitas a deixar de cumprir sua função estrutural em cargas muito inferiores ao que se espera quando comparado ao limite de escoamento do material. Isso se dá pois, após um certo nível de carregamento, chamado de carga crítica, a estrutura passa a se comportar em equilíbrio instável e fica sujeita ao que chamamos de instabilidade por flambagem.

Uma barra ideal, sem imperfeições, ao se aplicar uma carga crítica centrada, pode se manter na sua posição inicial em equilíbrio instável ou por alguma perturbação, procurar um equilíbrio estável na forma deformada, existindo duas soluções teóricas e uma bifurcação no diagrama de força x deslocamento, definindo assim a ocorrência da flambagem. Em condições reais, devido à imperfeições geométricas na manufatura dos materiais, o carregamento axial causará uma flexão-composta desde o início, não ocorrendo por definição a flambagem. No entanto, devido a mínimas imperfeições encontradas no aço e ao fato das instabilidades reais lembrarem as deformações por flambagem, os manuais e normais brasileiras, como a ABNT NBR 14762:2010, admitem o termo flambagem indistintamente para simplificação do problema (CBCA, 2014).

Nas técnicas de dimensionamento presentes em normas, que observam o desempenho dos perfis através da aplicação da teoria clássica de placas, várias situações diferentes devem ser analisadas para se determinar a carga crítica que determinado perfil suporta. Esta placa quando submetida a esforços axiais pode entrar em ruína por escoamento, flambagem ou por uma combinação das duas. Quando esse esforço é de tração, as imperfeições e curvaturas iniciais tendem a se corrigir, assim o colapso nessa situação se dá por escoamento e ruptura, diferente do esforço de compressão, que amplifica essas deformidades gerando problemas de flambagem no elemento. Segundo Carvalho, Grigoletti e Barbosa (2014), apenas placas curtas e muito espessas, com relação largura/espessura menor do que 10 e índice de esbeltez menor que 20, estão sujeitas ao escoamento puro quando comprimidas. Já os elementos esbeltos estão mais sujeitos, além do escoamento, às instabilidades globais e locais e suas características geométricas, vinculações e carregamento estabelecem quais podem ocorrer (JAVARONI, 1999).

2.2.4.1 Flambagem Global

Se tratando em instabilidade global, essa pode ser dividida em três categorias: flambagem por flexão, flambagem por torção e flambagem por flexo-torção, assim denominadas pela sua deformada, que se trata da posição do seu perfil após a deformação. Quanto maior a esbeltez da peça, maior a influência da flambagem global, chegando ao limite em que a seção efetiva para o dimensionamento será a própria seção do perfil, desprezando o efeito de flambagem local e determinando a capacidade de carga do perfil (CBCA, 2014).

A flambagem por flexão, também conhecida por flambagem de Euler, se configura pelo movimento da seção original paralelo ao eixo do perfil de menor inércia, sendo a seção deformada idêntica a original mas transladada, e ocorrendo em perfis de seção cheia, duplamente simétricos ou simétricos em relação a um ponto. A flambagem por torção ocorre em perfis duplamente simétricos com rigidez rotacional pequena, onde a deformada sofre uma torção, caracterizada por apresentar um seção flambada idêntica mas rotacionada em torno do eixo longitudinal do perfil. Por último, a flexo-torção ocorre em perfis monossimétricos ou com nenhum eixo de simetria e ela é um efeito da combinação de ambas flambagens, ocorrendo a translação e rotação da seção do perfil (TIMOSHENK; GERE, 1961)

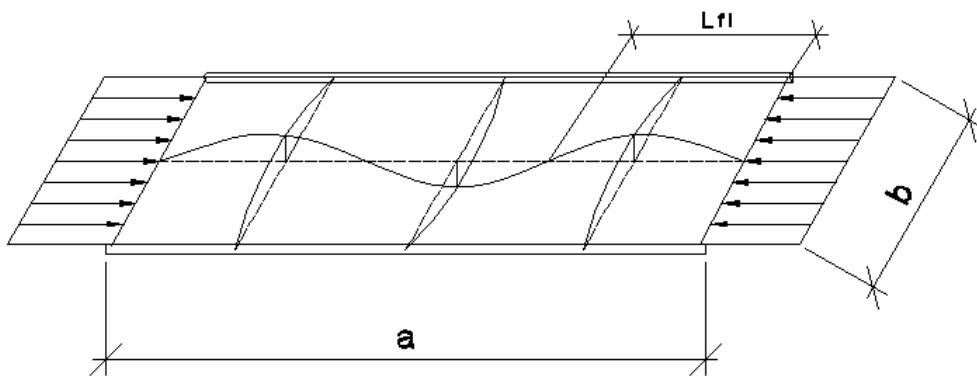
2.2.4.2 Flambagem local e resistência pós-flambagem

Quando o perfil é comprimido, além das instabilidades globais que a peça inteira pode sofrer, cada um dos seus elementos também pode ser afetado a um nível local, onde cada um deles pode apresentar, de forma isolada ou em conjunto, deslocamentos laterais na forma de ondulações ou rugas que são conhecidas por flambagem local (PFEIL; PFEIL, 2009). Na

classe de perfis laminados estes efeitos produzem pouca influência, devido ao fato das seções serem mais espessas e diminuírem a relação largura/espessura. No entanto, em perfis formados a frio, essa verificação é indispensável visto que são perfis constituídos de elementos com relação largura/espessura relativamente altos e o efeito da flambagem local se torna comum, podendo levar a estrutura a ruína antes de se atingir as cargas críticas de escoamento e de flambagem global.

Para essa análise, se usa os estudos de Timoshenko para o cálculo da tensão crítica (Eq. 2.1) e se tem como base o comportamento de uma chapa bidimensional, apoiada em seus bordos e sujeitas a pequenos deslocamentos por efeito de cargas de compressão uniformemente aplicadas.

Figura 12 – Flambagem de uma placa retangular



Fonte: CARVALHO; GRIGOLETTI; BARBOSA, 2014

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)(b/t)^2} \quad (2.1)$$

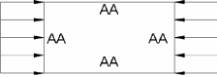

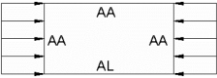

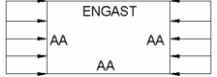


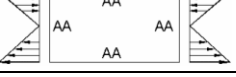
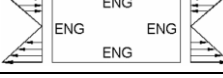
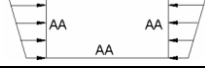
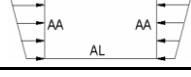
onde:

E é o módulo de elasticidade do aço;

ν é o Coeficiente de Poisson do aço;

k é o coeficiente de flambagem da placa, dependendo das condições dos apoios e tipo de solicitação;

Tabela 5 – Valores teóricos do coeficiente de flambagem k para placas

Caso	Condições de contorno	Tipo de solicitação	Valor de k	L_{fl}
1		Compressão	4,0	$L_{fl} = b$
2		Compressão	6,97	$L_{fl} = 0,66b$
3		Compressão	0,425 0,675	$L_{fl} = \infty$ $L_{fl} = 2b$
4		Compressão	1,277	$L_{fl} = 1,63b$
5		Compressão	5,42	
6		Corte	5,34 9,35	$L_{fl} = \infty$ $L_{fl} = b$
7		Corte	8,98	
8		Flexão	23,9	$L_{fl} = 0,7b$
9		Flexão	41,8	
10		Compressão + Flexão	7,81	$L_{fl} = b$
11		Compressão + Flexão	0,57	$L_{fl} = \infty$

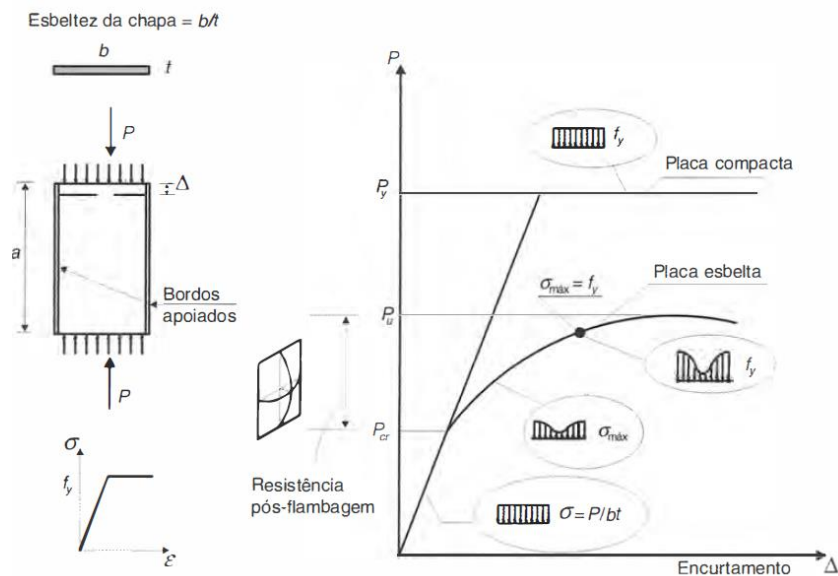
L_{fl} é o comprimento de flambagem ou meio-comprimento de onda

Fonte: CARVALHO; GRIGOLETTI; BARBOSA, 2014

Diferente da situação de flambagem em barras, diversos estudos demonstraram que placas esbeltas não entram em imediato colapso na flambagem local e podem resistir ao aumento considerável de tensões mesmo após a carga crítica ter sido atingida, fenômeno conhecido por resistência pós-flambagem. Como pode ser visto na Figura 13, ao se aumentar gradativamente o carregamento de compressão, a tensão da placa se mantém uniforme até a carga crítica. A partir desse ponto as tensões são redistribuídas devido a deflexões e perda de rigidez na parte central da placa, enquanto a parte junto ao apoio, que tem uma rigidez a deformação maior, continua resistindo ao aumento de tensão com mínima deformação. A

capacidade resistente da placa só atingirá seu limite quando as fibras mais comprimidas alcançarem a resistência de escoamento do aço, quando então entrará em colapso (PFEIL; PFEIL, 2009). Carvalho, Grigoletti e Barbosa (2014) fazem a analogia das placas com grelhas, onde os fibras verticais são comprimidos enquanto as fibras horizontais servem como cintas, amarrando e impedindo um grande deslocamento das fibras verticais. Longe dos apoios as cintas são mais frouxas e têm menos poder de amarração acarretando em uma flambagem dos elementos verticais, enquanto que perto dos apoios elas são mais eficazes e restringem melhor os deslocamentos.

Figura 13 – Comportamento de placa isolada perfeita sob compressão



Fonte: PFEIL; PFEIL, 2010

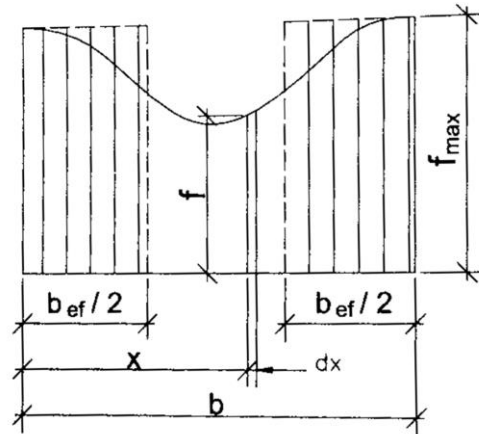
A avaliação teórica da resistência pós-flambagem é complexa e seu dimensionamento correto dependeria de uma análise não-linear. Para simplificar, surgiram conceitos como a largura efetiva sugerido por Von Kármán em 1932, de substituir a distribuição de tensão não-linear por uma distribuição mais simples e mais recentemente métodos computacionais que tratam o assunto mais a fundo.

2.2.4.3 Método da Largura Efetiva (MLE)

Para o dimensionamento, diversas normas, incluindo a ABNT NBR 14762 (2010) – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, adotam o Método da Largura Efetiva derivado dos estudos de Von Kármán e corrigidos por experimentos de George Winter. Nesse procedimento o perfil é tido como a união de placas isoladas entre si, cada uma atuando como apoio para a placa adjacente, a distribuição de tensões adotada tem formato linear e é aplicada ao longo de uma largura efetiva fictícia de forma a resultar na mesma força de compressão imposta ao perfil. Para elementos AA a

largura efetiva é dividida em dois intervalos, um em cada lado do apoio desprezado assim a parte central já flambada, enquanto que para elementos AL a largura efetiva se encontra apenas no lado do apoio, desconsiderando a parte mais à extremidade do elemento que terá menor resistência.

Figura 14 – Comportamento de placa isolada perfeita sob compressão



Fonte: CARVALHO; GRIGOLETTI; BARBOSA, 2014

Para se obter a largura efetiva dos elementos que compõem o perfil, deve-se calcular o índice de esbelteza reduzido λ_p para cada elemento, apresentado na Equação 2.2, e posteriormente, prossegue-se com o cálculo da largura efetiva b_{ef} do elemento em questão conforme Equações 2.3 e 2.4.

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}} \quad (2.2)$$

$$\text{para } \lambda_p \leq 0,673: \quad b_{ef} = b \quad (2.3)$$

$$\text{para } \lambda_p > 0,673: \quad b_{ef} = b(1 - 0,22/\lambda_p)/\lambda_p \quad (2.4)$$

onde:

b é a largura do elemento;

t é a espessura do elemento;

E é o módulo de elasticidade do aço;

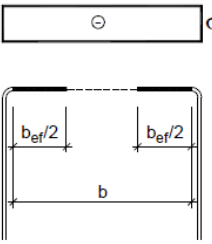
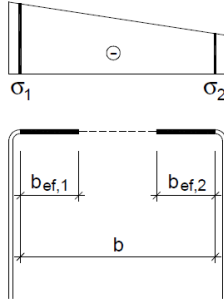
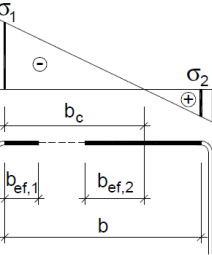
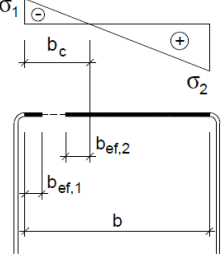
k é o coeficiente de flambagem local do elemento, calculado de acordo com as Tabelas 6 e 7 para elementos AA e elementos AL, respectivamente;

σ é a tensão normal de compressão; para o estado-limite último de escoamento da seção e para elementos totalmente ou parcialmente comprimidos, é a máxima tensão de

compressão quando a seção atinge o escoamento; para o estado-limite último de instabilidade da barra é a tensão de escoamento multiplicada por um fator de redução associado a flambagem global χ discutido na seção 3.2.

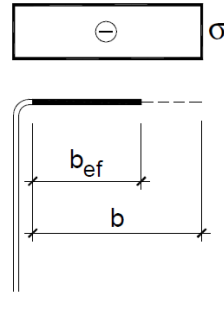
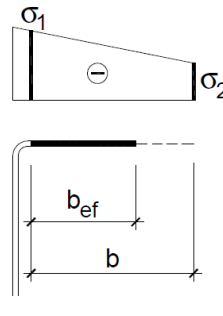
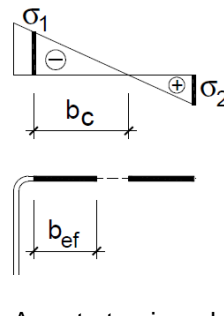
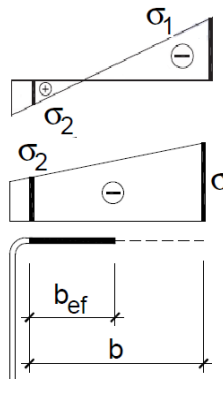
As Tabelas 6 e 7 mostram os valores de k adotados por norma, dependendo do tipo de carregamento e condições de apoio. Segundo estudos de Santos (2002), esses valores são conservadores, já que consideram ligações perfeitamente apoiadas entre elementos, enquanto na realidade a ligação fica entre o apoio e o engaste. No entanto, se espera mais estudos que fundamentem esses valores e alterem os coeficientes de norma. É importante notar que os trechos tracionados do elemento são considerados efetivos em determinadas situações e no caso dos trechos comprimidos é que existe o cálculo da parte efetiva.

Tabela 6 – Valores do coeficiente de flambagem local k para elementos AA

Caso a		Caso b	
$k = 4,0$		$0 \leq \Psi = \sigma_2/\sigma_1 < 1,0$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3-\Psi)$ $b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$ $k = 4+2(1-\Psi)+2(1-\Psi)^3$	
$-0,236 \leq \Psi = \sigma_2/\sigma_1 < 0$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3-\Psi)$ $b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$ $k = 4+2(1-\Psi)+2(1-\Psi)^3$	 <p>A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva</p>	$\Psi = \sigma_2/\sigma_1 \leq -0,236$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3-\Psi)$ $b_{ef,2} = 0,5b_{ef}$ sendo $b_{ef,1} + b_{ef,2} \leq b_c$ $k = 4+2(1-\Psi)+2(1-\Psi)^3$	 <p>A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva</p>
Nota: o sinal (-) indica compressão.			

Fonte: ABNT NBR 14762:2010 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio

Tabela 7 – Valores do coeficiente de flambagem local k para elementos AL

Caso a		Caso b	
$k = 0,43$		$0 \leq \Psi = \sigma_2/\sigma_1 < 1,0$ $k = 0,578 / (\Psi + 0,34)$	
Caso c		Caso d	
$-1,0 \leq \Psi = \sigma_2/\sigma_1 < 0$ $k = 1,7 - 5\Psi + 17,1\Psi^2$	 <p>A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva</p>	$-1,0 \leq \Psi = \sigma_2/\sigma_1 \leq 1,0$ $k = 0,57 - 0,21\Psi + 0,07\Psi^2$	
Nota: o sinal (-) indica compressão.			

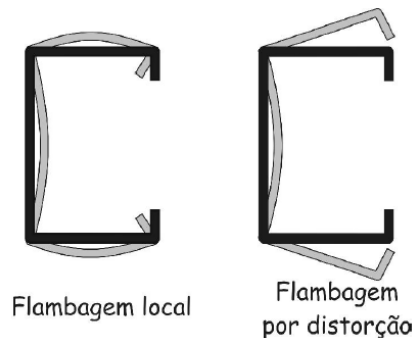
Fonte: ABNT NBR 14762:2010 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio

2.2.4.4 Flambagem distorcional

Além das instabilidades já citadas, outro tipo é a flambagem por distorção, caracterizada pela rotação dos elementos do perfil em sentidos opostos e perda do seu formato inicial. Ela é mais comum em perfis pouco esbeltos, com enrijecedores e travamentos laterais, fazendo com que a carga crítica para distorção seja alcançada antes da carga das outras instabilidades. Este também é um estudo complexo e as normas adotam simplificações para sua avaliação. Um das possíveis maneiras proposta por norma é através do uso de programas de elementos finitos para o cálculo da força axial de flambagem distorcional elástica para posterior redução da resistência do perfil. Outros métodos consistem em utilizar formulação direta aproximada consultando literatura especializada para seções simples, como o Anexo F da norma ABNT NBR 14762:2010 ou a simplificação de Hancock apresentada no Anexo D da edição de 2001. É possível, ainda, o uso de um perfil com dimensões geométricas

dentro de um limite de relações entre espessura, largura da alma, largura da mesa e largura do enrijecedor, fazendo com que a verificação seja dispensada.

Figura 15 – Flambagem local e Flambagem distorcional de um perfil U enrijecido



Fonte: CBCA, 2014

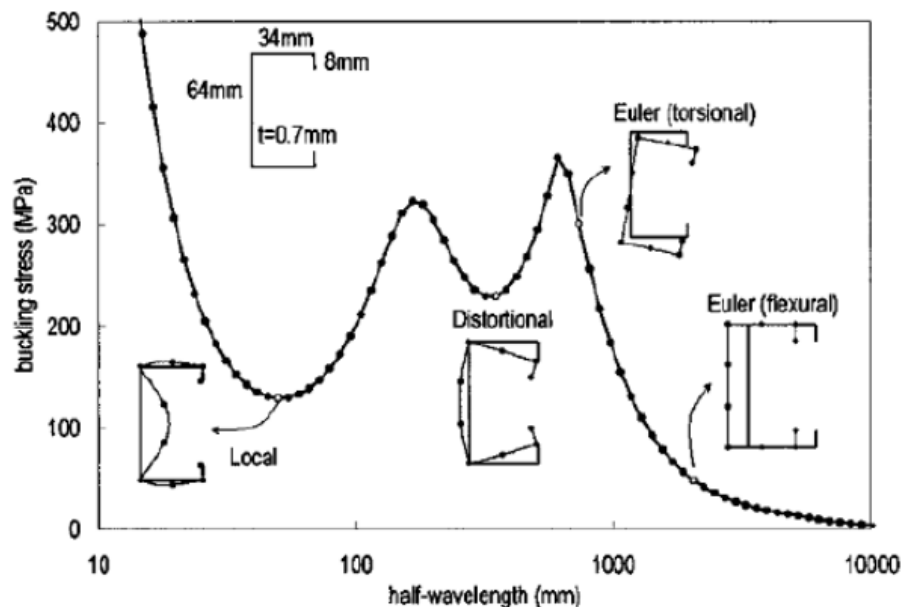
Apesar do Método da Largura Efetiva (MLE) ser consagrado e bem difundido para o dimensionamento de perfis de aço formado a frio, ele contém desvantagens devido às suas simplificações ao considerar os componentes do perfil de forma individual, à ter um volume de cálculo grande dependendo do formato do perfil e dificultar a utilização de geometrias especiais otimizadas, além da dificuldade em incluir o modo de flambagem distorcional (CARVALHO; GRIGOLETTI; BARBOSA, 2014). Adicionalmente ao Método da Largura Efetiva, a ABNT NBR 14762:2010 propõe também outras duas opções para o dimensionamento de barras: o Método da Seção Efetiva (MSE), apresentado junto aos procedimentos de cálculo do Método da Largura Efetiva para dimensionamento, e o Método da Resistência Direta (MRD), presente em seu Anexo C.

2.2.4.5 Método da Resistência Direta (MRD)

Com o progresso dos métodos computacionais e para aperfeiçoar o dimensionamento de perfis de aço dobrado a frio submetidos a compressão centrada e flexão simples, Schafer e Pekoz (1998) elaboraram o Método da Resistência Direta assim como um *software* livre de análise estrutural denominado *CU-FSM (Cornell University Finite Strip Method)* que considera a interação entre os elementos do perfil pelo método de faixas finitas para o cálculo dos esforços resistentes. A estratégia adotado no método é utilizar curvas de resistência, refinadas por ensaio, para determinar as cargas de colapso de toda a seção do perfil a partir da força de flambagem elástica, sem a necessidade de determinar partes efetivas e recalculas as propriedades geométricas da seção. Outra considerável vantagem deste procedimento é a consideração da flambagem distorcional de forma clara e a acessível obtenção da força crítica de flambagem elástica que pode ser feita por métodos analíticos ou computacionais utilizando o programa disponibilizado.

O programa *CU-FSM* possibilita realizar a análise de estabilidade elástica para perfis de parede fina, como os de aço dobrado a frio, de forma a obter a força normal dos modos de instabilidade local, distorcional e global em carga relativa ao limite de escoamento da seção para posterior cálculo das forças resistentes. É possível a análise de diferentes distribuições de tensões no perfil, assim como restrições dos graus de liberdade dos nós extremos, ficando restrito, como condição de contorno, o uso de carregamento constante ao longo do comprimento da barra e variação da seção transversal. Para facilitar o dimensionamento e a visualização dos resultados junto aos diferentes tipos de instabilidade, é apresentado um gráfico como o exemplificado na Figura 16, formado após a análise de diferentes comprimentos de perfil, resultando nas forças críticas de flambagem elástica e seus correspondentes modos de flambagem.

Figura 16 – Análise de estabilidade elástica



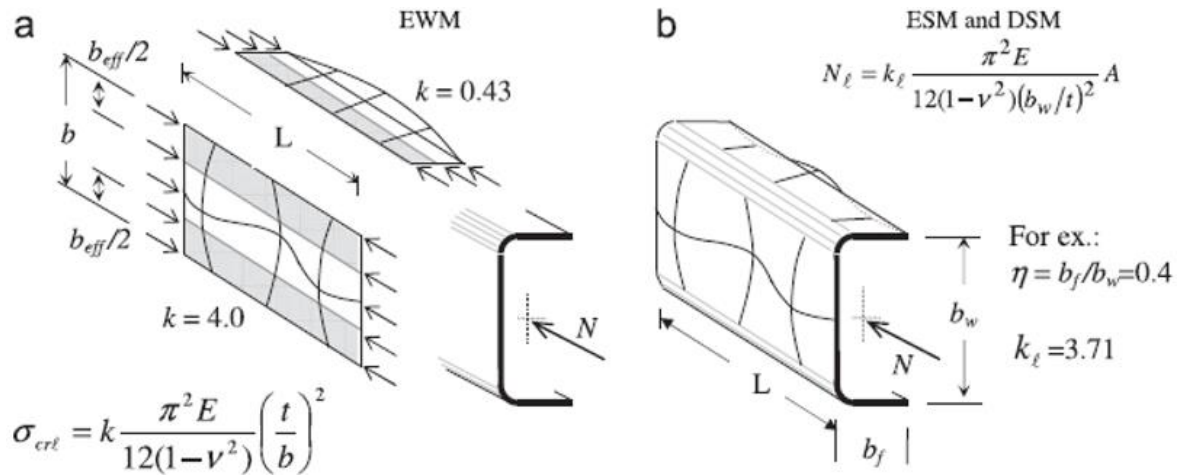
Fonte: SCHAFFER, 2002

2.2.4.6 Método da Seção Efetiva (MSE)

Assim como no Método da Largura Efetiva, o Método da Seção Efetiva, proposto por Batista (2009), considera a flambagem local através da redução das propriedades geométricas do perfil, utilizando para efeito de dimensionamento a área efetiva do perfil completo obtida diretamente, e não da combinação dos componentes do perfil. Ele se utiliza da força de flambagem elástica local para alcançar essas propriedades, parametrizando as curvas do Método da Resistência Direta para os tipos de perfil mais utilizados na construção civil, variando suas dimensões e relacionando-as a força de flambagem elástica local, determinando assim coeficientes para serem utilizados na área do perfil e subsequentemente no dimensionamento. É um método de fácil utilização, porém é necessário trabalhar com os

perfis já estudados, sendo necessária uma nova análise elástica para perfis não compreendidos na tabela.

Figura 17 – Flambagem local de um perfil pelo MLE e MSE



Fonte: BATISTA, 2009

A seguir se mostrará os cálculos para se determinar a área efetiva A_{ef} para estruturas comprimidas.

$$A_{ef} = A \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_p^{0,8}} \right) \frac{1}{\lambda_p^{0,8}} \leq A \quad (2.5)$$

onde:

λ_p é o índice de esbeltez reduzido dado por:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\chi A f_y}{N_{\ell}}} \quad (2.6)$$

A é a área bruta da seção transversal do perfil;

f_y é a resistência ao escoamento do aço;

χ é o fator de redução da força axial de compressão resistente associado a flambagem global, discutido na seção 3.2;

N_{ℓ} é a força axial de flambagem local elástica, calculada por meio de análise de estabilidade elástica, ou, de forma direta segundo a expressão:

$$N_{\ell} = k_{\ell} \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} (b_w/t)^2 A \quad (2.7)$$

onde:

E é o módulo de elasticidade do aço;

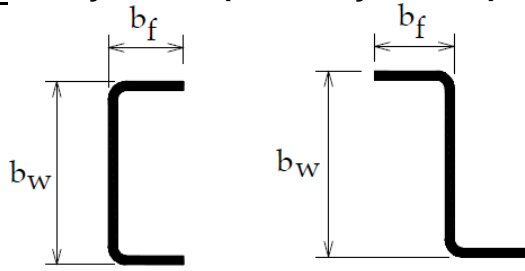
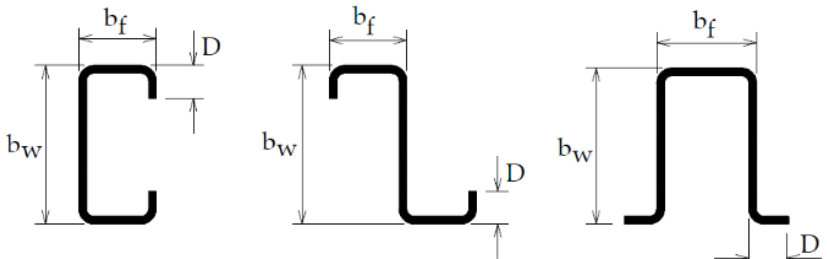
ν é o coeficiente de Poisson;

b_w é a largura do elemento;

t é a espessura da seção transversal do perfil;

k_ℓ é o coeficiente de flambagem local para a seção completa em barras sob compressão, calculado através das expressões na Tabela 8;

Tabela 8 – Coeficiente de flambagem local k_ℓ para a seção completa em barras sob compressão

Seção U simples e Seção Z simples	
Caso a	 <p style="text-align: center;">$k_\ell = 4,0 + 3,4\eta + 21,8\eta^2 - 174,3\eta^3 + 319,9\eta^4 - 237,6\eta^5 + 63,6\eta^6$ ($0,1 \leq \eta \leq 1,0$)</p>
Seção U enrijecido, Seção Z enrijecido e Seção cartola	
Caso b	 <p style="text-align: center;">$k_\ell = 6,8 - 5,8\eta + 9,2\eta^2 - 6,0\eta^3$ ($0,1 \leq \eta \leq 1,0$ e $0,1 \leq D/b_w \leq 0,3$)</p>
$\eta = b_f/b_w$	

Fonte: ABNT NBR 14762:2010 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio

Para o cálculo do módulo de resistência elástico efetivo W_{ef} se procede de forma semelhante.

$$W_{ef} = W \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \frac{1}{\lambda_p} \leq W \quad (2.8)$$

onde:

λ_p é o índice de esbeltez reduzido dado por:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{W f_y}{M_\ell}} \quad (2.9)$$

W é módulo de resistência elástico da seção bruta do perfil em relação a fibra extrema que atinge o escoamento;

f_y é a resistência ao escoamento do aço;

M_ℓ é o momento fletor de flambagem local elástica, calculada por meio de análise de estabilidade elástica, ou, de forma direta segundo a expressão:

$$M_\ell = k_\ell \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)(b_w/t)^2} W_c \quad (2.10)$$

onde:

E é o módulo de elasticidade do aço;

ν é o coeficiente de Poisson;

b_w é a largura do elemento;

t é a espessura da seção transversal do perfil;

k_ℓ é o coeficiente de flambagem local para a seção completa em barras sob flexão, calculado através das expressões na Tabela 9;

Tabela 9 – Coeficiente de flambagem local k_ℓ para a seção completa em barras sob flexão

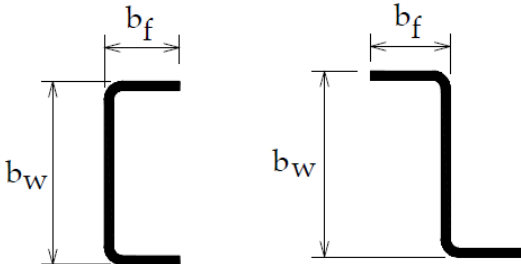
Seção U simples e Seção Z simples	
Caso a	
	$k_\ell = \eta^{-1,843}$ $(0,1 \leq \eta \leq 1,0)$

Tabela 9 (conclusão)

Seção U enrijecido, Seção Z enrijecido e Seção cartola	
Caso b	
	<p>Expressões válidas para $0,2 \leq \eta \leq 1,0$ e valores de μ indicados</p> $k_{\ell} = a - b(\mu - 0,2)$ $a = 81 - 730\eta + 4261\eta^2 - 12304\eta^3 + 17919\eta^4 - 12796\eta^5 + 3574\eta^6$ <p> $b = 0$ para $0,1 \leq \mu \leq 0,2$ e $0,2 \leq \eta \leq 1,0$ $b = 0$ para $0,2 \leq \mu \leq 0,3$ e $0,6 \leq \eta \leq 1,0$ $b = 320 - 2788\eta + 13458\eta^2 - 27667\eta^3 + 19167\eta^4$ para $0,2 \leq \mu \leq 0,3$ e $0,2 \leq \eta \leq 0,6$ </p>
$\eta = b_f/b_w$ $\mu = D/b_w$	

Fonte: ABNT NBR 14762:2010 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio

3 DIMENSIONAMENTO NORMATIVO

A ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio apresenta em sua seção 9 as condições para o dimensionamento de barras prismáticas submetidas a ações estáticas, sendo completada pela ABNT NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios para casos não especificados. A Tabela 10 estabelece limites geométricos impostos pela norma quanto aos valores máximos da relação largura/espessura.

Tabela 10 – Valores máximos da relação largura/espessura

Caso a ser analisado	Valor máximo da relação largura/espessura
Elemento comprimido AA, tendo uma borda vinculada a alma ou mesa e a outra a enrijecedor de borda simples	$(b/t)_{\text{máx}} = 60^b$
Elemento comprimido AA, tendo uma borda vinculada a alma e a outra a mesa ou outro tipo de enrijecedor de borda com $I_s \geq I_a$	$(b/t)_{\text{máx}} = 90$
Alma de perfis U não enrijecidos sujeita à compressão uniforme	$(b/t)_{\text{máx}} = 90$
Elemento comprimido com ambas as bordas vinculadas a elementos AA	$(b/t)_{\text{máx}} = 500^c$
Elemento comprimido AL ou AA com enrijecedor de borda tendo $I_s < I_a$	$(b/t)_{\text{máx}} = 60^b$
Alma de vigas sem enrijecedores transversais	$(b/t)_{\text{máx}} = 200$
Alma de vigas com enrijecedores transversais apenas nos apoios	$(b/t)_{\text{máx}} = 260$
Alma de vigas com enrijecedores transversais nos apoios e intermediários	$(b/t)_{\text{máx}} = 300$
a - b é a largura do elemento; t é a espessura. b - Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se $(b/t)_{\text{máx}} = 30$. c - Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se $(b/t)_{\text{máx}} = 250$.	

Fonte: ABNT NBR 14762:2010 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio

Nos itens a seguir são apresentadas resumidamente algumas das verificações de norma que se fazem necessária para este trabalho.

3.1 BARRAS SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE TRAÇÃO

Em estruturas metálicas é comum ver barras submetidas a força de tração, empregue em elementos estruturais principais como treliças de cobertura ou em sistemas de contraventamento. O dimensionamento de um perfil de aço dobrado a frio tracionado considera uma distribuição de tensões uniforme quando esta força é centrada, sendo válida a expressão clássica de tensão relacionando força à área. Com o uso desta expressão e a adoção de uma resistência limitante para o aço, chega-se ao valor da força axial de tração

resistente de cálculo $N_{t,Rd}$, que pode ser limitada tanto pelo escoamento generalizado da seção bruta da barra como pela ruptura da seção líquida.

A Equação 3.1 apresenta o esforço resistente para escoamento da seção bruta, onde a barra apresenta grande deformação e não satisfaz mais exigências de segurança:

$$N_{t,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma} \quad (3.1)$$

onde:

f_y é a resistência ao escoamento do aço;

A é a área bruta da seção transversal do perfil;

γ é o coeficiente de ponderação da resistência equivalente à 1,10.

Para casos em quem as barras apresentem furos ou recortes que reduzem a área tracionada, se aceita que ocorra plastificação da seção para redistribuição das tensões, sendo a resistência final definida pela ruptura da seção líquida. Quando os furos não forem relacionados à ligação das barras, se faz válida a Equação 3.2 para ruptura da seção líquida:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_{n0}f_u}{\gamma} \quad (3.2)$$

onde:

f_u é a resistência à ruptura do aço na tração;

A_{n0} é a área líquida da seção transversal do perfil fora da região da ligação;

γ é o coeficiente de ponderação da resistência equivalente à 1,35.

Para as regiões de conexão das barras, seja por ligações parafusadas ou soldadas, além dos possíveis furos que levam ao uso da área efetiva, as tensões normais não são uniformes. Esse problema é simplificado pela inclusão de um novo coeficiente C_t , obtido em norma, que avalia a concentração de tensões, como mostrado na Equação 3.3:

$$N_{t,Rd} = \frac{C_t A_n f_u}{\gamma} \quad (3.3)$$

onde:

f_u é a resistência à ruptura do aço na tração;

A_n é a área líquida da seção transversal do perfil na região da ligação, a qual deve ter suas prováveis linhas de ruptura analisadas;

γ é o coeficiente de ponderação da resistência equivalente à 1,65;

C_t é o coeficiente de redução da área líquida.

Por norma, recomenda-se que as barras tracionadas respeitem um limite de esbeltez, correspondente a relação entre o maior comprimento destravado e o raio de giração, de 300. Caso a barra seja formado por uma composição de perfis, ambos devem ser verificados.

$$\lambda = \frac{L}{r} \quad (3.4)$$

onde:

L é a o comprimento da barra;

r é o raio de giração.

É importante notar que as ligações, assim como o peso próprio da barra, provocam o aparecimento de flexão, levando os elementos a serem tratados em flexão-composta. Na maioria dos casos de projeto, esses efeitos são mínimos e desprezados quando respeitado o limite de esbeltez para barras tracionadas.

3.2 BARRAS SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO

Barras comprimidas axialmente são elementos típicos de estruturas metálicas, sendo eles pilares, montantes ou componentes de treliças. No caso de perfis formados a frio, por apresentarem paredes finas, o dimensionamento deve atender condições que assegurem seu desempenho mediante ao escoamento e instabilidades como flambagem local, flambagem global (flexão, torção e flexo-torção), flambagem distorcional ou ainda uma interação desses modos de colapso. A força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser averiguada em dois modos e tomada como o menor valor entre: a força axial resistente de cálculo por flexão, por torção ou por flexo-torção, que é uma verificação que compreende a interação dos modos de flambagem local e global; e a força axial resistente de cálculo por flambagem distorcional. Para barras comprimidas o índice de esbeltez não deve exceder 200.

$$\lambda = \frac{KL}{r} \quad (3.5)$$

onde:

KL é o comprimento efetivo de flambagem da barra, valores de K são prescritos na ABNT NBR 8800:2008 Anexo E e representados na Tabela 11;

r é o raio de giração.

Tabela 11 – Coeficiente de flambagem global K por flexão de elementos isolados

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

Fonte: ABNT NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios

3.2.1 Método da Largura Efetiva e Método da Seção Efetiva

Para os cálculos apresentados a seguir é essencial a obtenção das propriedades geométricas da seção, seja por tabelas ou pelos métodos linear e simplificado apresentados anteriormente no Capítulo 2.

3.2.1.1 Flambagem global por flexão, por torção ou por flexo-torção

Para o cálculo da força axial resistente de projeto nessa etapa, são utilizados tanto um coeficiente relativo a redução da capacidade devido a flambagem global assim como a área efetiva, devido a flambagem local e a resistência pós-flambagem característica dos perfis formados a frio.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma} \quad (3.6)$$

onde:

f_y é a resistência ao escoamento do aço;

A_{ef} é a área efetiva da seção transversal do perfil, calculada com base no Método da Largura Efetiva (MLE) adotando $\sigma = \chi f_y$, ou no Método da Seção Efetiva (MLE);

χ é o fator de redução da força axial de compressão resistente associado a flambagem global, podendo ser obtido por tabela em norma ou conforme as equações apresentadas a seguir;

γ é o coeficiente de ponderação da resistência equivalente à 1,20.

Para a obtenção do coeficiente χ deve-se iniciar pelo cálculo do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global λ_0 , que posteriormente é utilizado no cálculo do coeficiente como mostrados nas Equações 3.7, 3.8 e 3.9:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Af_y}{N_e}} \quad (3.7)$$

$$\text{para } \lambda_0 \leq 1,5: \chi = 0,658\lambda_0^2 \quad (3.8)$$

$$\text{para } \lambda_0 > 1,5: \chi = 0,877/\lambda_0^2 \quad (3.9)$$

onde:

A é a área bruta da seção transversal do perfil;

N_e é a força axial de flambagem global elástica, a qual será discutida na sequência.

Dependendo das linhas de simetria do perfil, ele está mais propenso a determinados modos de flambagem e baseados nisso, a norma os separa em grupos de perfis de dupla simetria, perfis monossimétricos e perfis assimétricos. Para cada um deles, a força axial de flambagem global elástica é tomada como o menor valor das seguintes formas:

3.2.1.1.1 Perfis com dupla simetria ou simétricos em relação a um ponto

Esse grupo de perfis, representadas por seções tipo I, caixão e tubos por exemplo, têm o centro de cisalhamento coincidente com o centro de gravidade, estando mais propensos a flambagem elástica por flexão em torno do eixo de maior inércia, flexão em torno do eixo de menor inércia e flambagem elástica por torção, sendo as forças calculadas conforme as Equações 3.10, 3.11 e 3.12:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad (3.10)$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad (3.11)$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] \quad (3.12)$$

onde:

I_x e I_y são os momentos de inércia da seção em relação aos eixos principais x e y, respectivamente;

E é o módulo de elasticidade do aço;

C_w é a constante de empenamento da seção;

G é o módulo de elasticidade transversal;

J é a constante de torção da seção;

$K_x L_x$ e $K_y L_y$ são os comprimentos efetivos de flambagem global por flexão em relação aos eixos x e y , respectivamente, com K definido na Tabela 11;

$K_z L_z$ é o comprimento efetivo de flambagem global por torção;

r_0 é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção, dado por:

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2} \quad (3.13)$$

r_x e r_y são os raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia x e y , respectivamente;

x_0 e y_0 são as distâncias do centro de torção ao centróide, na direção dos eixos principais x e y , respectivamente.

3.2.1.1.2 Perfis monossimétricos

Para perfis monossimétricos, como perfis U, Ue e cantoneiro, onde x é o eixo de simetria e conseqüentemente x_0 é nulo, as forças críticas causam flambagem elástica por flexão em relação ao eixo y e flambagem elástica por flexo-torção, apresentadas nas Equações 3.14 e 3.15.

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad (3.14)$$

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0/r_0)^2]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0/r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] \quad (3.15)$$

onde:

N_{ex} e N_{ez} são as forças axiais de flambagem elástica conforme as Equações 3.10 e 3.12, respectivamente;

demais parâmetros previamente definidos.

3.2.1.1.3 Perfis assimétricos

Para perfis assimétricos, a flambagem característica é flexo-torcional, sendo definida a força axial de flambagem elástica N_e como o menor valor da equação cúbica a seguir:

$$r_0^2(N_e - N_{ex})(N_e - N_{ey})(N_e - N_{ez}) - N_e^2(N_e - N_{ey})x_0^2 - N_e^2(N_e - N_{ex})y_0^2 = 0 \quad (3.16)$$

3.2.1.2 Flambagem distorcional

Como já mencionado, dependendo das dimensões dos elementos que compõem a seção, o modo de flambagem distorcional pode ser o modo crítico. Para perfis U simples sujeitos a compressão centrada essa verificação é dispensável, assim como para perfis U enrijecidos com proporções dimensionais de mesa e enrijecedor iguais ou superiores ao indicado na Tabela 12. Para os casos onde a verificação se faz necessária, se deve proceder conforme as equações que serão apresentadas.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi_{dist} A f_y}{\gamma} \quad (3.17)$$

onde:

f_y é a resistência ao escoamento do aço;

A é a área bruta da seção transversal do perfil;

χ_{dist} é o fator de redução da força axial de compressão resistente associado a flambagem distorcional, obtido conforme as equações apresentadas a seguir;

γ é o coeficiente de ponderação da resistência equivalente à 1,20.

Assim como feito anteriormente para flambagem global, para a obtenção do coeficiente χ_{dist} deve-se iniciar pelo cálculo do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional λ_{dist} , que posteriormente é utilizado no cálculo do coeficiente como mostrados nas Equações 3.18, 3.19 e 3.20:

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{dist}}} \quad (3.18)$$

$$\text{para } \lambda_{dist} \leq 0,561: \quad \chi_{dist} = 1 \quad (3.19)$$

$$\text{para } \lambda_{dist} > 0,561: \quad \chi_{dist} = (1 - 0,25/\lambda_{dist}^{1,2})/\lambda_{dist}^{1,2} \quad (3.20)$$

onde:

N_{dist} é a força axial de flambagem distorcional elástica, a qual deve ser calculada com base na análise de estabilidade elástica;

demais parâmetros previamente definidos.

Tabela 12 – Valores mínimos da relação D/b_w de barras com seção U enrijecido submetidas à compressão centrada para dispensar a verificação da flambagem distorcional

b_f/b_w	b_w/t				
	250	200	125	100	50
0,4	0,02	0,03	0,04	0,04	0,08
0,6	0,03	0,04	0,06	0,06	0,15
0,8	0,05	0,06	0,08	0,10	0,22
1,0	0,06	0,07	0,10	0,12	0,27
1,2	0,06	0,07	0,12	0,15	0,27
1,4	0,06	0,08	0,12	0,15	0,27
1,6	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27
1,8	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27
2,0	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27

NOTA 1 - b_f , b_w e D são dimensões nominais dos elementos, conforme indicado na Tabela 8.
NOTA 2- Para valores intermediários, interpolar linearmente.

Fonte: ABNT NBR 14762:2010 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio

3.3 BARRAS SUBMETIDAS À FLEXÃO

O uso de barras como suporte para áreas que necessitam de fechamento, como terças para o telhado, são membros submetidos a ações transversais e comumente encontrados na construção civil. O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} requer um considerável esforço de cálculo e é tomado como o menor valor de acordo com as possibilidades de escoamento da seção efetiva, flambagem lateral com torção e flambagem distorcional.

3.3.1 Método da Largura Efetiva e Método da Seção Efetiva

Para os cálculos apresentados a seguir é essencial a obtenção das propriedades geométricas da seção, seja por tabelas ou pelos métodos linear e simplificado apresentados anteriormente no Capítulo 2. Enquanto que para o Método da Seção Efetiva o módulo de resistência elástico da seção efetiva W_{ef} é de simples obtenção, se limitando aos padrões apresentados, para o Método da Largura Efetiva este é um procedimento de maior dificuldade, devido ao fato do perfil efetivo não ser simétrico e da necessidade do cálculo de inércia atualizado, tornando o processo iterativo.

3.3.1.1 Escoamento da seção efetiva

O momento fletor que causa escoamento na fibra mais solicitada da seção efetiva, seja tração ou compressão, é dado pela equação a seguir:

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} \quad (3.21)$$

onde:

f_y é a resistência ao escoamento do aço;

W_{ef} é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra que atinge o escoamento, calculado conforme MLE ou MSE;

γ é o coeficiente de ponderação da resistência equivalente à 1,10.

3.3.1.2 Flambagem lateral com torção

Quando o elemento em questão não se encontra contido lateralmente, ou se essas contenções não cumprem uma distância necessária para se assegurar a estabilidade, associado à flambagem, pode ocorrer uma rotação em torno do seu eixo longitudinal, caracterizando a flambagem lateral com torção. Para esse caso, deve-se proceder com os cálculos apresentados a seguir:

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma} \quad (3.22)$$

onde:

f_y é a resistência ao escoamento do aço;

χ_{FLT} é o fator de redução do momento fletor resistente associado a flambagem lateral com torção;

γ é o coeficiente de ponderação da resistência equivalente à 1,10;

$W_{c,ef}$ é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida, calculado conforme MLE (subseção 2.2.4.3), adotando $\sigma = \chi_{FLT} f_y$, ou MSE (subseção 2.2.4.6), adotando:

$$W_{c,ef} = W_c \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \frac{1}{\lambda_p} \leq W_c \quad (3.23)$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\chi_{FLT} W_c f_y}{M_\ell}} \quad (3.24)$$

M_ℓ é o momento fletor de flambagem local elástica, calculada por meio de análise de estabilidade elástica, ou, de forma direta segundo a Equação 2.10.

Para o cálculo de χ_{FLT} , segue-se com o cálculo do índice de esbeltez, no seguinte procedimento:

$$\text{para } \lambda_0 \leq 0,6: \quad \chi_{FLT} = 1 \quad (3.25)$$

$$\text{para } 0,6 < \lambda_0 < 1,336: \quad \chi_{FLT} = 1,11(1 - 0,278\lambda_0^2) \quad (3.26)$$

$$\text{para } \lambda_0 \geq 1,336: \quad \chi_{FLT} = 1/\lambda_0^2 \quad (3.27)$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{W_c f_y}{M_e}} \quad (3.28)$$

onde:

M_e é o momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástica, e para perfis duplamente simétricos ou monossimétricos com flexão em torno do eixo de simetria (eixo x) se dá por:

$$M_e = C_b r_0 \sqrt{N_{ey} N_{ez}} \quad (3.29)$$

$$C_b = \frac{12,5M_{max}}{2,5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (3.30)$$

M_{max} é o máximo valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no trecho analisado;

M_A é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no 1º quarto do trecho analisado;

M_B é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no centro do trecho analisado;

M_C é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no 3º quarto do trecho analisado.

Para perfis monossimétricos submetidos a flexão em torno do eixo perpendicular ao eixo de simetria, como perfis U, Eu e cartola, se segue o Anexo E da ABNT NBR 14762:2010

– Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, onde M_e segue as seguintes expressões:

$$M_e = \frac{C_s N_{ex}}{C_m} \left[j + C_s \sqrt{j^2 + r_0^2 \left(\frac{N_{ez}}{N_{ex}} \right)} \right] \quad (3.31)$$

onde:

$C_s = +1$ se o momento fletor causar compressão na parte da seção com coordenada x negativa, ou seja, do mesmo lado que o centro de torção;

$C_s = -1$ se o momento fletor causar tração na parte da seção com coordenada x negativa, ou seja, do mesmo lado que o centro de torção;

$C_m = 0,6 - 0,4(M_1/M_2)$, sendo M_1 o menor e M_2 o maior dos dois momentos fletores solicitantes de cálculo nas extremidades do trecho sem travamento lateral. A relação é negativa quando esses momentos provocarem curvatura simples e positiva quando provocarem curvatura reversa. Caso o momento fletor em uma seção intermediária for superior a M_2 , C_m deve ser adotado igual a 1,0;

j é um parâmetro da seção transversal, calculado para seções U e Ue nas seguintes formas:

$$j = \frac{1}{2I_y} (\beta_w + \beta_f + \beta_l) + x_0 \quad (3.32)$$

$$\beta_w = - \left(\frac{tx_m a_m^3}{12} + tx_m^3 a_m \right) \quad (3.33)$$

$$\beta_f = \frac{t}{2} [(b_m - x_m)^4 - x_m^4] + \frac{ta_m^2}{4} [(b_m - x_m)^2 - x_m^2] \quad (3.34)$$

Para seção U simples:

$$\beta_l = 0 \quad (3.35)$$

$$x_m = \frac{b_m^2}{a_m + 2b_m} \quad (3.36)$$

$$x_0 = b_m \left(\frac{3a_m^2 b_m}{a_m^3 + 6a_m^2 b_m} \right) + x_m \quad (3.37)$$

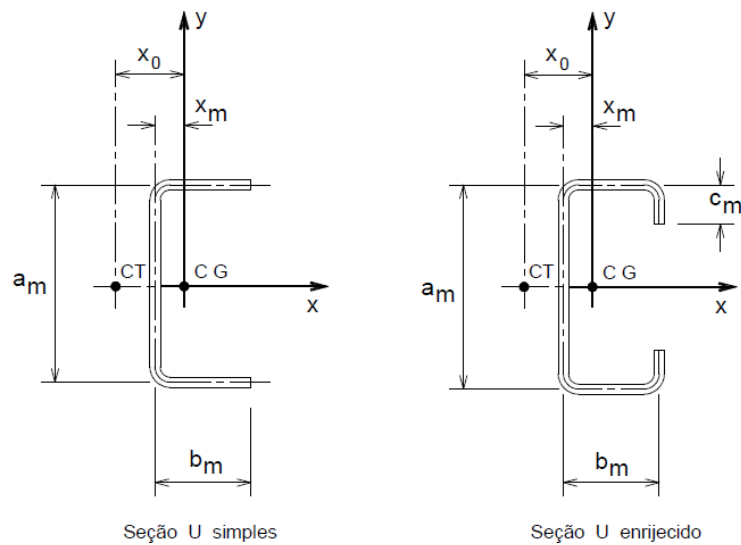
Para seção U enrijecido:

$$\beta_l = 2c_m t (b_m - x_m)^3 + \frac{2}{3} t (b_m - x_m) \left[\left(\frac{a_m}{2} \right)^3 - \left(\frac{a_m}{2} - c_m \right)^3 \right] \quad (3.38)$$

$$x_m = \frac{b_m (b_m + 2c_m)}{a_m + 2b_m + 2c_m} \quad (3.39)$$

$$x_0 = b_m \left[\frac{3a_m^2 b_m + c_m (6a_m^2 - 8c_m^2)}{a_m^3 + 6a_m^2 b_m + c_m (8c_m^2 - 12a_m c_m + 6a_m^2)} \right] + x_m \quad (3.40)$$

Figura 18 – Indicação das dimensões, distâncias e eixos da seção



Fonte: ABNT NBR 14762:2010 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio

3.3.1.3 Flambagem distorcional

Para perfis sujeitos a flambagem distorcional, o momento fletor resistente de cálculo é expresso de acordo com a Equação 3.41.

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{dist} W f_y}{\gamma} \quad (3.41)$$

onde:

f_y é a resistência ao escoamento do aço;

W é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra que atinge o escoamento;

χ_{dist} é o fator de redução do momento fletor resistente, associado a flambagem distorcional, obtido conforme as equações apresentadas a seguir;

γ é o coeficiente de ponderação da resistência equivalente à 1,10.

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{W f_y}{M_{dist}}} \quad (3.42)$$

para $\lambda_{dist} \leq 0,673$: $\chi_{dist} = 1$ (3.43)

para $\lambda_{dist} > 0,673$: $\chi_{dist} = (1 - 0,22/\lambda_{dist})/\lambda_{dist}$ (3.44)

onde:

M_{dist} é o momento fletor de flambagem distorcional elástica, a qual deve ser calculada com base na análise de estabilidade elástica.

Assim como para a verificação da flambagem distorcional para elemento comprimidos, para perfis como U simples e U enrijecido dentro dos valores da Tabela 13, pode se dispensar a verificação.

Tabela 13 – Valores mínimos da relação D/b_w de barras com seção U enrijecido sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia para dispensar a verificação da flambagem distorcional

b_f/b_w	b_w/t				
	250	200	125	100	50
0,4	0,05	0,06	0,10	0,12	0,25
0,6	0,05	0,06	0,10	0,12	0,25
0,8	0,05	0,06	0,09	0,12	0,22
1,0	0,05	0,06	0,09	0,11	0,22
1,2	0,05	0,06	0,09	0,11	0,20
1,4	0,05	0,06	0,09	0,10	0,20
1,6	0,05	0,06	0,09	0,10	0,20
1,8	0,05	0,06	0,09	0,10	0,19
2,0	0,05	0,06	0,09	0,10	0,19

Fonte: ABNT NBR 14762:2010 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio

3.3.1.4 Força cortante

A verificação para força cortante se faz de acordo com as seguintes expressões:

para $h/t \leq 1,08\sqrt{Ek_v/f_y}$: $V_{Rd} = 0,6f_y h t / \gamma$ (3.45)

para $1,08\sqrt{Ek_v/f_y} < h/t \leq 1,4\sqrt{Ek_v/f_y}$: $V_{Rd} = 0,65t^2 \sqrt{k_v f_y E} / \gamma$ (3.46)

para $h/t > 1,4\sqrt{Ek_v/f_y}$: $V_{Rd} = (0,905Ek_v t^3 / h) / \gamma$ (3.47)

onde:

t é a espessura da alma;

h é a largura da alma (parte plana);

γ é o coeficiente de ponderação da resistência equivalente à 1,10;

k_v é o coeficiente de flambagem local por cisalhamento, igual a 5 para alma sem enrijecedores ou para $a/h > 3$; igual a $5+5/(a/h)^2$ para almas com enrijecedores transversais;

a é a distância entre enrijecedores transversais de alma.

4 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

Na engenharia estrutural existe uma constante busca por técnicas que propiciem vantagens econômicas mas que sejam confiáveis o suficiente para não oferecerem riscos à segurança de seus usuários. Dessa forma, a otimização estrutural se faz uma opção interessante para o planejamento das mais diversas estruturas, buscando uma criação e desenvolvimento coerente do melhor projeto possível, considerando avaliações que julguem a competência e limitações das diversas opções possíveis (SILVA, 2015).

4.1 ELEMENTOS DA OTIMIZAÇÃO

Em geral, em um problema de otimização é necessário formular uma função a ser analisada, identificando as variáveis envolvidas assim como seus limites de variação, para equacioná-las e procurar uma solução dentro das restrições que estabilizam o projeto (CASTILHO, 2003). A seguir serão definidos os principais elementos da otimização:

- Função objetivo: equação matemática que relaciona os parâmetros do sistema e avaliar o desempenho do conjunto através de um valor.

Para ser utilizado na área de engenharia de estruturas, a função objetivo é utilizada para alcançar um valor específico, ou mais comumente, maximizar ou minimizar um objetivo por meio de mudanças das variáveis e julgamento do desempenho da configuração (GENNERT; YUILLE, 1988). Podem ser objetivos de uma função por exemplo maximizar um investimento, minimizar massa da estrutura, tempo de construção, custo final da obra, aumentando a eficiência de algum parâmetro. Adeli e Sarma (2009) afirmam que apesar de ser prática comum na engenharia associar diretamente o custo da obra à massa da estrutura, esse método não se mostra sempre verdadeiro, dado que apesar do custo da estrutura representar boa parte das despesas, fatores como mão de obra, disponibilidade dos elementos e demais atividades podem afetar o preço final consideravelmente.

- Variáveis de projeto: elementos que podem ter seus valores alterados dentro de um espaço de busca.

As variáveis são fundamentalmente o que geram o problema da otimização, já que é através das suas possíveis alterações que são elaboradas diferentes propostas, procurando-se saber qual se destaca. Em geral existem dois tipos de variáveis: discretas e contínuas. As discretas são valores fixos que podem ser escolhidos dentro de um conjunto informado, tendo como exemplo seções transversais dentro de uma lista de perfis metálicos, enquanto as contínuas podem variar continuamente por todo o domínio, como posicionamento de nós ou dimensões dos elementos constituintes de um perfil. Por se procurar estruturas que sejam

capazes de serem executadas, projetos de engenharia tendem a utilizar variáveis discretas, utilizando perfis metálicos disponíveis no mercado e restringindo o posicionamento de nós, transformando variáveis contínuas em discretas como visto em Rajeev e Krishnamoorthy (1992), Wu e Chow (1995), Dominguez, Stiharu e Sedaghati (2006), Flôr (2015) e Roman (2016). As variáveis devem ser o mais independente quanto possível umas das outras - caso haja alguma dependência entre elas, esta relação deve ser declarada nas restrições - e devem ser designadas o maior número possível para cercar o problema, sendo que após algumas análises podem ser feitas mudanças de variáveis para valores fixos (ARORA, 2012).

- Restrições: funções de igualdade ou desigualdade que caracterizam condições não desejáveis do projeto.

Segundo Arora (2012), restrições são definidas e impostas para, além dos casos de dependência de variáveis como citado, garantir que o sistema seja projetado dentro dos parâmetros de desempenho exigidos. São frequentemente utilizados como restrições para projetos de engenharia padrões mecânicos, econômicos, espaciais e normativos, com intenção de moldar o projeto de acordo com as adversidades presentes.

4.2 TIPOS DE OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

A estrutura de cobertura de um edifício industrial pode ser composta por treliças bidimensionais e demais elementos para suporte e fechamento, sendo assim necessário conhecer como a otimização pode ser trabalhada nessa condição. As treliças são estruturas reticuladas formadas por barras com extremidades articuladas e elementos submetidos exclusivamente a forças axiais de tração e compressão (os momentos presentes são pequenos e desprezados no dimensionamento). De acordo com Rajan (1995), essas estruturas podem ser otimizadas nas etapas dimensional, geométrica e topológica com objetivo de redução de massa ou minimizar os custos.

Na otimização dimensional, a geometria da estrutura é fixa, ou seja, as barras tem sua disposição já estabelecidas de antemão, enquanto que as seções transversais dos elementos que compõem a estrutura são as variáveis de projeto (STOLPE, 2003). Usualmente são utilizadas variáveis discretas como as opções de perfis industriais tabelados e disponíveis em mercado, sendo possível variar entre diferentes tipos de geometria de perfil e dimensões dos elementos constituintes, alterando assim a área da seção transversais e conseqüentemente os esforços resistentes.

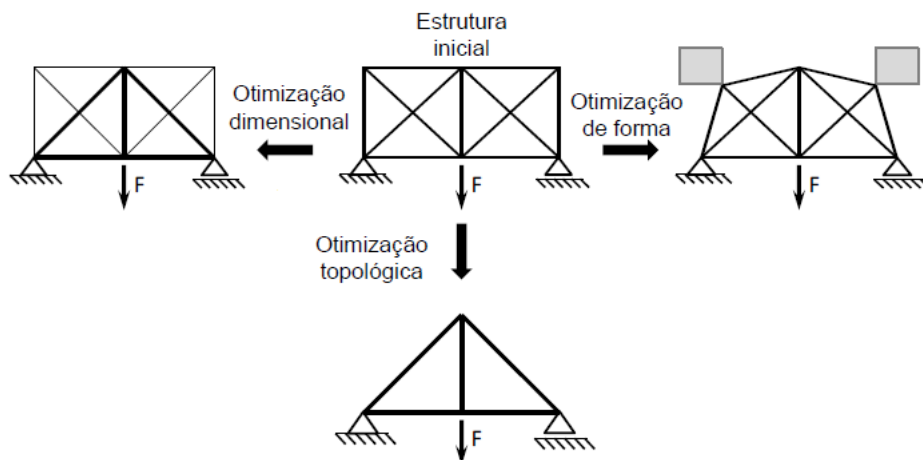
A otimização geométrica, também conhecida como otimização de forma, é feita com o intuito de determinar a forma ideal do contorno da estrutura (PEDERSEN, 2003). Essa alteração é feita apenas através do reposicionamento dos nós que delimitam os elementos da

estrutura, sendo proibido o acréscimo ou exclusão de elementos ou nós. Como forma de limitar o reposicionamento para evitar sobreposição de nós, que geraria elementos de comprimento nulo e uma estrutura mal condicionada, essa otimização pode ser feita de tal forma que os nós podem se deslocar localmente, geralmente por um conjunto determinado de pontos especificados.

Já na otimização topológica as variáveis são os elementos que compõem a estrutura, onde pode haver adição e remoção de componentes, redesenhando as conectividades da estrutura para as condições fornecidas como apoios, carregamentos e restrições. É um processo de difícil implementação quando livre e métodos como uso de diferentes alternativas preestabelecidas ou remoção de elementos e nós são utilizados para simplificar.

A Figura 19 apresenta um exemplo das diferentes otimizações aplicadas a uma estrutura treliçada inicial e os diferentes resultados que são obtidos em cada um deles. Como o objetivo da otimização estrutural é obter a melhor configuração geral de uma determinada estrutura, o processo mais eficiente seria considerar todos os métodos de otimização concomitantemente (DEB; GULATI, 2001).

Figura 19 – Exemplo de estrutura na qual ocorreu os três tipos básicos de otimização



Fonte: SILVA, 2015

Apesar desses modelos serem os mais trabalhados na otimização estrutural e aplicados em praticamente todos os casos, dependendo das características da estrutura em estudo outras variáveis são de extrema relevância. Kumar (2013), Flôr (2015) e Roman (2016) afirmam que no caso de coberturas de galpões industriais, uma variável de grande influência é a distância entre os pórticos sequenciais que compõem a estrutura. Isso se dá pois nessas estruturas o carregamento de vento é significativo se comparado com o peso próprio e a distância entre pórticos define a área de atuação do vento no pórticos, que posteriormente

tem seu efeito disseminado por todos os elementos da estrutura, afetando praticamente todas as verificações de norma que devem ser feitas em relação ao carregamento.

Quanto maior o distanciamento entre pórticos, maior é a área de influência do carregamento de vento no elemento, levando a carregamentos maiores e conseqüentemente necessidade destes serem mais robustos, além dos próprios elementos que ficam mais compridos e suscetíveis a instabilidades. No entanto, esse maior afastamento entre pórticos diminui a quantidade de treliças, possivelmente reduzindo custos associados a esses elementos, sendo assim necessário a avaliação do espaçamento ótimo.

Esta mesma vinculo da área de influência do vento junto da relação inversamente proporcional entre número de elementos e espaçamento pode ser observada nas terças e telhas. Um maior espaçamento de terças resultará em uma quantidade menor de peças, no entanto estes perfis terão uma área transversal maior para resistirem aos esforços, além da influência direta nas telhas, já que terão seus apoios mais afastando e necessitarão ser mais espessas.

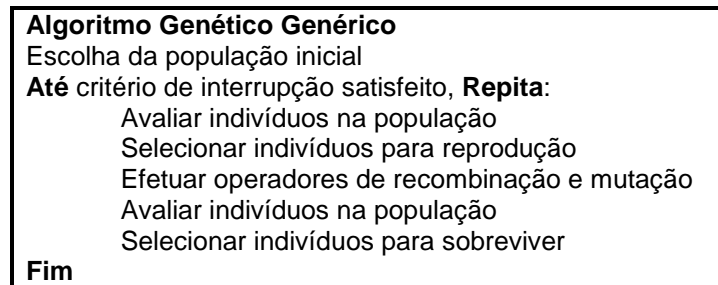
4.3 ALGORITMOS EVOLUTIVOS DE OTIMIZAÇÃO

A otimização estrutural é um assunto amplamente estudado por diversos pesquisadores em instituições de ensino e profissionais em seus determinados ramos. Segundo Castilho (2013), há uma grande mobilização pelo desenvolvimento de novos métodos de avaliação e programações que superem os métodos convencionais e conduzam a resultados ótimos, requerendo menor capacidade computacional e tempo. São exemplos de algoritmos otimizadores: *Particle Swarm Optimization (PSO)*, *Search Group Algorithm (SGA)*, *Backtracking Search Algorithm (BSA)*, *Differential Search Algorithm (DAS)* e *Artificial Cooperative Search (ACS)* (ALVES, 2018).

Os algoritmos evolutivos são algoritmos estocásticos proposto inicialmente por John Holland, em 1975, através do algoritmo genético (GA) inspirado na seleção natural das espécies e sobrevivência dos mais aptos conforme a teoria de Charles Darwin, onde através de mutações, quanto melhor um elemento se adaptar as condições do ambiente, maior é a chance de sobreviver e gerar descendentes (BASTOS, 2004). Este método foi popularizado por Goldberg (1989) e, segundo o autor, seu melhor desempenho se dá pelas vantagens em otimizar um grande número de variáveis mesmo em funções objetivo conflitantes; avaliar a função objetivo sem a necessidade do gradiente, não necessitando que ela seja continua e diferenciável; desempenhar buscas concomitantemente em áreas de possíveis soluções, avaliando um grupo de candidatos em lugar de apenas uma solução; e usar fatores estocásticos capazes de gerar melhoria na aleatoriedade, saindo de mínimos locais. Já as

desvantagens ficam por conta de possíveis problemas de convergência nos processos de avaliação e do alto custo computacional e tempo de processamento para programações com muitas variáveis, problemas esses que se tenta contornar com o uso de algoritmos genéticos modificados, com alterações de mutações e operadores para diminuir o tempo computacional e chegar em soluções melhores, como, por exemplo, o *Search Group Algorithm (SGA)*, desenvolvido por Gonçalves, Lopez e Miguel (2015).

Figura 20 – Pseudocódigo de um algoritmo genético genérico



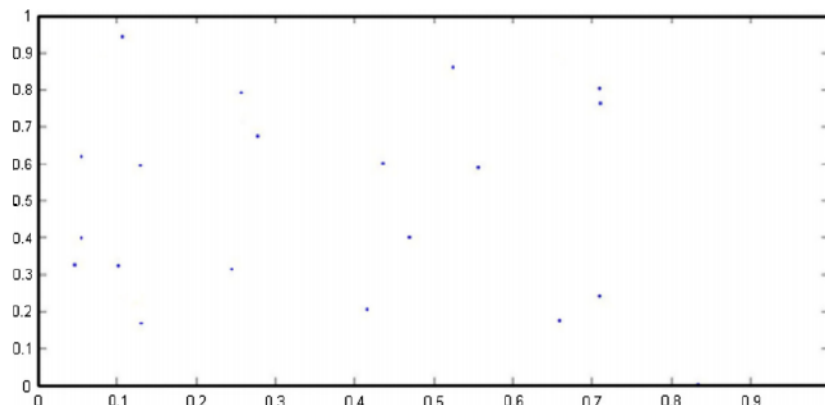
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

4.4 SEARCH GROUP ALGORITHM

O *Search Group Algorithm (SGA)*, ou Algoritmo do Grupo de Busca, é um algoritmo metaheurístico concebido para otimização baseado em fase global e fase local, buscando um equilíbrio entre a investigação do domínio (tempo de processamento) e a qualidade dos resultados. A Figura 21 faz referência a escolha da população inicial gerada aleatoriamente, enquanto que a Figura 22 faz alusão à suas avaliações quando aplicadas na função objetivo, sendo quanto melhor o desempenho, maior o círculo da representação.

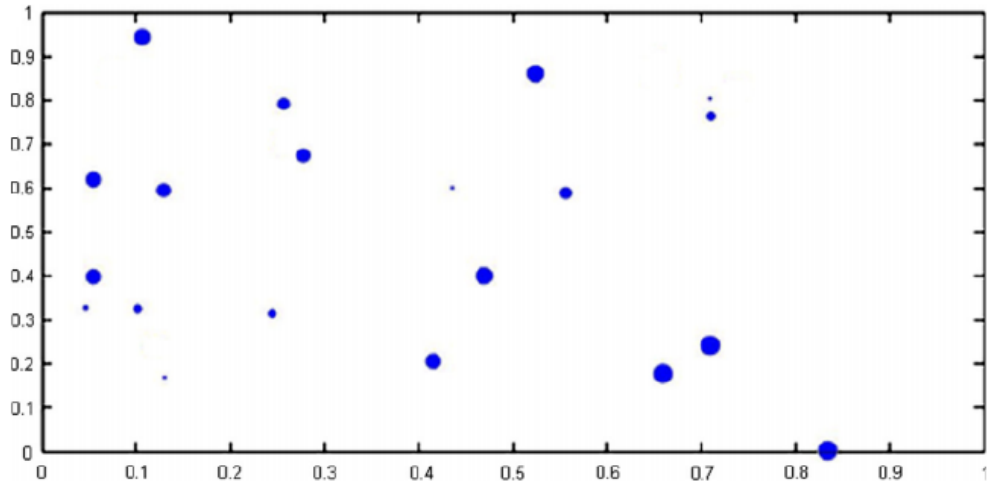
As Figuras 23 e 24 fazem referência a escolha de um grupo de busca inicial, dentro da população inicial que atendeu aos requisitos impostos, seguido de uma mutação possibilitando descobrir outra solução promissora.

Figura 21 – População inicial gerada aleatoriamente em um domínio bidimensional



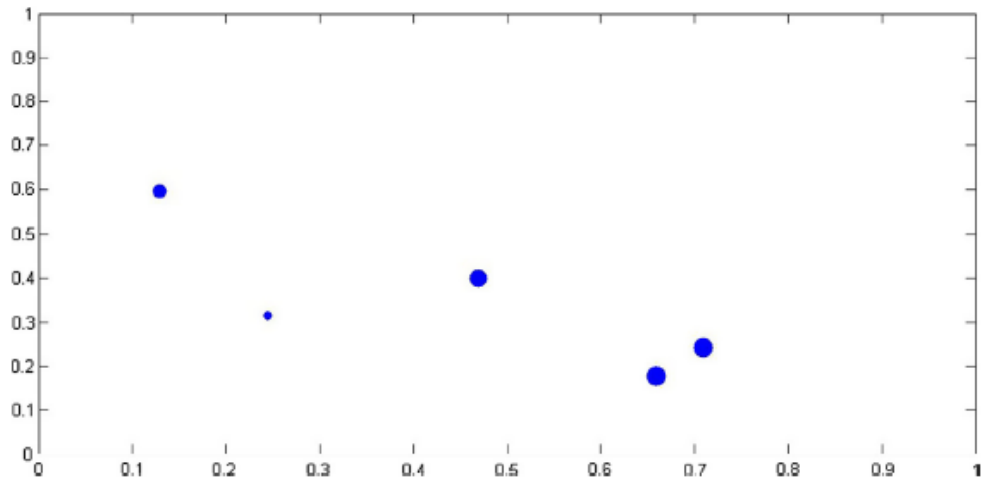
Fonte: GONÇALVEZ; LOPES; MIGUEL, 2015

Figura 22 – População inicial aplicada na função objetivo



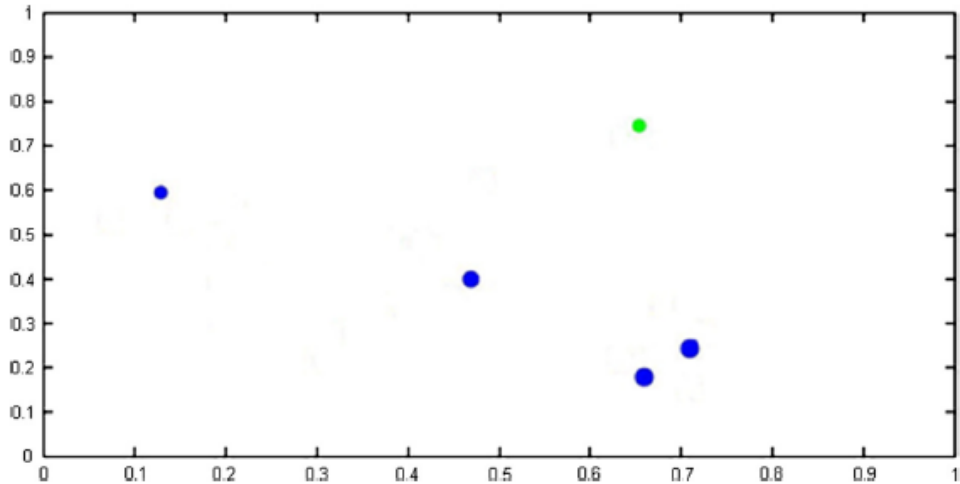
Fonte: GONÇALVEZ; LOPES; MIGUEL, 2015

Figura 23 – Grupo de Busca inicial composto por cinco membros da população



Fonte: GONÇALVEZ; LOPES; MIGUEL, 2015

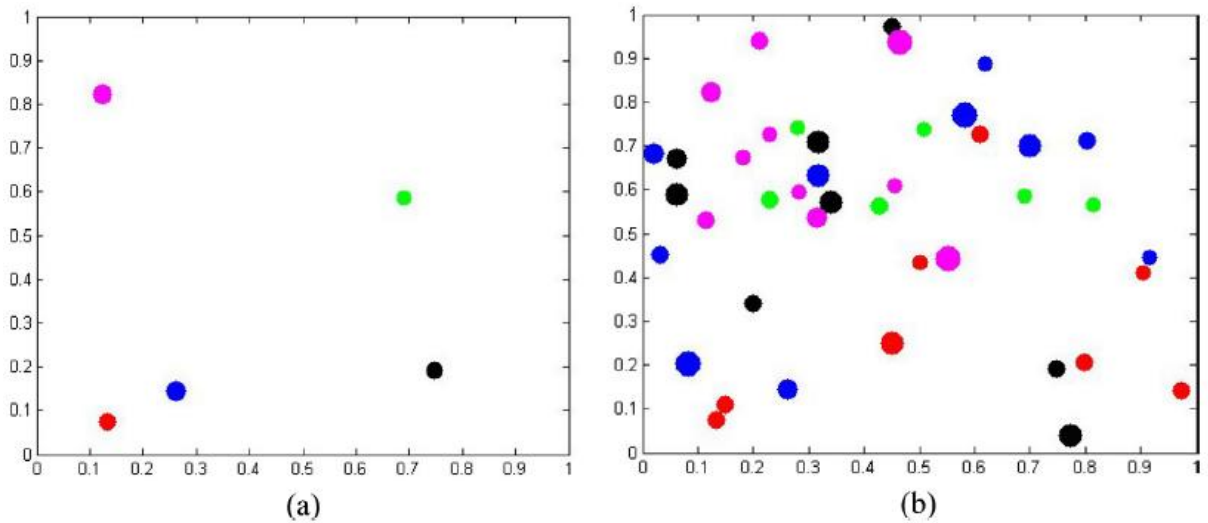
Figura 24 – Mutação do Grupo de Busca



Fonte: GONÇALVEZ; LOPES; MIGUEL, 2015

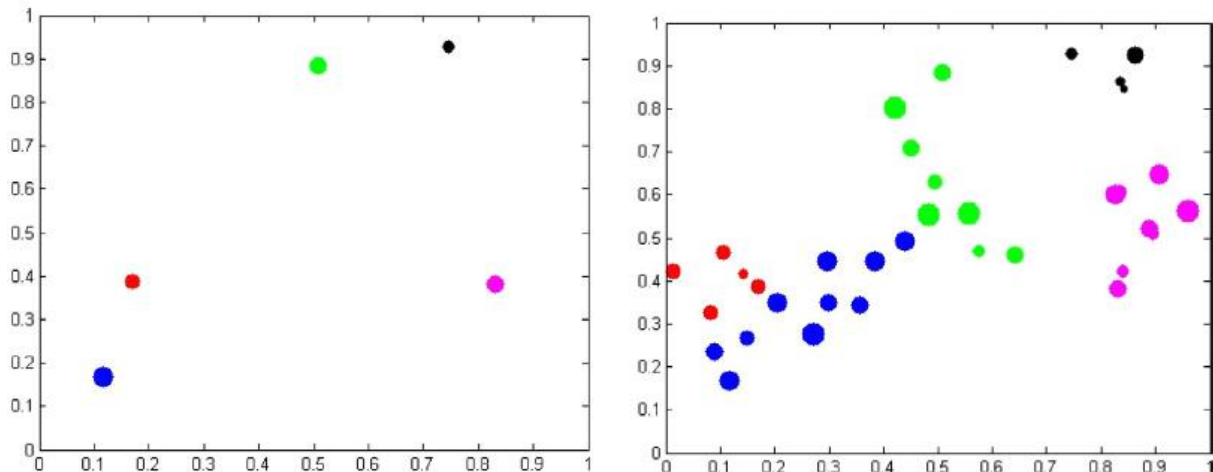
Em fase global o algoritmo funciona de forma a achar regiões promissoras do domínio, ou seja, grupos de variáveis que atendam às restrições e resultam em um bom valor quando aplicados na função objetivo. Já na fase local o algoritmo aperfeiçoa essas soluções, criando famílias com características semelhantes ao indivíduo inicial, com o intuito de chegar ao conjunto ideal com melhor resultado. As Figuras 25 e 26 representam a criação de famílias no começo e no final do processo, respectivamente, com a diminuição da aleatoriedade dos descendentes.

Figura 25 – Grupo de Busca e Famílias para as primeiras iterações do SGA



Fonte: GONÇALVEZ; LOPES; MIGUEL, 2015

Figura 26 – Grupo de Busca e Famílias para as últimas iterações do SGA



Fonte: GONÇALVEZ; LOPES; MIGUEL, 2015

4.4.1 Parâmetros de Entrada e Função Objetivo

A seguir se encontra a lista dos parâmetros de entrada necessários para o funcionamento do algoritmo otimizador, junto com seu propósito e valores adotados:

- a. n_{pop} : Número de indivíduos na população. Este valor é mantido constante durante todo o processo de otimização. Utilizou-se o valor 100 para todas as configurações;
- b. it^{max} : Número máximo de iterações. É empregado como critério de parada no processo de otimização e, juntamente com n_{pop} , define o tempo computacional. Utilizaram-se com os valores de 3.000, 10.000, 30.000 e 100.000, conforme o modelo analisado;
- c. it_{global}^{max} : Número máximo de iterações da fase global. Quanto mais próximo de 1 for o valor deste parâmetro, mais avaliações da função objetivo (custo global da estrutura) são realizadas para encontrar regiões promissoras. Manteve-se o valor constante em 0,3 (30% do it_{max});
- d. α^k : Controla a distância que um novo indivíduo é gerado a partir do seu membro do grupo de busca. Este parâmetro é responsável pela capacidade de exploração e aproveitamento do SGA. Seu valor diminui ao longo das iterações, refinando as soluções encontradas nas regiões promissoras. Utilizou-se o valor 2 para α^0 (valor inicial de α^k);
- e. α_{min} : Estabelece um valor mínimo para α^k . Assegura uma mobilidade mínima para os novos indivíduos gerados mesmo nas últimas iterações do SGA. Utilizou-se o valor de 0,1;
- f. n_{mut} : Número de mutações em cada iteração. É responsável pela capacidade do algoritmo de explorar o domínio da função objetivo, evitando que o mesmo fique preso em mínimos locais. Manteve-se o valor constante de 3% da população;
- g. n_g : Número de membros do grupo de busca. Manteve-se o valor constante de 20% da população.

A função objetivo, a qual deve ser minimizada, é a peso total da cobertura, descrita na Equação 4.1:

$$w = \gamma \left(\sum_{i=1}^{n_t} a_i l_i \right) + P \quad (4.1)$$

onde:

γ é o peso específico do aço;

a_i é a área da seção transversal do perfil adotado do elemento i ;

l_i é o comprimento do elemento i ;

n_t é o número total de elementos;

P é a penalidade caso as restrições do problema não sejam atendidas pela escolha dos perfis, na ordem de 10^{10} , invalidando a alternativa.

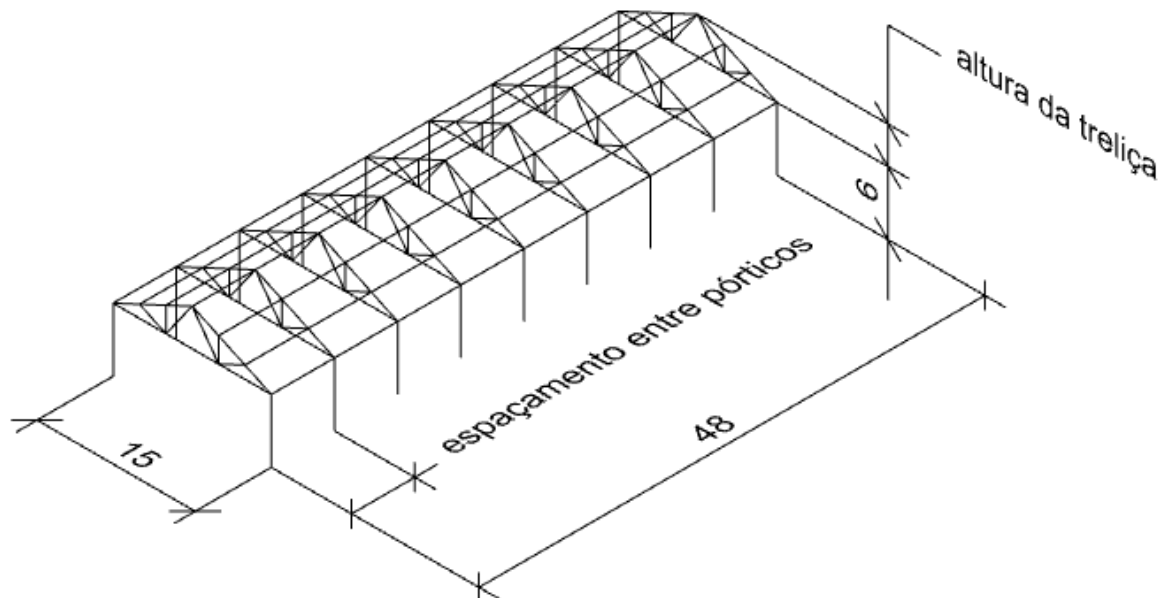
5 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

A otimização proposta se dá para uma estrutura de cobertura de edifício industrial em duas águas, composta por treliças planas em perfis U de aço formados a frio como elementos portantes principais e de telhas, terças, tirantes e contraventamentos como elementos secundários, sendo estes essenciais para a vedação superior da edificação e desempenho da sua funcionalidade básica. Assim como a otimização utilizando o algoritmo genético *Search Group Algorithm (SGA)*, todo o procedimento de cálculo e verificação dos elementos foram implementadas em um código utilizando o programa MATLAB®.

5.1 COMPONENTES

As informações necessárias para o procedimento são as dimensões do galpão, assim como a localidade, que caracterizam os dados de entrada do problema. A edificação foi definida como localizada em Florianópolis – Santa Catarina e possui um vão livre de 15 metros, que representa a largura, 48 metros de comprimento e 6 metros de altura nos pilares. A resistência ao escoamento e à ruptura do aço formado a frio foram adotadas em 250 MPa e 360 MPa, enquanto que para o aço laminado os valores são de 250 MPa e 400 MPa.

Figura 27 – Vista em perspectiva do projeto



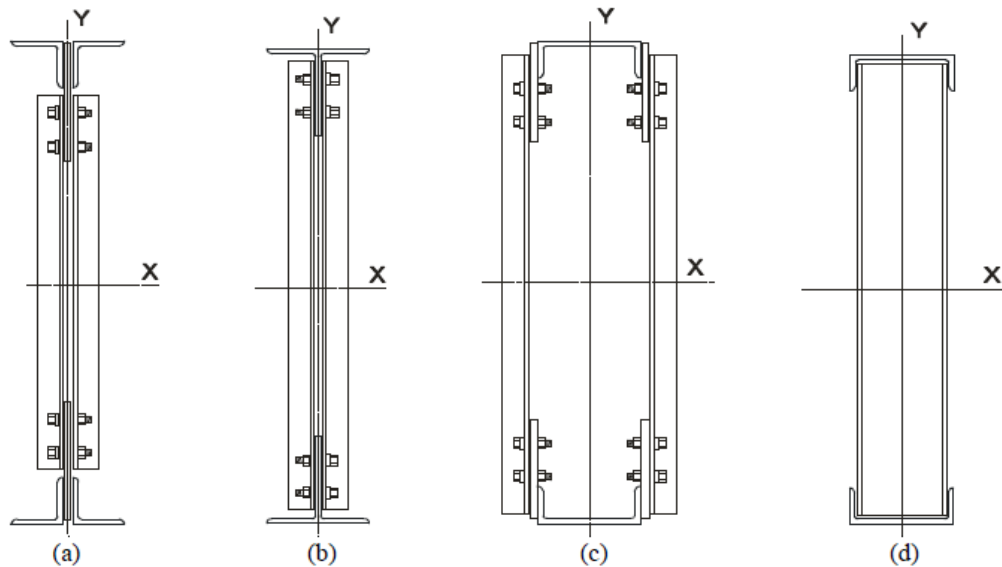
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

5.1.1 Treliças

Como destacado por Nogueira (2009), os diferentes elementos de uma treliça estão sujeitos a diferentes módulos de esforço e seria natural usar diferentes tipos de perfis para

uma economia de peso, no entanto, essa variedade pode aumentar o custo de fabricação das barras e superar a suposta economia. Dentre as possíveis alternativas, como exemplificadas na Figura 28, foi escolhido o uso de perfis formados a frio do tipo U para os banzos, diagonais e montantes com ligações soldadas. Apesar de usualmente se trabalhar com conexões parafusadas para esse tipo de estrutura, essa simplificação foi adotada pela complexidade que a modelagem dos parafusos junto ao sistema de otimização originaria.

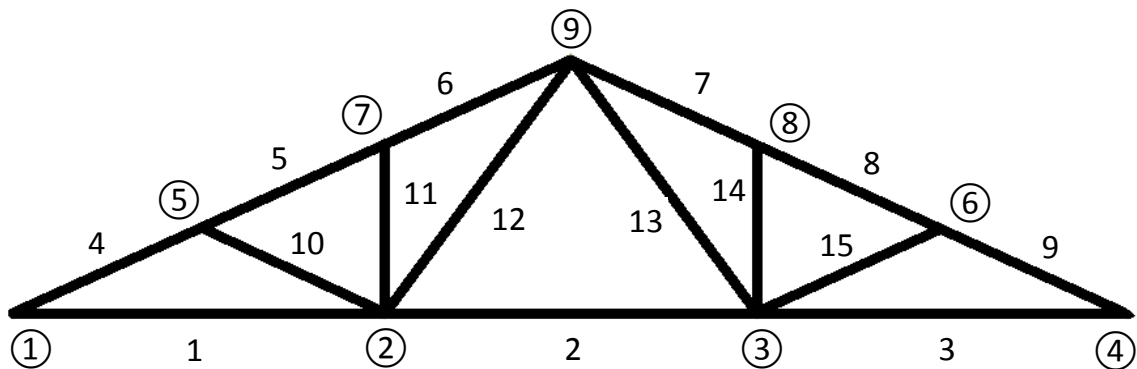
Figura 28 – Possibilidades de seções transversais para treliças em PFF



Fonte: NOGUEIRA, 2009

A treliça utilizada é uma adaptação da proposta por Bellei (2004), composta por 15 barras e 9 nós, considerada isostática com apoios nos nós 1 e 4 de conforme a Figura 29. As 15 barras foram divididas em 5 grupos, seguindo a simetria do formato da treliça e a continuidade das barras, poupando tempo computacional na otimização da estrutura.

Figura 29 – Destaque da treliça de cobertura, elementos e nós



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

Tabela 14 – Grupos de barras da treliça

Grupo	Barras
1	1-3
2	4-9
3	10 e 15
4	11 e 14
5	12 e 13

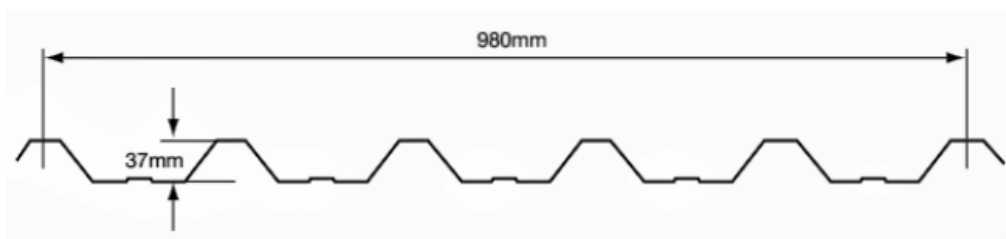
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

Em um primeiro momento, para otimização dimensional, onde as variáveis são as áreas das seções transversais dos elementos, serão considerados altura de 3,5 metros para a treliça e 6 metros de espaçamento entre pórticos, no entanto, para a otimização dimensional em conjunto com a otimização geométrica esses valores serão variáveis, respeitando condições impostas, como por exemplo, a inclinação mínima necessária para escoamento de água da chuva e o correto espaçamento dos pórticos na divisão do comprimento do galpão por um número inteiro.

5.1.2 Telhas

Para o fechamento da cobertura, foi adotado o uso de telhas do tipo trapezoidal 40, fabricadas pelo processo de conformação e revestidas com liga de zinco-alumínio que proporciona qualidade anticorrosivas. Esses componentes seguem a norma ABNT NBR 14514:2008 – Telhas de aço revestido de seção trapezoidal – Requisitos, que determina características e requisitos de fabricação, manuseio e montagem.

Figura 30 – Seção típica – Telha trapezoidal 40



Fonte: ABCEM, 2009

5.1.3 Terças

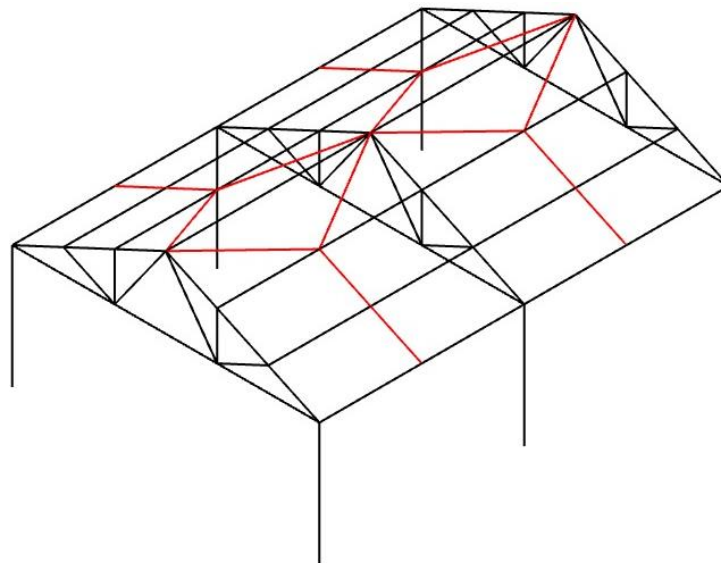
Assim como as barras da treliça, as terças são formadas por perfis U de aço formados a frio e são dispostas ao longo da cobertura, no sentido transversal às treliças e face aberta voltada para o beiral, para oferecer sustentação as telhas, conseqüentemente sendo exigidas a flexão. Esses elementos foram arranjados nos nós do banzo superior da treliça, sendo que

na cumeeira (nó 9) se encontram duas terças, conferindo assim travamento ao banzo, bem como 4 apoios para as telhas ao longo do caimento do telhado. Apesar de cada terça ter esforços diferentes, é prática comum dimensionar a mais carregada e replicar seu perfil para as demais, evitando assim falhas na fabricação e montagem.

5.1.4 Tirantes em Y

Para diminuir o comprimento efetivo das terças na direção principal de menor inércia no perfil, são utilizados tirantes com o intuito de travá-las. Esses elementos, formados por barras redondas trefiladas com extremidade rosqueadas, são posicionados no meio do vão das terças, saindo do beiral até a terça antes da cumeeira, onde se divide em dois tirantes até chegar a cumeeira. Desde que as barras sejam colocadas com uma pré-tensão, a avaliação do índice de esbeltez limite não é necessária.

Figura 31 – Representação do tirante em Y e sua área de atuação

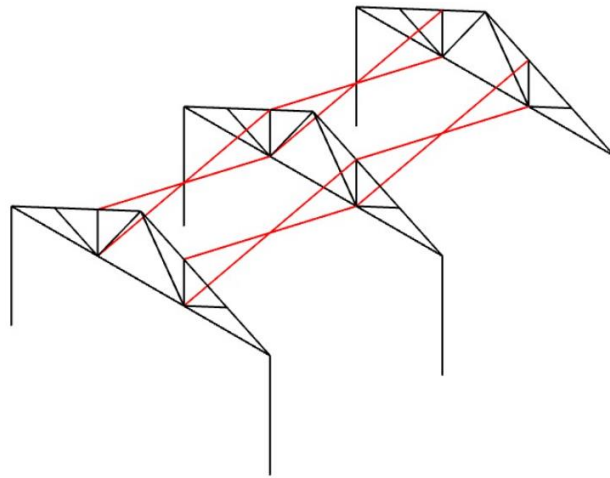


Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

5.1.5 Contraventamento Vertical

Como opção para resistir aos esforços de vento no tapamento frontal da cobertura, garantindo rigidez do plano longitudinal, assim como oferecer travamento para o banzo inferior, foram projetados duas linhas de contraventamento conectando os nós 2 e 7 e os nós 3 e 8 aos respectivos nós 7 e 2, 3 e 8 da treliça seguinte, formando linhas de X que podem ser vistas na Figura 32. Assim como os tirantes, os contraventamentos são em barras redondas trefiladas com extremidade rosqueada, sendo instalados com pré-tensão e é comum a simplificação em obter um sistema isostático simples, considerando as diagonais tracionadas e desprezando as diagonais comprimidas.

Figura 32 – Contraventamento vertical



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

5.2 COMBINAÇÕES DE CÁLCULO, ESFORÇOS E DIMENSIONAMENTOS

5.2.1 Peso Próprio e Sobrecarga

Os carregamentos atuantes na estrutura são divididos em permanentes e variáveis, entre eles o peso próprio da estrutura, sobrecarga e a ação de vento, cada um com seu respectivo coeficiente para o cálculo das combinações de carregamento. Para o peso próprio foi considerado o peso da estrutura portante e das estruturas secundárias, enquanto que para a sobrecarga adotou-se o valor mínimo prescrito no Anexo B da ABNT NBR 8800:2008 de 250 N/m^2 relacionado às instalações necessárias na cobertura de galpões.

5.2.2 Vento

O carregamento devido a ação do vento é calculado conforme a norma ABNT NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações, considerando esforços de vento à 0° e à 90° e de acordo com a com as seguintes expressões:

$$q = 0,613V_k^2 \quad (5.1)$$

onde:

q é a pressão dinâmica;

V_k é a velocidade característica do vento, dada por:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (5.2)$$

onde:

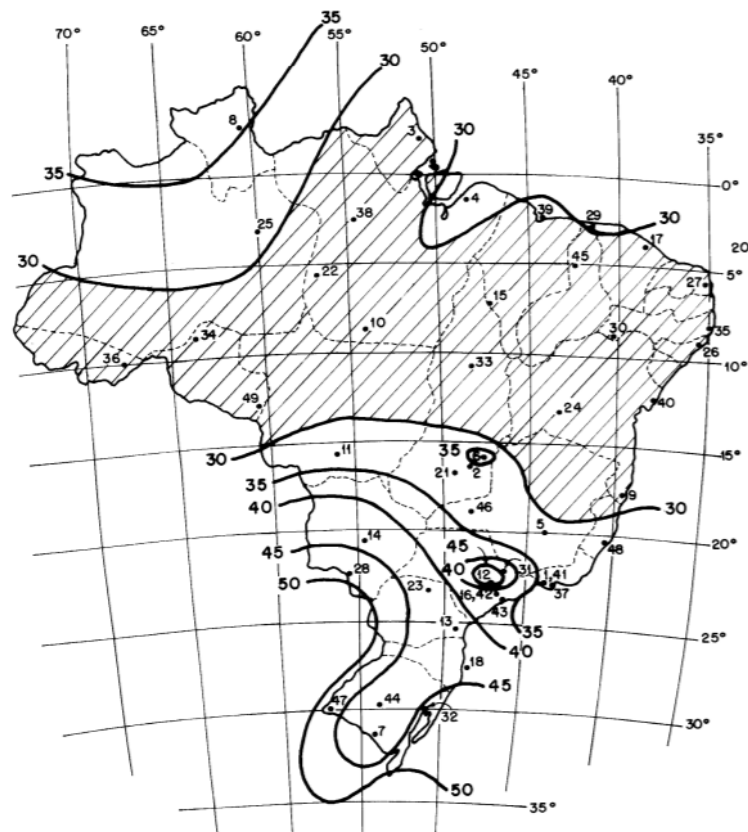
V_0 é a velocidade básica do vento, conforme o mapa de isopletas (Figura 33);

S_1 é o fator topográfico, que considera as variações do relevo no terreno;

S_2 é o fator de rugosidade, considerando as características da superfície do terreno, assim como geometria e altura da edificação;

S_3 é o fator estatístico, que considera grau de segurança e vida útil da edificação.

Figura 33 – Mapa de isopletas







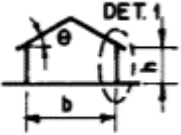
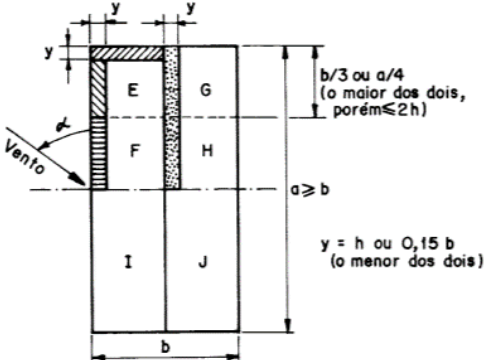
Fonte: ABNT NBR 6123:1988 - Forças devidas ao vento em edificações

Para o problema em questão, situado em Florianópolis, terreno plano e de baixo fator de ocupação, resulta-se em uma velocidade básica do vento de 43 m/s^2 , fator $S_1 = 1$ e fator $S_3 = 0,95$. O fator S_2 por ser dependente da geometria, é calculado para cada rodada do algoritmo, de forma a se obter o valor mais correto. Além destes fatores, deve-se avaliar os coeficientes de pressão e de forma interno e externo (C_{pi} e C_{pe} , respectivamente) e o coeficiente médio ($C_{pe,médio}$), onde valor resultante deve ser multiplicado pela pressão dinâmica e pela área de atuação dessa pressão para resultar na força de atuação devido ao vento. É importante notar que diferente do peso próprio e sobrecarga, onde as ações são verticais, as ações de vento são perpendiculares ao plano da cobertura que é inclinado e dependendo da situação, devem ser decompostos.

$$V = (C_{pe} - C_{pi})qA \tag{5.3}$$

Como simplificação, será desconsiderado a existência de aberturas dominantes, resultando em dois possíveis valores para o coeficiente interno (0,2 e -0,3), sendo utilizado a mais desfavorável para os cálculos. Já o coeficiente externo e o coeficiente médio são calculados, conforme a Tabela 15, também à cada rodada, pois são dependentes da inclinação do telhado. Para os elementos principais são utilizados a soma vetorial dos coeficientes interno e externo, enquanto que para os elementos secundários é utilizado o coeficiente médio, devido às zonas de alta sucção localizadas entre as paredes e o telhado.

Tabela 15 – Coeficientes de pressão e de forma, para telhados com duas águas

Altura relativa	θ	Valores de C_e para				C_{pe} médio			
		$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 0^\circ$					
		EF	GH	EG	FH				
 $h/b \leq 1/2$	0°	-0,8	-0,4	-0,8	-0,4	-2,0	-2,0	-2,0	-
	5°	-0,9	-0,4	-0,8	-0,4	-1,4	-1,2	-1,2	-1,0
	10°	-1,2	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,4		-1,2
	15°	-1,0	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,2		-1,2
	20°	-0,4	-0,4	-0,7	-0,6	-1,0			-1,2
	30°	0,0	-0,4	-0,7	-0,6	-0,8			-1,1
	45°	+0,3	-0,5	-0,7	-0,6				-1,1
	60°	+0,7	-0,6	-0,7	-0,6				-1,1
 <p style="text-align: right;"> $b/3$ ou $a/4$ (o maior dos dois, porém $\leq 2h$) </p> <p style="text-align: right;"> $a \geq b$ </p> <p style="text-align: right;"> $y = h$ ou $0,15 b$ (o menor dos dois) </p>									

Fonte: ABNT NBR 6123:1988 - Forças devidas ao vento em edificações

5.2.3 Treliças

5.2.3.1 Combinações de cálculo e esforços solicitantes

Para as treliças compostas pelas barras em perfis U dobrados a frio, que são os elementos principais, existem diversas combinações de carga que se fazem plausível conforme a norma ABNT NBR 8681:2003 – Ações e segurança nas estruturas –

Procedimento, associando as ações das cargas permanente, sobrecarga e atuação do vento. Para o caso em questão, as possíveis alternativas se resumem em três possibilidades que se mostram críticas para a verificação do Estado Limite Último (ELU), de acordo com as Equações 5.4, 5.5 e 5.6.

$$F_d = \gamma_{g1} PP + \gamma_{g2} PS + \gamma_q^{sc} SC \quad (5.4)$$

$$F_d = \gamma_{g1}^d PP + \gamma_{g2}^d PS + \gamma_q^v V_{0^\circ} \quad (5.5)$$

$$F_d = \gamma_{g1}^d PP + \gamma_{g2}^d PS + \gamma_q^v V_{90^\circ} \quad (5.6)$$

onde:

PP é o peso próprio dos elementos principais;

PS é o somatório do peso próprio dos elementos secundários;

SC é a sobrecarga atuante;

V_{0° e V_{90° são os esforços de vento longitudinal e ortogonal, respectivamente;

γ é o coeficiente de ponderação das ações, sendo os subscritos g referente à ações permanentes e q à ações variáveis, e os sobrescritos sc referente à ações de sobrecarga, v à ações de vento e d quando o coeficiente se mostra desfavorável a segurança.

Tabela 16 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações

Combinações	Ações permanentes			
	Diretas			Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições in loco	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições in loco	
Normais	1,25 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (0)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	0 (0)

Tabela 16 (continuação)

	Ações variáveis	
	Ação do vento	Decorrentes do uso e ocupação
Normais	1,40	1,50
Especiais ou de construção	1,20	1,30
Excepcionais	1,00	1,00

Fonte: ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio

Para o Estado de Limite de Serviço, o procedimento é análogo, conforme indicações de norma, com coeficiente de ponderação equivalente a 1 para o peso próprio. Os casos considerados estão nas Equações 5.7, 5.8 e 5.9.

$$F_{serv} = PP + PS + \psi_1^{sc} SC \quad (5.7)$$

$$F_{serv} = PP + PS + \psi_1^v V_{0^\circ} + \psi_2^{sc} SC \quad (5.8)$$

$$F_{serv} = PP + PS + \psi_1^v V_{90^\circ} + \psi_2^{sc} SC \quad (5.9)$$

onde:

ψ é o fator de redução para ações variáveis.

Tabela 17 – Valores dos fatores de combinação e redução para ações variáveis

Ações		γ_{f2}		
		ψ_0	ψ_1	ψ_2
Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas - Edificações residenciais	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas - Edificações comerciais	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0

Fonte: ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio

Para a análise estrutura das treliças foi utilizado o método da rigidez, também conhecido por método dos deslocamentos, devido a compatibilidade de uso com o software de programação e com estruturas reticuladas. Nesse método se vale da relação dos deslocamentos, que são as incógnitas primárias, com as cargas atuantes na estrutura, através do uso da rigidez dos elementos que a compõe para em seguida se calcular os esforços solicitantes nos elementos (SORIANO, 2005).

$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (5.10)$$

onde:

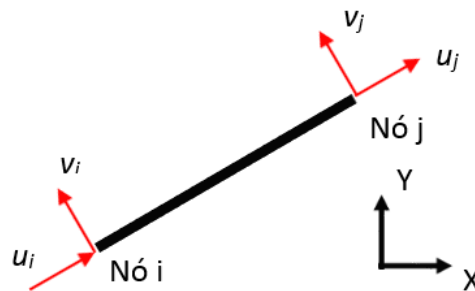
$\{F\}$ é o vetor coluna de cargas externas;

$[K]$ é a matriz de rigidez;

$\{d\}$ é o vetor coluna de deslocamento.

Apesar da estrutura de cobertura ser um elemento de dimensões espaciais, a análise das treliças se dá no plano transversal, onde as barras tem 2 nós, cada uma com 2 graus de liberdade referentes aos deslocamento nos planos X e Y e submetidos exclusivamente a esforços axiais, sendo as forças atuantes localizadas nos seus nós. A Figura 34 representa um elemento da treliça.

Figura 34 – Graus de liberdade para barra em treliça plana



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

5.2.3.2 Dimensionamento

As barras que compõem a treliça são exigidas tanto a tração quanto a compressão, dependendo da hipótese analisada e da resultante de forças. Para as verificações, deve se seguir as orientações presentes na ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, conforme debatido no Capítulo 3, com os limites geométricos, como relação largura/espessura de perfis U e limite de esbeltez. As condições básicas são que os esforços resistentes devem ser maiores que os esforços solicitantes para

combinações no Estado Limite Último e que o deslocamento vertical máximo na estrutura deve estar acordo com o Estado Limite de Serviço.

$$b_w/t \leq 90 \quad (5.11)$$

$$b_f/t \leq 60 \quad (5.12)$$

onde:

b_w e b_f são as larguras da alma e mesa da seção transversal, respectivamente;

t é a espessura da seção transversal.

$$L_x/r_x \leq 200 \quad (5.13)$$

$$L_y/r_y \leq 200 \quad (5.14)$$

onde:

L_x e L_y são os comprimentos destravados dos elementos em relação aos eixos principais de inércia x e y, respectivamente;

r_x e r_y são os raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia x e y, respectivamente.

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \quad (5.15)$$

onde:

$N_{t,Sd}$ é a força axial de tração solicitante de cálculo;

$N_{t,Rd}$ é a força axial de tração resistente de cálculo.

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (5.16)$$

onde:

$N_{t,Sd}$ é a força axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{t,Rd}$ é a força axial de compressão resistente de cálculo.

$$\delta \leq L/250 \quad (5.17)$$

onde:

δ é o deslocamento calculado na estrutura;

L é o vão teórico entre apoios.

Para a verificação da compressão, se optou pelo Método da Seção Efetiva, por sua facilidade de cálculo e resultados menos conservadores. Por se tratar de um perfil U simples (sem enrijecedores), a instabilidade distorcional não é crítica e não precisa ser analisada. A verificação das conexões soldadas não foi abordada, tendo só sido considerado seu efeito na resistência à tração das barras, assim como a combinação das larguras dos perfis para posterior encaixe na montagem da estrutura.

5.2.4 Telhas

5.2.4.1 Combinações de cálculo e esforços solicitantes

Para as telhas, são consideradas duas combinações de carregamento para o cálculo do esforço atuante. A primeira diz respeito a soma do peso próprio das telhas junto a sobrecarga, ambas no mesmo sentido, enquanto a segunda é o somatório do peso próprio e da ação do vento em sentido oposto, atuando como sucção. Esses esforços são calculados na forma de pressão para posterior verificação.

É importante notar que para as telhas, assim como os demais elementos secundários a seguir, a ação do vento deve ser calculado utilizando o coeficiente de pressão e forma médio, como debatido anteriormente.

$$F_d = \gamma_g W + \gamma_q^{sc} SC \quad (5.18)$$

$$F_d = \gamma_g^d W + \gamma_q^v V \quad (5.19)$$

onde:

W é o peso próprio das telhas;

SC é a sobrecarga atuante;

V é o esforço de vento nas áreas de turbulência;

γ é o coeficiente de ponderação das ações.

5.2.4.2 Dimensionamento

Segundo a Associação Brasileira de Construção Metálica (ABCÉM), através do manual técnico Telhas de Aço (2009), é possível se obter a carga admissível de diferentes espessuras de telha, baseado no número e distanciamento entre apoios que obedecem critérios de flecha máxima e tensão admissível máxima. Como já discutido anteriormente, as terças provêm 4 apoios e 6 possibilidades de espessura de telhas são analisadas para uso, seguindo a Tabela 18.

Tabela 18 – Cargas admissíveis para as telhas (N/m^2)

Índice	Espessura (mm)	Número de apoios	Distância entre apoios (m)					
			1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
1	0,43	4	2200	1690	1330	1020	770	590
2	0,50		2550	1950	1540	1190	890	690
3	0,65		3300	2530	2000	1530	1150	890
4	0,80		4040	3090	2440	1870	1410	1080
5	0,95		4760	3650	2880	2210	1660	1280
6	1,25		6190	4740	3750	2280	2160	1660

Fonte: Adaptado de ABCEM (2009)

5.2.5 Terças

5.2.5.1 Combinações de cálculo e esforços solicitantes

As terças são calculadas com as mesmas duas combinações de carregamento das telhas, sendo validas as equações mostradas, com a diferença da adição dos pesos da própria terça e dos tirantes, utilizados no plano da cobertura para diminuir o comprimento de flambagem. Como a atuação do peso próprio, sobrecarga e efeito do vento são em direções diferentes, assim como a terça tem a inclinação dos seus eixos principais afetada pela inclinação do telhado, é necessário a diferenciação das forças nos eixos x e y locais do elemento.

$$F_{d,x} = \gamma_g W \cdot \cos\theta + \gamma_q^{sc} SC \cdot \cos\theta \quad (5.20)$$

$$F_{d,y} = \gamma_g W \cdot \sen\theta + \gamma_q^{sc} SC \cdot \sen\theta \quad (5.21)$$

$$F_{d,x} = \gamma_g^d W \cdot \cos\theta + \gamma_q^v V \quad (5.22)$$

$$F_{d,y} = \gamma_g^d W \cdot \sen\theta \quad (5.23)$$

onde:

W é o peso próprio das telhas, terça e tirantes;

SC é a sobrecarga atuante;

V é o esforço de vento nas áreas de turbulência;

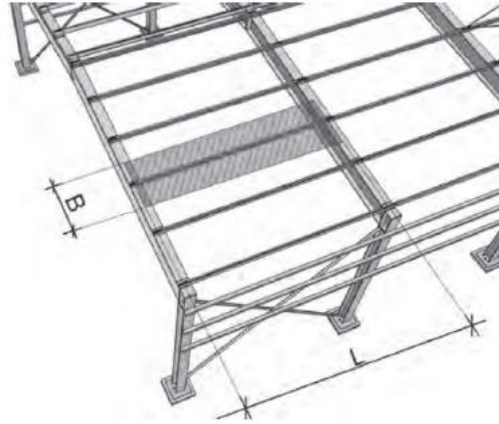
θ é a inclinação do telhado;

γ é o coeficiente de ponderação das ações.

Com as forças de cálculo, se procede com a análise dos momentos nas direções principais para posterior verificação das terças. A comprimento do vão em x é tomada como

o distância dos pórticos, enquanto que para y , devido a presença dos tirantes, foi tomado metade deste valor. A Figura 35 faz referência a área sustentada por uma terço e de atuação dos esforços.

Figura 35 – Representação da área de atuação da terço



Fonte: CBCA, 2010

5.2.5.2 Dimensionamento

Assim como as barras das treliças, por se tratarem de perfis formados a frio, as terços seguem a norma ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, porém o procedimento aqui utilizado é a verificação da flexão pelo Método da Seção Efetiva, sendo esta uma flexão oblíqua, e do esforço cortante. Da mesma maneira, conforme debatido no Capítulo 3, ocorre a averiguação dos limites geométricos, como relação largura/espessura de perfis U e limite de esbeltez, e do deslocamento vertical máximo na estrutura de acordo com o Estado Limite de Serviço. A instabilidade distorcional não é crítica e não precisa ser analisada.

$$b_w/t \leq 90 \quad (5.24)$$

$$b_f/t \leq 60 \quad (5.25)$$

onde:

b_w e b_f são as larguras da alma e mesa da seção transversal, respectivamente;

t é a espessura da seção transversal.

$$L_x/r_x \leq 200 \quad (5.26)$$

$$L_y/r_y \leq 200 \quad (5.27)$$

onde:

L_x e L_y são os comprimentos destravados dos elementos em relação aos eixos principais de inércia x e y, respectivamente;

r_x e r_y são os raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia x e y, respectivamente.

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (5.28)$$

onde:

M_{Sd} é o momento fletor solicitante de cálculo;

M_{Rd} é o momento fletor resistente de cálculo.

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (5.29)$$

onde:

V_{Sd} é a força cortante solicitante de cálculo;

V_{Rd} é a força cortante resistente de cálculo.

$$\delta \leq L/180 \text{ (forças gravitacionais)} \quad (5.30)$$

$$\delta \leq L/120 \text{ (sucção)} \quad (5.31)$$

onde:

δ é o deslocamento calculado na estrutura;

L é o vão teórico entre apoios.

5.2.6 Tirantes em Y

5.2.6.1 Combinações de cálculo e esforços solicitantes

Para a combinação de carga dos tirantes, segue-se as orientações do Instituto Aço Brasil - Centro Brasileiro de Construção em Aço (IABr/CBCA), onde a força crítica é calculada conforme o peso próprio dos elementos e a sobrecarga atuante, ambas decompostas na direção do plano do telhado, dado que o funcionamento dos tirantes se dá a tração. A força solicitante no trecho após a bifurcação se dá por trigonometria.

$$F_d = \gamma_g W \cdot \text{sen}\theta + \gamma_q^{sc} SC \cdot \text{sen}\theta \quad (5.32)$$

onde:

W é o peso próprio das telhas, terça e tirante;

SC é a sobrecarga atuante;

θ é a inclinação do telhado;

γ é o coeficiente de ponderação das ações.

5.2.6.2 Dimensionamento

Seguindo a ABNT NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios para o dimensionamento das barras treiladas submetidas a esforço axial de tração, deve-se adotar o menor valor de resistência entre o escoamento da seção bruta e a ruptura da seção rosqueada, se valendo de que o limite de esbeltez não precisa ser analisado devido a pré-tensão aplicada na instalação da barra.

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (5.33)$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_y}{\gamma_{a2}} \quad (5.34)$$

onde:

f_y é a resistência ao escoamento do aço;

A_g é a área bruta da seção transversal da barra;

A_e é a área líquida efetiva da seção transversal da barra, $0,75A_g$;

γ_{a1} e γ_{a2} são os coeficientes de ponderação da resistência, equivalentes à 1,35 e 1,10, respectivamente.

A Tabela 19 mostra os diâmetros possíveis para as barras e a condição final que deve ser atendida é representada pela equação 5.35.

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \quad (5.35)$$

onde:

$N_{t,Sd}$ é a força axial de tração solicitante de cálculo;

$N_{t,Rd}$ é a força axial de tração resistente de cálculo.

Tabela 19 – Diâmetro das barras redondas trefiladas

Índice	Diâmetro (mm)
1	12,00
2	12,70
3	14,00
4	14,28
5	15,00
6	15,88
7	16,00
8	17,00
9	17,46
10	18,00

Fonte: Adaptado de Gerdau (2020)

5.2.7 Contraventamento Vertical

5.2.7.1 Combinações de cálculo e esforços solicitantes

Pela disposição do contraventamento, a força atuante se dá pela atuação do vento na área triangular referente ao tapamento frontal da treliça. A força que a princípio é horizontal, deve ser transferida na direção da barra tracionada para se proceder com a verificação.

$$F_d = \gamma_q^v VA \quad (5.36)$$

onde:

V é o esforço de vento nas áreas de turbulência;

A é a área de atuação do vento;

γ é o coeficiente de ponderação das ações.

5.2.7.2 Dimensionamento

O dimensionamento do contraventamento vertical segue o mesmo rito de cálculo descrito para os tirantes em Y, considerando o funcionamento pelas diagonais tracionadas, deve-se fazer a verificação da resistência à tração.

6 RESULTADOS

Como forma de avaliar a evolução do algoritmo de otimização, foram analisados dois processos. Inicialmente, com valores fixos de 3,5 metros para a altura da treliça e 6 metros para o espaçamento entre pórticos, aplicou-se o processo de otimização dimensional das treliças, telhas, terças, tirantes e contraventamento, com o intuito de alcançar, dentro dos limites estabelecidos e possíveis alternativas, o menor peso da estrutura. Posteriormente converteu-se esses valores para variáveis, dando outras influências para o processamento do problema, adicionando à otimização dimensional, a otimização geométrica e a escolha do número de pórticos, que influencia diretamente no espaçamento entre estes.

Quanto aos perfis formados a frio, adotou-se duas metodologias de escolha das dimensões da seção transversal para posterior comparação com perfis laminados. O primeiro segue os perfis tabelados presentes no Apêndice A (Tabela 32) da ABNT NBR 6355:2012 - Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização, e tem todos as suas propriedades geométricas retiradas diretamente de listas adicionadas no algoritmo. O segundo método desvincula os perfis das listas, sendo as propriedades geométricas calculadas conforme os métodos linear e simplificado presentes no Capítulo 2. Seguindo um dos conceitos de perfil livre, grande vantagem dos perfis dobrados a frio e que podem ser fabricados sob medida, as almas podem variar entre 50 e 250 *mm*, mesas entre 20 e 120 *mm* e as espessuras entre onze valores compreendidos de 1,2 a 6,3 *mm*.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nos modelos de otimização, com informações dos índices de cada elemento, dimensões dos perfis e massa resultante. Informações sobre o algoritmo, como número de iterações e tempo de processamento também serão exibidos. A escolha de apresentar a massa, em vez do peso, se deu por considerar essa grandeza mais intuitiva ao se analisar os valores e para o tempo computacional foi utilizado um processador Intel® Core™ i7-5500u 2.4 GHz, com 8.00 GB de memória RAM.

6.1 OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL

6.1.1 Perfil Laminado – Tabelado

A otimização utilizando perfis laminados serve como parâmetro de comparação para com os resultados obtidos utilizando perfis formados a frio. O tipo de perfil utilizado foi o cantoneira duplo “T” para os grupos 1 e 2 da treliça e cantoneira simples “L” para os grupos 3, 4 e 5, escolhas típicas nesse tipo de projeto, sendo seus índices e dimensões apresentados na Tabela 33 no Apêndice A. Por não ser o assunto principal desse estudo, as verificações

de norma não foram apresentadas, no entanto todas são seguidas de acordo com a ABNT NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

Neste modelo o algoritmo é responsável por otimizar nove variáveis, todas elas referentes as dimensões das seções transversais dos elementos que compõem a estrutura, sendo cinco destas referentes aos grupos formados pelas barras da treliça e as outras quatro referentes às telhas, terças, tirantes e contraventamento vertical. A Tabela 20 apresenta os resultados para três níveis de otimização, com o melhor resultado encontrado de 15767,22 kg.

Tabela 20 – Otimização dimensional em perfil laminado

N° de iterações	3.000		10.000		30.000	
Tempo (min)	11,15		36,78		109,95	
Altura treliça (m)	3,50		3,50		3,50	
N° de pórticos	9		9		9	
Espaçamento pórticos (m)	6,00		6,00		6,00	
Massa total (kg)	16316,07		16042,56		15767,22	
	Perfil	Massa (kg)	Perfil	Massa (kg)	Perfil	Massa (kg)
Treliça - grupo 1	27 2L 88,9x6,35	1 un. 575,27 Total 5177,40 (31,73%)	27 2L 88,9x6,35	1 un. 600,73 Total 5406,58 (33,70%)	27 2L 88,9x6,35	1 un. 565,48 Total 5089,28 (32,28%)
Treliça - grupo 2	19 2L 63,5x4,76		19 2L 63,5x4,76		19 2L 63,5x4,76	
Treliça - grupo 3	25 L 76,2x6,35		25 L 76,2x6,35		21 L 76,2x4,76	
Treliça - grupo 4	19 L 63,5x4,76		19 L 63,5x4,76		19 L 63,5x4,76	
Treliça - grupo 5	34 L 127x6,35		38 L 127x7,94		34 L 127x6,35	
Telhas	4	6019,84 (36,90%)	4	6019,84 (37,52%)	4	6019,84 (38,18%)
Terças	98 300x100x3,00	4432,19 (27,16%)	92 150x75x4,75	4073,40 (25,39%)	92 150x75x4,75	4073,40 (25,83%)
Tirantes	4	275,03 (1,69%)	2	217,53 (1,36%)	3	264,35 (1,68%)
Contraventamento	10	411,61 (2,52%)	7	325,22 (2,03%)	6	320,36 (2,03%)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

6.1.2 Perfil Dobrado a Frio – Tabelado

Neste modelo o algoritmo funciona de forma similar com nove variáveis, no entanto, seguindo as particularidades da verificação de perfis dobrados a frio descritos nos capítulos anteriores. O número de possíveis combinações é na ordem de 10^{15} , com o menor valor encontrado de 13277,51 kg para 30 mil iterações.

Tabela 21 – Otimização dimensional em PFF tabelado

N° de iterações	3.000		10.000		30.000	
Tempo (min)	11,45		41,09		112,54	
Altura treliça (m)	3,50		3,5		3,5	
N° de pórticos	9		9		9	
Espaçamento pórticos (m)	6,00		6,00		6,00	
Massa total (kg)	13519,35		13304,55		13277,51	
	Perfil	Massa (kg)	Perfil	Massa (kg)	Perfil	Massa (kg)
Treliça - grupo 1	83 200x100x3,00	1 un. 326,97 Total 2942,75 (21,77%)	83 200x100x3,00	1 un. 323,98 Total 2915,84 (21,92%)	83 200x100x3,00	1 un. 320,98 Total 2888,80 (21,76%)
Treliça - grupo 2	54 125x75x3,00		50 150x75x2,65		50 150x75x2,65	
Treliça - grupo 3	39 100x50x3,35		39 100x50x3,35		39 100x50x3,35	
Treliça - grupo 4	13 100x50x1,50		13 100x50x1,50		6 100x40x1,20	
Treliça - grupo 5	46 125x75x2,65		46 125x75x2,65		46 125x75x2,65	
Telhas	4	6019,84 (44,53%)	4	6019,84 (45,25%)	4	6019,84 (45,34%)
Terças	89 300x100x2,65	3925,66 (29,04%)	89 300x100x2,65	3925,66 (29,51%)	89 300x100x2,65	3925,66 (29,57%)
Tirantes	7	345,27 (2,55%)	1	194,21 (1,46%)	1	194,21 (1,46%)
Contraventamento	5	285,84 (2,11%)	3	249,00 (1,87%)	3	249,00 (1,88%)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

A diferença dos valores nos resultados para distintos número de iterações não é algo significativo (1,79%) considerando que a processo mais rápido levou 11 minutos, enquanto que o melhor resultado foi encontrado em um tempo 10 vezes maior. Isso mostra a qualidade de convergência do algoritmo otimizador, mesmo em processos com baixo número de iterações, em encontrar uma alternativa válida.

Com o maior número de análises, os perfis do grupo 1, grupo 3, grupo 5, telhas e terças, permaneceram os mesmos enquanto que os perfis do grupo 2, grupo 4, tirantes e contraventamento diminuiram, reduzindo assim peso da estrutura.

6.1.3 Perfil Dobrado a Frio – Livre

Para utilizar perfis livres no dimensionamento, cada um dos perfis da treliça e das terças em vez de ser representado por uma única variável, foi representado por três, referentes a largura da alma, largura da mesa e espessura do perfil, totalizando 21 variáveis e aumentando o número de possíveis combinações para 10^{34} . O melhor resultado de 12887,10 kg é mais leve que as opções em perfil laminado e aço dobrado a frio. Novamente, destaca-se a convergência do algoritmo otimizador, com soluções muito próximas em tempos de processamento distintos.

Tabela 22 – Otimização dimensional em PFF livre

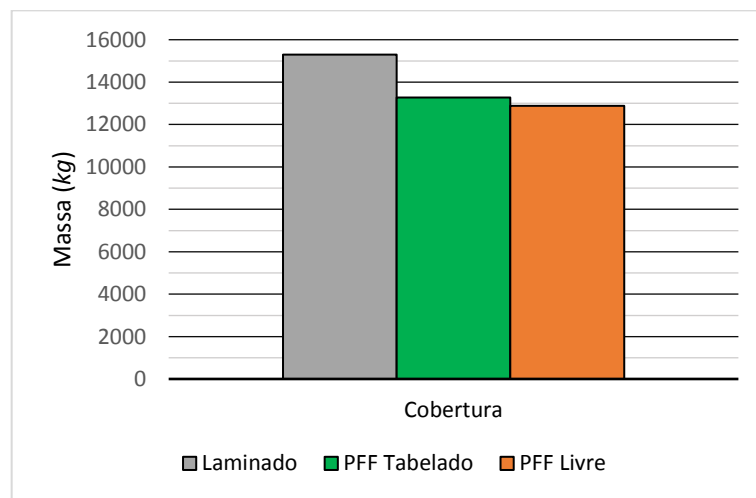
N° de iterações	3.000		10.000		30.000	
Tempo (min)	11,95		44,90		146,42	
Altura treliça (m)	3,50		3,50		3,50	
N° de pórticos	9		9		9	
Espaçamento pórticos (m)	6,00		6,00		6,00	
Massa total (kg)	12892,05		12887,10		12896,80	
	Perfil	Massa (kg)	Perfil	Massa (kg)	Perfil	Massa (kg)
Treliça - grupo 1	170x90x3,35	1 un.	203x92x3,00	1 un.	170x90x3,35	1 un.
Treliça - grupo 2	119x63x3,00	286,35	117x64x3,00	285,80	143x65x2,65	286,88
Treliça - grupo 3	87x45x1,50	Total	87x45x1,50	Total	52x44x2,00	Total
Treliça - grupo 4	64x39x1,50	2577,16	90x42x1,20	2572,21	64x39x1,50	2581,91
Treliça - grupo 5	165x77x2,00	(19,99%)	169x75x2,00	(19,96%)	109x70x2,65	(20,02%)
Telhas	4	6019,84 (46,69%)	4	6019,84 (46,71%)	4	6019,84 (46,68%)
Terças	207x73x3,75	3851,84 (29,88%)	207x73x3,75	3851,84 (29,89%)	209x72x3,75	3851,84 (29,87%)
Tirantes	1	194,21 (1,51%)	1	194,21 (1,51%)	1	194,21 (1,51%)
Contraventamento	3	249,00 (1,93%)	3	249,00 (1,93%)	3	249,00 (1,93%)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

6.1.4 Comparações

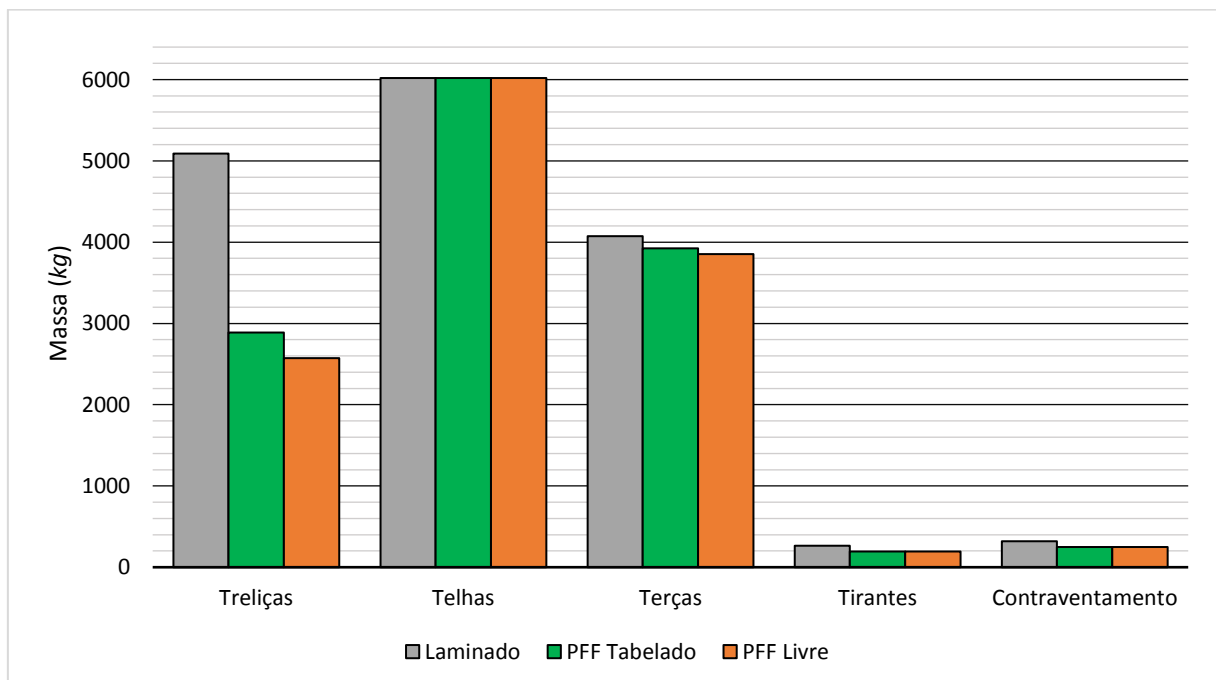
As Figuras 36 e 37 apresentam, em gráficos, as diferenças da massa total e dos componentes para os 3 melhores resultados entre perfil de aço laminado, perfil de aço dobrado a frio tabelado e perfil de aço dobrado a frio livre. É possível notar a grande diferença na massa total utilizando aço dobrado a frio tanto em perfis tabelados quanto em perfis livres, com a estrutura da cobertura sendo, respectivamente, 13,22% e 15,77% mais leve do que a em aço laminado.

Figura 36 – Comparação da massa total para otimização dimensional



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

Figura 37– Comparação da massa dos componentes para otimização dimensional



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

A Tabela 23 mostra uma comparação direta entre as opções em aço dobrado a frio, podendo ser possível uma comparação entre massa e escolha dos perfis dos componentes. A possibilidade do uso de medidas específicas para os perfis livres possibilita um melhor aproveitamento do mesmo, reduzindo a massa das treliças e das terças em 316,6 kg e 73,8 kg, respectivamente, resultando em uma economia de 390,41 kg. Destaca-se ainda a grande influência da massa das telhas para o projeto, correspondendo em mais de 45% do total e de extrema importância em se otimizar, junto às hipóteses de carregamento, para alcançar perfis mais finos. Por outro lado, tirantes e o contraventamento vertical têm pequeno peso na estrutura final.

Tabela 23 – Comparação entre PFF tabelado e livre para otimização dimensional

Perfil Formado a Frio	Tabelado		Livre	
Altura treliça (m)	3,50		3,50	
Nº de pórticos	9		9	
Espaçamento pórticos (m)	6,00		6,00	
Massa total (kg)	13277,51		12887,10	
	Perfil	Massa (kg)	Perfil	Massa (kg)
Treliça - grupo 1	200x100x3,00	1 un.	203x92x3,00	1 un.
Treliça - grupo 2	150x75x2,65	320,98	117x64x3,00	285,80
Treliça - grupo 3	100x50x3,35	Total	87x45x1,50	Total
Treliça - grupo 4	100x40x1,20	2888,80	90x42x1,20	2572,21
Treliça - grupo 5	125x75x2,65	(21,76%)	169x75x2,00	(19,96%)
Telhas	4	6019,84 (45,34%)	4	6019,84 (46,71%)
Terças	300x100x2,65	3925,66 (29,57%)	207x73x3,75	3851,84 (29,89%)
Tirantes	1	194,21 (1,46%)	1	194,21 (1,51%)
Contraventamento	3	249,00 (1,88%)	3	249,00 (1,93%)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

6.2 OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL, GEOMÉTRICA E DE PÓRTICOS

Análoga à otimização dimensional, o processo agora leva em conta as alterações dos valores da altura da treliça e do número de pórticos de constantes para variáveis, adicionando assim mais dois fatores que devem ser otimizados. Levando essa mudança em consideração, o número de iterações máximo foi aumentado de 30 mil para 100 mil.

6.2.1 Perfil Laminado – Tabelado

Esta otimização serve como parâmetro de comparação para as otimizações utilizando perfil dobrado a frio, seguindo os mesmos princípios antes debatidos, totalizando 11 variáveis. Como pode ser visto na Tabela 24, a melhor solução encontrada pelo algoritmo é de 13628,73 kg em 100 mil iterações, não muito longe do resultado em 30 mil iterações, sendo que neste último o tempo computacional é muito menor. Enquanto a solução em 30 mil iterações utiliza um menor espaçamento entre pórticos, possibilitando que tanto nestes quanto nas terças se utilizem perfis menores, em 100 mil iterações a solução utiliza pórticos mais robustos e com maior espaçamento, fato que exige um perfil maior para as terças (aumentando a massa desse componente) mas que é compensado pelo menor número de pórticos.

Tabela 24 – Otimização dimensional, geométrica e de pórticos em perfil laminado

N° de iterações	3.000		30.000		100.000	
Tempo (min)	10,97		125,66		360,03	
Altura treliça (m)	2,50		2,45		2,40	
N° de pórticos	12		12		9	
Espaçamento pórticos (m)	4,36		4,36		6,00	
Massa total (kg)	14065,49		13629,94		13628,73	
	Perfil	Massa (kg)	Perfil	Massa (kg)	Perfil	Massa (kg)
Treliça - grupo 1	27 2L 88,9x6,35	1 un. 497,91 Total 5974,88 (42,48%)	27 2L 88,9x6,35	1 un. 487,64 Total 5851,70 (42,93%)	27 2L 88,9x6,35	1 un. 507,31 Total 4565,79 (33,50%)
Treliça - grupo 2	17 2L 50,8x4,76		17 2L 50,8x4,76		19 2L 63,5x4,76	
Treliça - grupo 3	29 L 76,2x7,94		25 L 76,2x6,35		21 L 76,2x4,76	
Treliça - grupo 4	15 L 44,45x4,76		15 L 44,45x4,76		15 L 44,45x4,76	
Treliça - grupo 5	30 L 101,6x6,35		30 L 101,6x6,35		30 L 101,6x6,35	
Telhas	3	4643,46 (33,01%)	3	4634,26 (34,00%)	3	4625,22 (33,94%)
Terças	65 200x75x2,65	2725,65 (19,38%)	65 200x75x2,65	2725,65 (20,00%)	92 150x75x4,75	4073,40 (29,89%)
Tirantes	4	335,11 (2,38%)	1	236,28 (1,73%)	1	187,87 (1,38%)
Contraventamento	9	386,38 (2,75%)	1	182,05 (1,34%)	1	176,46 (1,29%)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

6.2.2 Perfil Dobrado a Frio – Tabelado

Para esta otimização, a melhor solução encontrada é de 10948,04 kg. Apesar da solução em 100 mil iterações ser próxima a de 30 mil, não representando muito ganho se levado em conta o tempo de processamento, elas são consideravelmente melhores que a de 3.000 iterações, com uma diferença de 4,6% na massa final. O número de possíveis combinações é na ordem de 10^{19} .

Tabela 25 – Otimização dimensional, geométrica e de pórticos em PFF tabelado

N° de iterações	3.000		30.000		100.000	
Tempo (min)	11,77		116,13		368,26	
Altura treliça (m)	2,40		2,75		2,75	
N° de pórticos	13		14		14	
Espaçamento pórticos (m)	4,00		3,69		3,69	
Massa total (kg)	11472,75		10958,72		10948,04	
	Perfil	Massa (kg)	Perfil	Massa (kg)	Perfil	Massa (kg)
Treliça - grupo 1	83 200x100x3,00	1 un. 299,91 Total 3898,78 (33,98%)	74 200x100x2,65	1 un. 266,95 Total 3737,37 (34,10%)	74 200x100x2,65	1 un. 271,27 Total 3797,75 (34,69%)
Treliça - grupo 2	46 125x75x2,65		40 100x75x2,65		40 100x75x2,65	
Treliça - grupo 3	45 100x50x3,75		8 100x50x1,20		39 100x50x3,35	
Treliça - grupo 4	13 100x50x1,50		13 100x50x1,50		3 75x40x1,20	
Treliça - grupo 5	46 125x75x2,65		54 125x75x3,00		40 100x75x2,65	
Telhas	3	4625,22 (40,31%)	3	4691,96 (42,81%)	3	4691,96 (42,86%)
Terças	51 200x50x2,65	2327,65 (20,29%)	41 150x50x2,65	1926,65 (17,58%)	41 150x50x2,65	1926,65 (17,60%)
Tirantes	1	252,55 (2,20%)	2	305,31 (2,79%)	1	272,58 (2,49%)
Contraventamento	8	368,54 (3,21%)	5	297,44 (2,71%)	3	259,10 (2,37%)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

Ao se comparar as soluções encontradas neste tipo de otimização com a otimização somente a nível dimensional, se percebe a preferência por treliças mais baixas e espaçamento entre pórticos menores, possibilitando o uso de uma telha mais fina e uma redução de massa de 1327,87 kg nesse componente. Essa geometria também reduz em 1999,00 kg a massa

das terças pela possibilidade do uso de perfis mais leves, e apesar da massa total de treliças aumentar em 908,95 kg, essas mudanças possibilitam uma estrutura muito mais otimizada.

6.2.3 Perfil Dobrado a Frio – Livre

Novamente se procedeu com a substituição nos perfis formados a frios de uma variável para três, totalizando 23 variáveis e 10^{38} possíveis combinações. Em todas as iterações os resultados foram muito próximos, com diferença na casa de milímetros na escolha dos perfis da treliça, exceto para o grupo 5 onde se utilizou um perfil de alma maior e mais esbelto. O melhor resultado obtido tem massa de 9987,71 kg.

Tabela 26 – Otimização dimensional, geométrica e de pórticos em PFF livre

N° de iterações	3.000		30.000		100.000	
Tempo (min)	12,42		142,56		429,22	
Altura treliça (m)	2,77		2,77		2,81	
N° de pórticos	17		17		17	
Espaçamento pórticos (m)	3,00		3,00		3,00	
Massa total (kg)	10005,25		9987,71		10012,86	
	Perfil	Massa (kg)	Perfil	Massa (kg)	Perfil	Massa (kg)
Treliça - grupo 1	175x84x2,65	1 un.	175x84x2,65	1 un.	174x83x2,65	1 un.
Treliça - grupo 2	129x58x2,00	198,25	131x57x2,00	197,22	82x54x2,65	198,13
Treliça - grupo 3	72x42x1,20	Total	71x42x1,20	Total	71x42x1,20	Total
Treliça - grupo 4	50x29x1,20	3370,20	50x29x1,20	3352,66	50x30x1,20	3368,23
Treliça - grupo 5	85x58x2,00	(33,68%)	133x60x1,50	(33,57%)	85x58x2,00	(33,64%)
Telhas	3	4696,02 (46,94%)	3	4696,02 (47,02%)	3	4704,21 (46,98%)
Terças	157x40x2,00	1389,51 (13,89%)	155x41x2,00	1389,51 (13,91%)	157x40x2,00	1389,51 (13,88%)
Tirantes	1	325,27 (3,25%)	1	325,27 (3,26%)	1	325,77 (3,25%)
Contraventamento	2	224,25 (2,24%)	2	224,25 (2,25%)	2	225,15 (2,25%)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

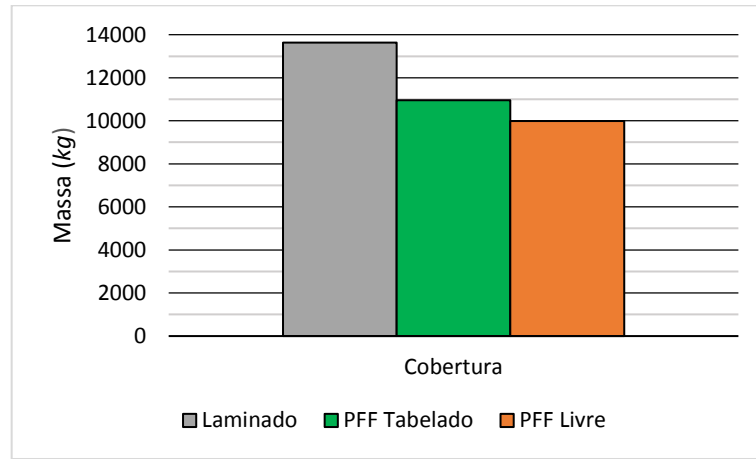
Quando comparado os resultados obtidos pelo uso em conjunto de otimizações dimensional, geométrica e dos pórticos à otimização somente a nível dimensional pode se notar novamente a tendência da escolha de espaçamento de pórticos menores, resultando em um maior número destes para cobrir os 48 metros de comprimento da edificação. Resultante dessa mudança, a massa do total de pórticos aumenta em 780,54 kg, mas é compensada pelas telhas (-1323,81 kg) e principalmente terças (-2462,33 kg), que junto a

pequena variação decorrente de tirantes e contraventamento, resultam em uma diminuição de 2899,39 kg no peso total da cobertura.

6.2.4 Comparações

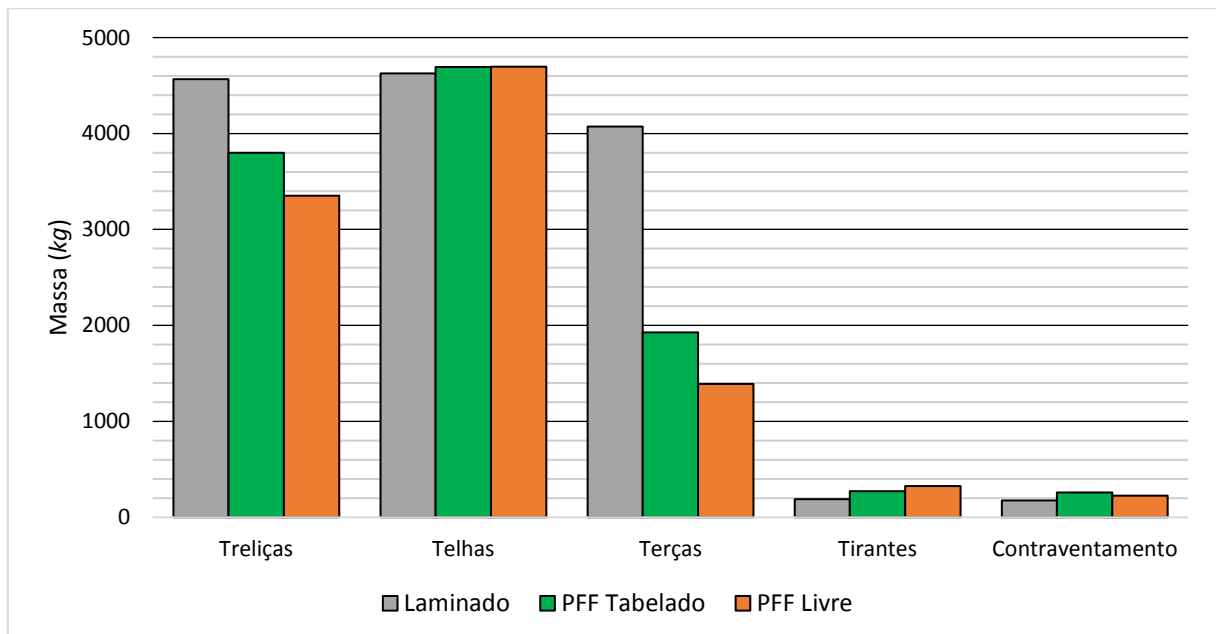
Dentro da liberdade de escolha de altura da treliça e distanciamento dos pórticos, fica ainda mais evidente a diferença entre a escolha em perfis de aço laminado e em perfis de aço dobrado a frio. Os resultados encontrados para os perfis livres e para os perfis tabelados são 19,67% e 26,72% mais leves que a solução em aço laminado e representados nas Figuras 38 e 39.

Figura 38 – Comparação da massa total para otimização dimensional, geométrica e de pórticos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

Figura 39 – Comparação da massa dos componentes para otimização dimensional, geométrica e de pórticos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

Na comparação direta entre a otimização com perfis tabelados e com perfis livres é possível notar que ambas se beneficiam da altura da treliça menor, perto de 2,75 metros, e espaçamento entre pórticos menores, principalmente os perfis livres. Os perfis de telhas e tirantes são os mesmos e o resultado para o contraventamento se distingue pela aleatoriedade imposta no algoritmo, e não pela necessidade do perfil na otimização tabelada ser maior para suportar aos esforços. A diferença entre treliças e terças resulta em uma economia de 960,33 kg, 2,5 vezes maior que a mesma comparação feita a nível dimensional.

Tabela 27 – Comparação entre PFF tabelado e livre para otimização dimensional, geométrica e de pórticos

Perfil Formado a Frio	Tabelado		Livre	
Altura treliça (m)	2,75		2,77	
Nº de pórticos	14		17	
Espaçamento pórticos (m)	3,69		3,00	
Massa total (kg)	10948,04		9987,71	
	Perfil	Massa (kg)	Perfil	Massa (kg)
Treliça - grupo 1	200x100x2,65	1 un.	175x84x2,65	1 un.
Treliça - grupo 2	100x75x2,65	271,27	131x57x2,00	197,22
Treliça - grupo 3	100x50x3,35	Total	71x42x1,20	Total
Treliça - grupo 4	75x40x1,20	3797,75	50x29x1,20	3352,66
Treliça - grupo 5	100x75x2,65	(34,69%)	133x60x1,50	(33,57%)
Telhas	3	4691,96 (42,86%)	3	4696,02 (47,02%)
Terças	300x100x2,65	1926,65 (17,60%)	155x41x2,00	1389,51 (13,91%)
Tirantes	1	272,58 (2,49%)	1	325,27 (3,26%)
Contraventamento	3	259,10 (2,37%)	2	224,25 (2,25%)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

6.2.5 Método da Seção Efetiva e Método da Largura Efetiva

Como já discutido anteriormente, o Método da Seção Efetiva resulta em valores menos conservadores para o efeito da flambagem local quando comparado com o Método da Largura Efetiva. Essa distinção, em conjunto com os grandes comprimentos das barras da treliça, faz com que a flambagem global – ou em alguns casos o limite de esbeltez - seja o efeito mais crítico no dimensionamento. As Tabelas 28 e 29 apresentam a força axial de compressão resistente de cálculo, coeficientes utilizados para os cálculos e a força solicitante para

comparação, utilizando o MSE e o MLE, respectivamente, para a treliça otimizada em perfil livre.

Tabela 28 – Treliça da otimização dimensional, geométrica e de pórticos em PFF livre – Método da Seção Efetiva

	Características Geométricas				Flambagem Global		Flambagem Local			Força	
	Perfil	A (cm ²)	L (m)	$\lambda \leq 200$	N _e (kN)	χ	λ_p	A _{ef} /A	N _{cRd} (kN)	N _{cSd} (kN)	
Grupo 1	175x84x2,65	8,86	5,00	187,83	48,62	0,193	0,614	1,00	35,53	35,49	
Grupo 2	131x57x2,00	4,77	2,67	149,47	40,84	0,300	0,720	1,00	29,85	29,76	
Grupo 3	71x42x1,20	1,81	2,67	196,28	7,54	0,146	0,561	1,00	5,51	5,50	
Grupo 4	50x29x1,20	1,25	1,85	198,43	6,26	0,176	0,426	1,00	4,57	3,87	
Grupo 5	133x60x1,50	3,72	3,73	197,03	17,21	0,162	0,730	1,00	12,58	12,53	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

Como pode ser visto na Tabela 28, seguindo o conceito de otimização em aproveitar ao máximo as características do perfil, todos os perfis trabalham muito perto do limite no que se refere ao limite de esbeltez (especialmente o Grupo 4) e ao esforço resistente. Enquanto a flambagem local não afeta a resistência dos perfis (visto a relação A_{ef}/A), a flambagem global - dado pelo fator χ - tem grande efeito, sendo flexão em relação ao eixo y para o Grupo 4 e flexo-torção para os demais grupos. Na tabela 29, para a mesma combinação de perfis analisada pelo MLE, os resultados não se mostram adequados ao uso devido à influência, mesmo que pequena, que a flambagem local exerce utilizando esse método.

Tabela 29 - Treliça da otimização dimensional, geométrica e de pórticos em PFF livre – Método da Seção Efetiva aplicado no Método da Largura Efetiva

	Características Geométricas				Flambagem Global		Flambagem Local			Força	
	Perfil	A (cm ²)	L (m)	$\lambda \leq 200$	N _e (kN)	χ	λ_p AA	λ_p AL	A _{ef} /A	N _{cRd} (kN)	N _{cSd} (kN)
Grupo 1	175x84x2,65	8,86	5,00	187,83	48,62	0,193	0,507	0,740	0,976	34,69	35,49
Grupo 2	131x57x2,00	4,77	2,67	149,47	40,84	0,300	0,627	0,824	0,951	28,38	29,76
Grupo 3	71x42x1,20	1,81	2,67	196,28	7,54	0,146	0,392	0,715	0,983	5,42	5,50
Grupo 4	50x29x1,20	1,25	1,85	198,43	6,26	0,176	0,308	0,528	1,000	4,57	3,87
Grupo 5	133x60x1,50	3,72	3,73	197,03	17,21	0,162	0,635	0,869	0,935	11,77	12,53

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

A treliça otimizada adequada de acordo com o MLE, seguindo espaçamento de pórticos, altura e os mesmos índices dos componentes secundários, está representada na Tabela 30, junto com a do método MSE, para comparação. Na Tabela 31, que mostra os efeitos de flambagem global e flambagem local, se nota a escolha por alternativas com

pequenas mudanças na geometria do perfis, que anulam ou diminuem os efeitos da flambagem local. Quanto ao resultado pela massa da estrutura, a diferença é ínfima.

Tabela 30 – Comparação para PFF livre em otimização dimensional, geométrica e de pórticos entre Método da Seção Efetiva e Método da Largura Efetiva

Perfil Formado a Frio Livre	Método da Seção Efetiva (MSE)		Método da Largura Efetiva (MLE)	
Altura treliça (m)	2,77		2,77	
Nº de pórticos	17		17	
Espaçamento pórticos (m)	3,00		3,00	
Massa total (kg)	9987,71		10024,11	
	Perfil	Massa (kg)	Perfil	Massa (kg)
Treliça - grupo 1	175x84x2,65	1 un.	141x82x3,00	1 un.
Treliça - grupo 2	131x57x2,00	197,22	112x56x2,25	199,56
Treliça - grupo 3	71x42x1,20	Total	73x42x1,20	Total
Treliça - grupo 4	50x29x1,20	3352,66	50x29x1,20	3392,57
Treliça - grupo 5	133x60x1,50	(33,57%)	85x58x2,00	(33,83%)
Telhas	3	4696,02 (47,02%)	3	4696,02 (46,83%)
Terças	155x41x2,00	1389,51 (13,91%)	155x41x2,00	1389,51 (13,86%)
Tirantes	1	325,27 (3,26%)	1	325,27 (3,24%)
Contraventamento	2	224,25 (2,25%)	2	224,25 (2,24%)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

Tabela 31 – Treliça da otimização dimensional, geométrica e de pórticos em PFF livre – Método da Largura Efetiva

	Características Geométricas				Flambagem Global		Flambagem Local			Força	
	Perfil	A (cm ²)	L (m)	$\lambda \leq 200$	N _e (kN)	χ	λ_p AA	λ_p AL	A _{ef} /A	N _{cRd} (kN)	N _{cSd} (kN)
Grupo 1	141x82x3,00	8,85	5,00	189,55	48,65	0,193	0,352	0,631	1,000	35,55	35,46
Grupo 2	112x56x2,25	4,87	2,67	150,13	41,54	0,299	0,466	0,710	0,987	29,95	29,80
Grupo 3	73x42x1,20	1,84	2,67	196,68	7,78	0,149	0,408	0,722	0,981	5,58	5,50
Grupo 4	50x29x1,20	1,25	1,85	198,43	6,26	0,176	0,308	0,528	1,000	4,57	3,87
Grupo 5	85x58x2,00	3,89	3,73	197,89	17,30	0,156	0,323	0,605	1,000	12,64	12,52

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada a otimização de uma estrutura treliçada padrão em perfil de aço dobrado a frio para a cobertura de edifícios industriais, sendo dividida em perfis tabelados e perfis de dimensões livres, para efeito de comparação entre si e entre perfis laminados, amplamente usados na construção civil. Foram apresentadas dois níveis de otimização, sendo o primeiro apenas a nível dimensional e o segundo utilizando otimizações dimensional, geométrica e do distanciamento entre pórticos, envolvendo assim mais variáveis, além de uma breve diferenciação dos resultados utilizando o Método da Seção Efetiva e o Método da Largura Efetiva.

A otimização, feita pelo *Search Group Algorithm (SGA)*, segue os princípios dos algoritmos evolutivos genéticos na busca por uma solução satisfatória cumprindo as determinações das normas de carregamento e dimensionamento, destacando-se, ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, ABNT NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios e ABNT NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações. Além disto, foram adotadas indicações e simplificações de referências consagradas, descritas ao longo do processo.

Quanto a comparação entre os perfis formados a frio apresentados pela norma ABNT NBR 6355:2012 – Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização e os perfis de dimensões livres, pode-se observar uma vantagem do segundo grupo devido ao uso de dimensões precisas que atendem as necessidades nos limites permitidos. Em ambos os casos, os perfis utilizados tendem a ser mais finos, utilizando a espessura mínima de 1,20 mm nos perfis livres quando possível, balanceando as características geométricas necessárias para atender à solicitação através das larguras da alma e das mesas que se especificam em milímetros.

Na análise utilizando o Método da Largura Efetiva, as diferenças foram irrelevantes no peso final encontrado para a estrutura do telhado quando comparado com o Método da Seção Efetiva. Para o MLE, houve uma pequena consideração da flambagem local, enquanto que para o MSE, esse efeito foi nulo. Esse pequeno ou nulo efeito da flambagem local é devido ao comprimento das barras na geometria da treliça adotada, que tem sua verificação de resistência à compressão limitadas pelo índice de esbeltez e efeitos da flambagem global.

Outro ponto importante é a otimização do perfil das telhas, responsável por quase metade do peso da cobertura, e a relação delas com as terças e o distanciamento dos pórticos. Utilizando um menor distanciamento entre pórticos, tende-se a aumentar o peso

deste elemento na soma final, pois um número maior de pórticos são necessários para totalizar o comprimento do galpão, e embora esta mudança permita o uso de perfis mais leves para os pórticos, essa relação não é proporcional, resultando no aumento de peso deste elemento. No entanto, o menor distanciamento entre pórticos permite a escolha de perfis mais leves para as terças, assim como o espaçamento entre terças permite o uso de telhas de menor espessura e, ao se comparar o conjunto, a solução se torna consideravelmente mais leve.

Segundo os resultados, é possível notar uma vantagem do uso de perfis de aço dobrado a frio em relação ao uso de perfis laminados, principalmente para distanciamentos menores, como pode ser visto quando a altura da treliça e o afastamento entre pórticos entram como variáveis na função. Apesar dessa vantagem estar sendo atribuída à massa resultante de aço, é um bom indicativo que em determinadas condições, essa pode ser uma alternativa viável. Mais estudos devem ser direcionados à essa comparação, com diferentes formatos de treliça, vão livre e com composição de preços, para assim se ter melhores dados e verificar os resultados quando se atrelam os custos adicionais de mão de obra necessário para as dobras dos perfis, e demais atividades, ao custo total da obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14514: Telhas de aço revestido de seção trapezoidal – requisitos.** Rio de Janeiro, 2008.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – procedimento.** Rio de Janeiro, 2010.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações.** Rio de Janeiro, 1988.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6355: Perfis de aço formados a frio – Padronização.** Rio de Janeiro, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.** Rio de Janeiro, 2008.

ADELI, H.; SARMA, K. C. **Cost optimization of structures: fuzzy logic, genetic algorithms, and parallel computing.** New Jersey, USA: John Wiley and Sons, 2009.

AISI - AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **S100: North American specification for the design of cold-formed steel structural members,** 2016.

ALVES, G. P. **Otimização dimensional, geométrica e topológica de uma torre de linha de transmissão considerando diversos heurísticos.** Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2018.

ARORA, J. S. **Introduction to optimum design.** 3. ed. San Diego, USA: Elsevier, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO METÁLICA. **Manual técnico: telhas de aço.** São Paulo: ABCEM, 2009.

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

BATISTA, E. M. Local-global buckling interaction procedures for the design of cold-formed columns: effective width and Direct Method integrated approach. **Thin-Walled Structures** v. 47, n. 11, p. 1218-1231, 2009.

BELLEI, I. H. **Edifícios industriais em aço – projeto e cálculo.** 5. ed. São Paulo: PINI, 2004.

BLESSMANN, J. **Acidentes causados pelo vento.** 5. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1986.

CARVALHO, P. R. M.; GRIGOLETTI, G.; BARBOSA, G. D. **Curso básico de perfis de aço formados a frio**. 3 ed. Porto Alegre: [s. n.], 2014.

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

DASGUPTA, D.; MICHALEWICZ, Z. (eds.). **Evolutionary Algorithms in Engineering Applications**, Springer Verlag, 1997.

DEB, K.; GULATI, S. Design of truss-structures for minimum weight using genetic algorithms. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 37, p. 447-465, 2016.

DOMINGUEZ, A.; STIHARU, I.; SEDAGHATI, R. Practical design optimization of truss structures using the genetic algorithms. **Research in Engineering Design**, v. 17, p. 73-84, 2006.

FLÔR, M. I. **Otimização de Coberturas em Aço de Edifícios Industriais**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015

GENNERT, M. A.; YUILLE, A. L. Determining the optimal weights in multiple objective function optimization. **Second international conference on computer vision**, Institute of Electrical and Electronics Engineers, p. 87–89, 1988.

GERDAU. **Catálogo Barras e perfis – tabela de bolso**. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/download/file/320?download=320>>. Acesso em: 01 de julho de 2020.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

GONÇALVES, M. S.; LOPEZ, R. H.; MIGUEL, L. F. F. Search group algorithm: a new metaheuristic method for the optimization of truss structures. **Computers & Structures** v. 153, p. 165-184, 2015.

HAFTKA, R. T.; GÜRDAL, Z. **Elements of Structural Optimization**. Blacksburg, USA: Kluwer Academic Publishers, 1991.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. Vol. 1.

INSTITUTO AÇO BRASIL – CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. PRAVIA, Z. M. C. (rev.); DREHMER, G. A.; MESACASA JÚNIOR, E. **Galpões para usos gerais**. 4. ed. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2010.

INSTITUTO AÇO BRASIL – CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. SILVA, E. L.; PIERIN, I.; SILVA, V. P. **Estruturas compostas por perfis formados a frio – dimensionamento pelo Método das Larguras Efetivas e aplicação conforme ABNT 14762:2010 e ABNT NBR 6355:2012**. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. PINHO, F. O.; PENNA, F. **Viabilidade econômica**. Rio de Janeiro: ICS/CBCA, 2008.

JAVARONI, C. E. **Perfis de aço conformados a frio submetidos à flexão: análise teórico-experimental**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

KUMAR, R. Cost optimization of industrial building using genetic algorithm. **International Journal of Scientific Engineering and Technology**, v. 2, p. 185-191, 2013.

LOPEZ, R. H.; MIGUEL, L. F. F. **Introdução à otimização estrutural**. Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

MADEIRA, A. R. **Estrutura em aço para pavilhão industrial: comparação entre soluções com elementos treliçados e de alma cheia**. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

MIGUEL, L. F. F.; LOPEZ, R. H.; MIGUEL, L. F. Multimodal size, shape, and topology optimization of truss structures using the firefly algorithm. **Advances in Engineering Software** v. 56, p. 23–37, 2013.

NETO, A. C. **Estruturas metálicas II: notas de aula**. Pontífice Universidade Católica. 2007.

NOBRE, G. J. G.; RABELO, R. J. **Projeto de estruturas de aço em chapa dobrada a frio pelo Método dos Estados Limites segundo o AISI/2007-LRFD**. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

NOGUEIRA, G. S. **Avaliação de soluções estruturais para galpões compostos por perfis de aço formados a frio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2009.

PEDERSEN, P. **Optimal designs – structures and materials – problems and tools**. Department of Mechanical Engineering, Solid Mechanics, Technical University of Denmark, 2003.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PINHEIRO, A. C. da F. B. **Estruturas metálicas: cálculos, detalhes, exercícios e projetos**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

RAJAN, S. D. Sizing, shape, and topology design optimization of trusses using genetic algorithm. **Journal of Structural Engineering**, v. 121, n. 10, p. 1480-1487, 1995.

RAJEEV, S.; KRISHNAMOORTHY, C. S. Discrete optimization of structures using genetic algorithms. **Journal of Structural Engineering**, v. 118, n. 5, p. 1233-1250, 1992.

Ravindran, A.; Ragsdell, K. M.; Reklaitis, G. V. **Engineering optimization: methods and applications**. 2. ed. New Jersey, USA: John Wiley and Sons, 2006.

ROMAN, R. R. **Otimização de Coberturas Metálicas de Edifícios Industriais**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.

SANTOS, W. S. **Interação flambagem global-flambagem local em pilares metálicos de seção I duplamente simétricos sob compressão uniforme**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2002.

SCHAFER, B. W. Local distortional and Euler buckling of thin-walled columns. **Journal of Structural Engineering**, v. 128, n. 3, p. 289-299, 2002.

SCHAFER, B. W.; PEKÖZ, T. Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions. In: Shanmugan, N. E.; Liew, J. Y. R.; Thevendran, V. (eds.). **Thin-Walled Structures, Research and Development** v. 16, p. 137-144, 1998.

SILVA, F. E. C. **Otimização dimensional, de forma e topológica de estruturas treliçadas utilizando um algoritmo híbrido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

SMITH, J. C. **Structural steel design: LRFD approach**. 2. ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 1996.

SONMEZ, M. Discrete optimum design of truss structures using artificial bee colony algorithm. **Structural Multidisciplinary Optimization**, v. 43, p. 85–97, 2011.

SORIANO, H. L. **Análise de estruturas: formulação matricial e implementação computacional**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2005.

STOLPE, M. **On models and methods for global optimization of structural topology**. Thesis (Doctoral) - Department of Mathematics, Royal Institute of Technology. Stockholm, 2003.

Timoshenko, S.P.; Gere, J.M. **Theory of Elastic Stability**. 2. ed. New York, USA: McGraw-Hill, 1961.

WU, S.-J.; CHOW, P.-T. Steady-state genetic algorithms for discrete optimization of trusses. **Computers & Structures**, v. 56, n. 6, p. 979-991, 1995.

Yu, W.W.; LABOUBE, R. A. **Cold formed steel design**. 4. ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2010.

APÊNDICE A

PROPRIEDADES DOS PERFIS ADOTADOS

Tabela 32 – Perfil formado a frio U simples – Dimensões, massas e propriedades geométricas

Perfil		Dimensões						Eixo x					Eixo y					
Índice	U	m (kg/m)	A (cm ²)	b _w (mm)	b _f (mm)	t (mm)	r _i (mm)	I _x (cm ⁴)	W _x (cm ³)	r _x (cm)	X _g (cm)	x ₀ (cm)	I _y (cm ⁴)	W _y (cm ³)	r _y (cm)	J (cm ⁴)	C _w (cm ⁶)	r ₀ (cm)
1	U 50x25x1,20	0,90	1,15	50	25	1,20	1,20	4,54	1,82	1,99	0,68	1,54	0,72	0,39	0,79	0,006	3,03	2,63
2	U 50x25x1,50	1,12	1,43	50	25	1,50	1,50	5,54	2,21	1,97	0,69	1,53	0,88	0,49	0,78	0,011	3,67	2,61
3	U 75x40x1,20	1,42	1,81	75	40	1,20	1,20	16,67	4,44	3,03	1,09	2,53	2,97	1,02	1,28	0,009	28,54	4,15
4	U 50x25x2,00	1,47	1,87	50	25	2,00	2,00	7,07	2,83	1,95	0,72	1,52	1,13	0,63	0,78	0,025	4,64	2,59
5	U 50x25x2,25	1,64	2,08	50	25	2,25	2,25	7,79	3,12	1,93	0,73	1,51	1,25	0,70	0,77	0,035	5,09	2,57
6	U 100x40x1,20	1,66	2,11	100	40	1,20	1,20	32,33	6,47	3,91	0,94	2,27	3,25	1,06	1,24	0,010	56,25	4,69
7	U 75x40x1,50	1,77	2,25	75	40	1,50	1,50	20,50	5,47	3,02	1,10	2,52	3,67	1,27	1,28	0,017	34,98	4,14
8	U 100x50x1,20	1,85	2,35	100	50	1,20	1,20	38,19	7,64	4,03	1,30	3,10	5,99	1,62	1,60	0,011	102,97	5,33
9	U 50x25x2,65	1,90	2,42	50	25	2,65	2,65	8,85	3,54	1,91	0,75	1,50	1,42	0,81	0,77	0,057	5,75	2,55
10	U 100x40x1,50	2,06	2,63	100	40	1,50	1,50	39,88	7,98	3,90	0,96	2,26	4,01	1,32	1,24	0,020	69,11	4,67
11	U 125x50x1,20	2,08	2,65	125	50	1,20	1,20	63,82	10,21	4,91	1,16	2,85	6,40	1,67	1,55	0,013	174,04	5,88
12	U 50x25x3,00	2,12	2,70	50	25	3,00	3,00	9,73	3,89	1,90	0,77	1,50	1,57	0,91	0,76	0,081	6,27	2,53
13	U 100x50x1,50	2,30	2,93	100	50	1,50	1,50	47,15	9,43	4,01	1,32	3,09	7,41	2,01	1,59	0,022	126,77	5,31
14	U 75x40x2,00	2,33	2,97	75	40	2,00	2,00	26,60	7,09	2,99	1,13	2,51	4,78	1,66	1,27	0,040	45,13	4,11
15	U 125x50x1,50	2,57	3,30	125	50	1,50	1,50	78,93	12,63	4,89	1,18	2,84	7,92	2,07	1,55	0,025	214,57	5,86
16	U 75x40x2,25	2,61	3,32	75	40	2,25	2,25	29,52	7,87	2,98	1,14	2,51	5,32	1,86	1,27	0,056	49,94	4,10
17	U 100x40x2,00	2,72	3,47	100	40	2,00	2,00	51,99	10,40	3,87	0,98	2,25	5,23	1,73	1,23	0,046	89,52	4,64
18	U 75x40x2,65	3,04	3,88	75	40	2,65	2,65	34,01	9,07	2,96	1,16	2,50	6,15	2,16	1,26	0,091	57,28	4,07
19	U 100x50x2,00	3,04	3,87	100	50	2,00	2,00	61,59	12,32	3,99	1,34	3,08	9,71	2,65	1,58	0,052	164,78	5,28
20	U 100x40x2,25	3,05	3,88	100	40	2,25	2,25	57,82	11,56	3,86	0,99	2,25	5,82	1,93	1,22	0,065	99,25	4,63
21	U 100x50x2,25	3,40	4,33	100	50	2,25	2,25	68,57	13,71	3,98	1,35	3,07	10,82	2,97	1,58	0,073	183,02	5,27
22	U 75x40x3,00	3,42	4,35	75	40	3,00	3,00	37,79	10,07	2,94	1,17	2,49	6,85	2,42	1,25	0,130	63,34	4,06
23	U 125x50x2,00	3,43	4,37	125	50	2,00	2,00	103,38	16,54	4,86	1,20	2,83	10,39	2,73	1,54	0,058	279,58	5,83

Tabela 32 (continuação)

Perfil		Dimensões						Eixo x					Eixo y					
Índice	U	m (kg/m)	A (cm ²)	b _w (mm)	b _f (mm)	t (mm)	r _i (mm)	I _x (cm ⁴)	W _x (cm ³)	r _x (cm)	X _g (cm)	x ₀ (cm)	I _y (cm ⁴)	W _y (cm ³)	r _y (cm)	J (cm ⁴)	C _w (cm ⁶)	r ₀ (cm)
24	U 100x40x2,65	3,56	4,54	100	40	2,65	2,65	66,87	13,37	3,84	1,01	2,24	6,74	2,25	1,22	0,106	114,20	4,61
25	U 75x40x3,35	3,79	4,82	75	40	3,35	3,35	41,34	11,02	2,93	1,19	2,48	7,82	2,68	1,25	0,180	69,09	4,04
26	U 150x50x2,00	3,82	4,87	150	50	2,00	2,00	158,88	21,18	5,71	1,09	2,62	10,93	2,79	1,50	0,065	430,47	6,46
27	U 125x50x2,25	3,84	4,90	125	50	2,25	2,25	115,26	18,44	4,85	1,21	2,82	11,59	3,06	1,54	0,083	310,91	5,82
28	U 100x50x2,65	3,98	5,07	100	50	2,65	2,65	79,42	15,88	3,96	1,37	3,07	12,57	3,46	1,57	0,119	211,18	5,25
29	U 100x40x3,00	4,01	5,10	100	40	3,00	3,00	74,48	14,90	3,82	1,02	2,23	7,52	2,53	1,21	0,153	126,66	4,59
30	U 75x40x3,75	4,20	5,35	75	40	3,75	3,75	45,23	12,06	2,91	1,21	2,48	8,26	2,96	1,24	0,251	75,27	4,02
31	U 150x50x2,25	4,28	5,46	150	50	2,25	2,25	177,32	23,64	5,70	1,10	2,61	12,20	3,13	1,49	0,092	479,10	6,44
32	U 100x40x3,35	4,44	5,66	100	40	3,35	3,35	51,53	16,37	3,80	1,04	2,22	8,27	2,79	1,21	0,212	138,56	4,57
33	U 100x50x3,00	4,48	5,70	100	50	3,00	3,00	88,60	17,72	3,94	1,39	3,06	14,05	3,89	1,57	0,171	234,81	5,23
34	U 125x50x2,65	4,50	5,73	125	50	2,65	2,65	133,80	21,41	4,83	1,23	2,81	13,47	3,57	1,53	0,134	359,45	5,80
35	U 200x50x2,00	4,61	5,87	200	50	2,00	2,00	317,32	31,73	7,35	0,92	2,28	11,74	2,88	1,41	0,078	848,40	7,83
36	U 75x40x4,25	4,71	5,99	75	40	4,25	4,25	49,81	13,28	2,88	1,23	2,47	9,14	3,30	1,23	0,361	82,46	3,99
37	U 100x40x3,75	4,94	6,29	100	40	3,75	3,75	89,89	17,98	3,79	1,06	2,21	9,09	3,09	1,20	0,294	151,48	4,54
38	U 100x50x3,35	4,97	6,33	100	50	3,35	3,35	97,48	19,50	3,92	1,41	3,05	15,49	4,31	1,56	0,237	257,51	5,21
39	U 100x75x2,65	5,02	6,39	100	75	2,65	2,65	110,82	22,16	4,16	2,38	5,27	38,21	7,47	2,44	0,150	645,05	7,15
40	U 150x50x2,65	5,02	6,39	150	50	2,65	2,65	206,17	27,49	5,68	1,12	2,60	14,18	3,65	1,49	0,150	554,61	6,42
41	U 125x50x3,00	5,07	6,45	125	50	3,00	3,00	149,55	23,93	4,81	1,24	2,80	15,07	4,01	1,53	0,193	400,35	5,78
42	U 200x50x2,25	5,17	6,58	200	50	2,25	2,25	354,62	35,46	7,34	0,93	2,28	13,11	3,22	1,41	0,111	945,18	7,81
43	U 75x40x4,75	5,20	6,62	75	40	4,75	4,75	54,07	14,42	2,86	1,26	2,46	9,97	3,64	1,23	0,497	89,06	3,96
44	U 100x50x3,75	5,52	7,04	100	50	3,75	3,75	107,26	21,45	3,90	1,42	3,04	17,09	4,78	1,56	0,330	282,34	5,19
45	U 100x40x4,25	5,54	4,06	100	40	4,25	4,25	99,49	19,90	3,75	1,08	2,20	10,08	3,45	1,20	0,424	166,66	4,51
46	U 125x75x2,65	5,54	7,06	125	75	2,65	2,65	183,39	29,34	5,10	2,17	4,92	41,25	7,74	2,42	0,165	1090,88	7,49

Tabela 32 (continuação)

Perfil		Dimensões						Eixo x					Eixo y					
Índice	U	m (kg/m)	A (cm ²)	b _w (mm)	b _f (mm)	t (mm)	r _i (mm)	I _x (cm ⁴)	W _x (cm ³)	r _x (cm)	X _g (cm)	x ₀ (cm)	I _y (cm ⁴)	W _y (cm ³)	r _y (cm)	J (cm ⁴)	C _w (cm ⁶)	r ₀ (cm)
47	U 125x50x3,35	5,63	7,17	125	50	3,35	3,35	164,87	26,38	4,80	1,26	2,80	16,62	4,45	1,52	0,268	439,81	5,76
48	U 100x75x3,00	5,66	7,20	100	75	3,00	3,00	123,88	24,78	4,15	2,40	5,26	42,85	8,40	2,44	0,216	719,59	7,13
49	U 150x50x3,00	5,66	7,20	150	50	3,00	3,00	230,76	30,77	5,66	1,13	2,59	15,87	4,10	1,48	0,216	618,42	6,40
50	U 150x75x2,65	6,06	7,72	150	75	2,65	2,65	278,09	37,08	6,00	2,00	4,63	43,77	7,95	2,38	0,181	1677,77	7,94
51	U 200x50x2,65	6,06	7,72	200	50	2,65	2,65	413,21	41,32	7,32	0,95	2,27	15,27	3,76	1,41	0,181	1095,90	7,79
52	U 100x40x4,75	6,13	7,81	100	40	4,75	4,75	108,55	21,71	3,73	1,10	2,19	11,02	3,80	1,19	0,587	180,78	4,48
53	U 100x50x4,25	6,21	7,91	100	50	4,25	4,25	118,97	23,79	3,88	1,45	3,03	19,01	5,35	1,55	0,476	311,79	5,16
54	U 125x75x3,00	6,24	7,95	125	75	3,00	3,00	205,37	32,86	5,08	2,19	4,92	46,29	8,72	2,41	0,238	1218,99	7,47
55	U 125x50x3,75	6,26	7,98	125	50	3,75	3,75	181,85	29,10	4,78	1,28	2,79	18,35	4,93	1,52	0,373	483,18	5,73
56	U 100x75x3,35	6,28	8,01	100	75	3,35	3,35	136,59	27,32	4,13	2,42	5,26	47,40	9,33	2,43	0,299	791,79	7,11
57	U 150x50x3,35	6,28	8,01	150	50	3,35	3,35	254,76	33,97	5,64	1,15	2,58	17,52	4,55	1,48	0,299	680,15	6,38
58	U 150x75x3,00	6,83	8,70	150	75	3,00	3,00	311,80	41,57	5,99	2,01	4,62	49,14	8,96	2,38	0,261	1876,92	7,92
59	U 200x50x3,00	6,83	8,70	200	50	3,00	3,00	463,39	46,34	7,30	0,96	2,26	17,07	4,23	1,40	0,261	1223,68	7,77
60	U 100x50x4,75	6,88	8,76	100	50	4,75	4,75	130,09	26,02	3,85	1,47	3,02	20,86	5,91	1,54	0,658	339,43	5,13
61	U 125x75x3,35	6,94	8,84	125	75	3,35	3,35	226,84	36,29	5,06	2,21	4,91	51,25	9,68	2,41	0,330	1343,56	7,45
62	U 100x75x3,75	7,00	8,91	100	75	3,75	3,75	150,69	30,14	4,11	2,44	5,25	52,49	10,37	2,43	0,417	871,49	7,10
63	U 150x50x3,75	7,00	8,91	150	50	3,75	3,75	281,45	37,53	5,62	1,16	2,57	19,35	5,04	1,47	0,417	748,21	6,35
64	U 125x50x4,25	7,04	8,97	125	50	4,25	4,25	202,28	32,37	4,75	1,30	2,77	20,44	5,53	1,51	0,539	534,87	5,70
65	U 200x75x2,65	7,10	9,04	200	75	2,65	2,65	542,22	54,22	7,74	1,72	4,14	47,70	8,26	2,30	0,211	3312,18	9,07
66	U 150x75x3,35	7,60	9,68	150	75	3,35	3,35	344,82	45,98	5,97	2,03	4,61	54,42	9,95	2,37	0,362	2071,06	7,91
67	U 200x50x3,35	7,60	9,68	200	50	3,35	3,35	512,58	51,26	7,25	0,98	2,25	18,85	4,68	1,40	0,326	1347,72	7,74
68	U 125x75x3,75	7,73	9,85	125	75	3,75	3,75	250,76	40,12	5,05	2,22	4,90	56,79	10,77	2,40	0,461	1481,66	7,43
69	U 125x50x4,75	7,81	9,95	125	50	4,75	4,75	221,87	35,50	4,72	1,32	2,76	22,45	6,11	1,50	0,747	583,83	5,67

Tabela 32 (continuação)

Perfil		Dimensões						Eixo x					Eixo y					
Índice	U	m (kg/m)	A (cm ²)	b _w (mm)	b _f (mm)	t (mm)	r _i (mm)	I _x (cm ⁴)	W _x (cm ³)	r _x (cm)	X _g (cm)	x ₀ (cm)	I _y (cm ⁴)	W _y (cm ³)	r _y (cm)	J (cm ⁴)	C _w (cm ⁶)	r ₀ (cm)
70	U 100x75x4,25	7,87	10,03	100	75	4,25	4,25	167,67	33,53	4,09	2,46	5,24	58,68	11,66	2,42	0,603	966,96	7,07
71	U 150x50x4,25	7,87	10,03	150	50	4,25	4,25	313,74	41,83	5,59	1,19	2,56	21,57	5,66	1,47	0,603	829,62	6,32
72	U 100x40x6,30	7,88	10,04	100	40	6,30	6,30	133,35	26,67	3,65	1,18	2,15	13,60	4,82	1,16	1,326	218,30	4,39
73	U 200x75x3,00	8,01	10,20	200	75	3,00	3,00	608,93	60,89	7,72	1,74	4,13	53,58	9,30	2,27	0,306	3710,53	9,05
74	U 200x100x2,65	8,14	10,37	200	100	2,65	2,65	671,23	67,13	8,05	2,62	6,19	105,35	14,28	3,19	0,242	7230,50	10,64
75	U 150x75x3,75	8,47	10,79	150	75	3,75	3,75	381,72	50,90	5,95	2,05	4,60	60,35	11,07	2,37	0,505	2286,90	7,88
76	U 200x50x3,75	8,47	10,79	200	50	3,75	3,75	567,56	56,76	7,25	0,99	2,24	20,83	5,20	1,39	0,505	1484,95	7,72
77	U 125x75x4,25	8,71	11,09	125	75	4,25	4,25	279,74	44,76	5,02	2,25	4,89	63,56	12,10	2,39	0,667	1648,01	7,41
78	U 100x75x4,75	8,74	11,13	100	75	4,75	4,75	183,96	36,79	4,06	2,49	5,23	64,69	12,91	2,41	0,836	1057,95	7,05
79	U 150x50x4,75	8,74	11,13	150	50	4,75	4,75	344,84	45,98	5,57	1,21	2,55	23,70	6,25	1,46	0,836	907,06	6,29
80	U 100x50x6,30	8,87	11,30	100	50	6,30	6,30	161,01	32,20	3,78	1,55	2,99	26,07	7,55	1,52	1,493	414,74	5,05
81	U 200x75x3,35	8,91	11,36	200	75	3,35	3,35	674,51	67,45	7,71	1,75	4,12	59,37	10,33	2,27	0,424	4100,12	9,03
82	U 250x100x2,65	9,18	11,69	250	100	2,65	2,65	1122,57	89,81	9,80	2,34	5,69	112,63	14,70	3,10	0,273	12228,31	11,75
83	U 200x100x3,00	9,19	11,70	200	100	3,00	3,00	754,46	75,45	8,03	2,64	6,18	118,54	16,10	3,18	0,351	8113,14	10,62
84	U 150x75x4,25	9,54	12,16	150	75	4,25	4,25	426,60	56,88	5,92	2,07	4,59	67,58	12,45	2,36	0,731	2547,82	7,86
85	U 200x50x4,25	9,54	12,16	200	50	4,25	4,25	634,48	63,45	7,22	1,02	2,23	23,23	5,83	1,38	0,731	1649,85	7,69
86	U 125x75x4,75	9,67	12,32	125	75	4,75	4,75	307,72	49,24	5,00	2,27	4,88	70,14	13,42	2,39	0,926	1807,54	7,38
87	U 200x75x3,75	9,94	12,66	200	75	3,75	3,75	748,10	74,81	7,69	1,77	4,11	65,87	11,50	2,28	0,593	4534,78	9,01
88	U 125x50x6,30	10,10	12,87	125	50	6,30	6,30	277,25	44,36	4,64	1,40	2,73	28,16	7,81	1,48	1,701	719,09	5,58
89	U 300x100x2,65	10,22	13,02	300	100	2,65	2,65	1720,72	114,71	11,50	2,11	5,27	118,43	15,02	3,02	0,304	18787,48	13,00
90	U 200x100x3,35	10,23	13,03	200	100	3,35	3,35	836,45	83,64	8,01	2,65	6,17	131,57	17,91	3,18	0,487	8979,48	10,60
91	U 250x100x3,00	10,37	13,20	250	100	3,00	3,00	1262,96	101,04	9,78	2,36	5,68	126,77	16,58	3,10	0,396	13732,54	11,73
92	U 150x75x4,75	10,60	13,51	150	75	4,75	4,75	740,11	62,68	5,90	2,09	4,58	74,63	13,81	2,35	1,015	2799,05	7,83

Tabela 32 (continuação)

Perfil		Dimensões						Eixo x					Eixo y					
Índice	U	m (kg/m)	A (cm ²)	b _w (mm)	b _f (mm)	t (mm)	r _i (mm)	I _x (cm ⁴)	W _x (cm ³)	r _x (cm)	X _g (cm)	x ₀ (cm)	I _y (cm ⁴)	W _y (cm ³)	r _y (cm)	J (cm ⁴)	C _w (cm ⁶)	r ₀ (cm)
93	U 200x50x4,75	10,60	13,51	200	50	4,75	4,75	699,39	69,94	7,20	1,04	2,21	25,56	6,45	1,38	1,015	1807,54	7,65
94	U 200x75x4,25	11,21	14,28	200	75	4,25	4,25	838,04	83,80	7,66	1,79	4,10	73,83	12,94	2,27	0,859	5026,47	8,98
95	U 100x75x6,30	11,34	14,45	100	75	6,30	6,30	230,15	46,03	3,99	2,57	5,21	82,13	16,67	2,38	1,909	1312,73	6,98
96	U 150x50x6,30	11,34	14,45	150	50	6,30	6,30	433,86	57,85	5,48	1,28	2,51	29,80	8,01	1,44	1,909	1123,08	6,20
97	U 200x100x3,75	11,41	14,54	200	100	3,75	3,75	928,63	92,86	7,99	2,67	6,16	146,24	19,96	3,17	0,681	9949,85	10,58
98	U 250x100x3,35	11,54	14,71	250	100	3,35	3,35	1401,53	112,12	9,76	2,37	5,67	140,74	18,45	3,09	0,550	15211,69	11,71
99	U 300x100x3,00	11,54	14,70	300	100	3,00	3,00	1937,22	129,15	11,48	2,13	5,26	133,32	16,97	3,01	0,441	21110,31	12,98
100	U 200x75x4,75	12,47	15,88	200	75	4,75	4,75	925,74	92,57	7,63	1,82	4,09	81,59	14,36	2,27	1,193	5573,07	8,95
101	U 125x75x6,30	12,58	16,02	125	75	6,30	6,30	388,20	62,11	4,92	2,35	4,85	89,36	17,35	2,36	2,117	2260,41	7,30
102	U 300x100x3,35	12,86	16,38	300	100	3,35	3,35	2151,24	143,42	11,46	2,15	5,25	148,04	18,85	3,01	0,612	23397,20	12,96
103	U 200x100x4,25	12,88	16,41	200	100	4,25	4,25	1041,61	104,16	7,97	2,70	6,15	164,29	22,49	3,16	0,987	11133,57	10,55
104	U 250x100x3,75	12,88	16,41	250	100	3,75	3,75	1557,70	124,62	9,74	2,39	5,66	156,50	20,56	3,09	0,769	16871,78	11,68
105	U 150x75x6,30	13,81	17,60	150	75	6,30	6,30	596,48	79,53	5,82	2,17	4,55	95,30	17,87	2,33	2,326	3518,53	7,75
106	U 200x50x6,30	13,81	17,60	200	50	6,30	6,30	888,08	88,81	7,10	1,11	2,18	32,30	8,27	1,35	2,326	2252,32	7,55
107	U 100x75x8,00	13,83	17,62	100	75	8,00	12,00	266,67	53,33	3,89	2,70	5,22	97,33	20,30	2,35	3,756	1547,82	6,92
108	U 150x50x8,00	13,83	17,62	150	50	8,00	12,00	503,31	67,11	5,34	1,38	2,50	35,23	9,72	1,41	3,756	1320,98	6,07
109	U 200x100x4,75	14,33	18,26	200	100	4,75	4,75	1152,09	115,21	7,94	2,72	6,14	182,00	25,00	3,16	1,372	12285,30	10,53
110	U 300x100x3,75	14,36	18,29	300	100	3,75	3,75	2392,81	159,52	11,44	2,16	5,24	164,65	21,01	3,00	0,856	25967,19	12,93
111	U 250x100x4,25	14,55	18,53	250	100	4,25	4,25	1749,62	139,97	9,72	2,41	5,65	175,89	23,18	3,08	1,115	18901,83	11,65
112	U 125x75x8,00	15,40	19,62	125	75	8,00	12,00	455,07	72,81	4,82	2,47	4,86	106,87	21,25	2,33	4,182	2688,83	7,23
113	U 250x100x4,75	16,20	20,63	250	100	4,75	4,75	1937,89	155,03	9,69	2,43	5,64	194,93	25,76	3,07	1,550	20882,49	11,62
114	U 300x100x4,25	16,22	20,66	300	100	4,25	4,25	2690,26	179,35	11,41	2,18	5,23	185,10	23,68	2,99	1,242	29114,97	12,90
115	U 200x75x6,30	16,29	20,75	200	75	6,30	6,30	1183,54	118,35	7,55	1,89	4,05	104,47	18,61	2,24	2,742	7050,81	8,86

Tabela 32 (continuação)

Perfil		Dimensões						Eixo x					Eixo y					
Índice	U	m (kg/m)	A (cm ²)	b _w (mm)	b _f (mm)	t (mm)	r _i (mm)	I _x (cm ⁴)	W _x (cm ³)	r _x (cm)	X _g (cm)	x ₀ (cm)	I _y (cm ⁴)	W _y (cm ³)	r _y (cm)	J (cm ⁴)	C _w (cm ⁶)	r ₀ (cm)
116	U 150x75x8,00	16,97	21,62	150	75	8,00	12,00	704,95	93,99	5,71	2,28	4,54	114,65	21,96	2,30	4,608	4209,87	7,65
117	U 200x50x8,00	16,97	21,62	200	50	8,00	12,00	1045,75	104,57	6,95	1,20	2,15	38,34	10,08	1,33	4,608	2668,14	7,40
118	U 300x100x4,75	18,06	23,01	300	100	4,75	4,75	2982,71	198,85	11,39	2,21	5,21	205,20	26,33	2,99	1,729	32191,74	12,87
119	U 200x100x6,30	18,76	23,90	200	100	6,30	6,30	1479,01	147,90	7,87	2,79	6,11	234,74	32,57	3,13	3,158	15657,61	10,44
120	U 200x75x8,00	20,11	25,62	200	75	8,00	12,00	1414,39	141,44	7,43	1,99	4,03	126,56	22,95	2,22	5,461	8497,13	8,74
121	U 250x100x6,30	21,23	27,05	250	100	6,30	6,30	2498,72	199,90	9,61	2,50	5,60	251,83	33,59	3,05	3,575	26716,05	11,54
122	U 250x100x6,35	21,26	27,08	250	100	6,35	9,53	2488,67	199,09	9,59	2,52	5,61	252,56	33,77	3,05	3,636	26896,67	11,52
123	U 200x100x8,00	23,25	29,62	200	100	8,00	12,00	1783,03	178,30	7,76	2,90	6,10	286,79	40,39	3,11	6,313	19025,36	10,35
124	U 300x100x6,30	23,70	30,20	300	100	6,30	6,30	3857,91	257,19	11,30	2,27	5,18	265,33	34,35	2,96	3,991	41228,31	12,78
125	U 250x100x8,00	26,39	33,62	250	100	8,00	12,00	3031,02	242,48	9,49	2,60	5,58	308,79	41,47	3,03	7,165	32599,97	11,42
126	U 300x100x8,00	29,53	37,62	300	100	8,00	12,00	4700,96	313,40	11,18	2,37	5,15	326,12	42,73	2,94	8,018	50522,51	12,66

ABNT NBR 6355:2012 – Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização

Tabela 33 – Perfil laminado cantoneira de abas iguais – Dimensões, massas e propriedades geométricas

Perfil		Dimensões						Eixo x - Eixo y				
Índice	L	m (kg/m)	A (cm ²)	b _f (pol)	b _f (mm)	t (pol)	t (mm)	I _x = I _y (cm ⁴)	W _x = W _y (cm ³)	r _x = r _y (cm)	X _g (cm)	r _z min (cm)
1	L 12,70x0,55	0,55	0,70	1/2"	12,70	1/8"	3,18	0,10	0,11	0,37	0,43	0,25
2	L 15,88x0,71	0,71	0,90	5/8"	15,88	1/8"	3,18	0,20	0,19	0,47	0,51	0,32
3	L 19,05x0,87	0,87	1,11	3/4"	19,05	1/8"	3,18	0,36	0,27	0,57	0,59	0,38
4	L 22,20x1,04	1,04	1,32	7/8"	22,20	1/8"	3,18	0,58	0,38	0,66	0,66	0,46
5	L 25,40x1,19	1,19	1,48	1"	25,40	1/8"	3,18	0,83	0,49	0,79	0,76	0,48
6	L 31,75x1,50	1,50	1,93	1.1/4"	31,75	1/8"	3,18	1,67	0,82	0,97	0,89	0,64
7	L 25,41x1,73	1,73	2,19	1"	25,41	3/16"	4,76	1,25	0,66	0,76	0,81	0,48
8	L 38,10x1,83	1,83	2,32	1.1/2"	38,10	1/8"	3,18	3,33	1,15	1,17	1,07	0,76
9	L 44,45x2,14	2,14	2,71	1.3/4"	44,45	1/8"	3,18	5,41	1,64	1,40	1,22	0,89
10	L 31,76x2,20	2,20	2,77	1.1/4"	31,76	3/16"	4,76	2,50	1,15	0,97	0,97	0,61
11	L 25,42x2,22	2,22	2,84	1"	25,42	1/4"	6,35	1,66	0,98	0,76	0,86	0,48
12	L 50,80x2,46	2,46	3,10	2"	50,80	1/8"	3,18	7,91	2,13	1,60	1,40	1,02
13	L 38,11x2,68	2,68	3,42	1.1/2"	38,11	3/16"	4,76	4,58	1,64	1,17	1,12	0,74
14	L 31,77x2,86	2,86	3,62	1.1/4"	31,77	1/4"	6,35	3,33	1,47	0,94	1,02	0,61
15	L 44,46x3,15	3,15	4,00	1.3/4"	44,46	3/16"	4,76	7,50	2,30	1,37	1,30	0,89
16	L 38,12x3,48	3,48	4,45	1.1/2"	38,12	1/4"	6,35	5,83	2,13	1,15	1,19	0,74
17	L 50,81x3,63	3,63	4,58	2"	50,81	3/16"	4,76	11,70	3,13	1,58	1,45	1,02
18	L 44,47x4,12	4,12	5,22	1.3/4"	44,47	1/4"	6,35	9,57	3,13	1,35	1,35	0,86
19	L 63,50x4,57	4,57	5,80	2.1/2"	63,50	3/16"	4,76	23,00	4,91	1,98	1,75	1,24
20	L 50,82x4,74	4,74	6,06	2"	50,82	1/4"	6,35	14,60	4,10	1,55	1,50	0,99
21	L 76,20x5,52	5,52	7,03	3"	76,20	3/16"	4,76	40,00	7,21	2,39	2,08	1,50
22	L 50,83x5,83	5,83	7,42	2"	50,83	5/16"	7,94	17,50	4,91	1,53	1,55	0,99
23	L 63,51x6,10	6,10	7,67	2.1/2"	63,51	1/4"	6,35	29,00	6,40	1,96	1,83	1,24

Tabela 33 (continuação)

Perfil		Dimensões						Eixo x - Eixo y				
Índice	L	m (kg/m)	A (cm ²)	b _f (pol)	b _f (mm)	t (pol)	t (mm)	I _x = I _y (cm ⁴)	W _x = W _y (cm ³)	r _x = r _y (cm)	X _g (cm)	r _z min (cm)
24	L 50,84x6,99	6,99	8,76	2"	50,84	3/8"	9,52	20,00	5,73	1,50	1,63	0,99
25	L 76,21x7,29	7,29	9,29	3"	76,21	1/4"	6,35	50,00	9,50	2,36	2,13	1,50
26	L 63,52x7,44	7,44	9,48	2.1/2"	63,52	5/16"	7,94	35,00	7,87	1,93	1,88	1,24
27	L 88,90x8,56	8,56	10,90	3.1/2"	88,90	1/4"	6,35	83,70	13,00	2,77	2,46	1,76
28	L 63,53x8,78	8,78	11,16	2.1/2"	63,53	3/8"	9,52	41,00	9,35	1,91	1,93	1,22
29	L 76,22x9,07	9,07	11,48	3"	76,22	5/16"	7,94	62,00	11,60	2,34	2,21	1,50
30	L 101,60x9,81	9,81	12,51	4"	101,60	1/4"	6,35	125,00	16,40	3,17	2,77	2,00
31	L 88,91x10,59	10,59	13,50	3.1/2"	88,91	5/16"	7,94	102,00	16,00	2,75	2,52	1,75
32	L 76,23x10,71	10,71	13,61	3"	76,23	3/8"	9,52	75,00	13,60	2,31	2,26	1,47
33	L 101,61x12,19	12,19	15,48	4"	101,61	5/16"	7,94	154,00	21,30	3,15	2,84	2,00
34	L 127,00x12,34	12,34	15,73	5"	127,00	1/4"	6,35	251,63	27,09	4,00	3,41	2,53
35	L 88,92x12,58	12,58	16,00	3.1/2"	88,92	3/8"	9,52	121,00	19,20	2,75	2,58	1,75
36	L 76,24x14,00	14,00	17,74	3"	76,24	1/2"	2,70	91,00	18,00	2,29	2,36	1,47
37	L 101,62x14,57	14,57	18,45	4"	101,62	3/8"	9,52	183,00	24,60	3,12	2,90	2,00
38	L 127,01x15,31	15,31	19,50	5"	127,01	5/16"	7,94	308,00	33,40	3,97	3,47	2,53
39	L 101,63x16,80	16,80	21,35	4"	101,63	7/16"	11,11	208,00	29,50	3,12	2,95	1,98
40	L 127,02x18,30	18,30	23,29	5"	127,02	3/8"	9,52	362,00	39,50	3,94	3,53	2,51
41	L 101,64x19,03	19,03	24,19	4"	101,64	1/2"	12,70	233,00	32,80	3,10	3,00	1,98
42	L 127,05x23,52	23,52	26,96	5"	127,05	7/16"	11,11	416,68	45,71	3,93	3,58	2,50
43	L 152,40x22,20	22,20	28,10	6"	152,40	3/8"	9,52	641,00	57,40	4,78	4,17	3,02
44	L 127,03x24,10	24,10	30,64	5"	127,03	1/2"	1,27	470,00	52,50	3,91	3,63	2,49
45	L 152,41x29,20	29,20	37,09	6"	152,41	1/2"	12,70	828,00	75,40	4,72	4,27	3,00
46	L 127,04x29,80	29,80	37,80	5"	127,04	5/8"	15,88	566,00	64,00	3,86	3,76	2,46

Tabela 33 (continuação)

Perfil		Dimensões						Eixo x - Eixo y				
Índice	L	m (kg/m)	A (cm ²)	b _f (pol)	b _f (mm)	t (pol)	t (mm)	I _x = I _y (cm ⁴)	W _x = W _y (cm ³)	r _x = r _y (cm)	X _g (cm)	r _z min (cm)
47	L 152,42x36,00	36,00	45,86	6"	152,42	5/8"	15,88	1007,00	93,50	4,67	4,39	2,97
48	L 152,43x42,70	42,70	54,44	6"	152,43	3/4"	19,05	1173,00	109,90	4,65	4,52	2,97
49	L 203,20x48,70	48,70	62,90	8"	203,20	5/8"	15,88	2472,40	168,90	6,31	5,66	4,01
50	L 203,21x57,90	57,90	73,81	8"	203,21	3/4"	19,05	2901,10	199,90	6,27	5,79	3,99

Fonte: Adaptado de Gerdau (2020)