

DIMENSIONAMENTO DE UMA ESTRUTURA METÁLICA AUTOPORTANTE PARA PROTENSÃO DE CORDOALHAS¹

Danrlei Bresciani²
Paulo Miguel de Toni³
Keila Daiane Ferrari Orso⁴

RESUMO

A eficiência estrutural das estruturas metálicas se mostra muito atrativa na construção de coberturas, pavilhões, hangares, e muitas outras. Essa característica faz com que este método construtivo torne-se interessante em aplicações dentro de outros setores da indústria, como, na manufatura da construção civil, mais precisamente, para suportar o procedimento mecânico de alongamento de cabos de aço. Neste trabalho foi realizado um estudo de caso visando dimensionar uma seção nominal de perfil que atenda o esforço de compressão axial exercido pelo alongamento de cordoalhas em uma estrutura metálica autoportante com 30 metros de comprimento. Foi avaliado o estado limite último de compressão axial de acordo com a norma NBR 8800/2008, em um estudo através do *software* de análise estrutural CYPECAD® 2017 e posteriormente verificado a veracidade dos resultados manualmente seguindo a dedução das equações da própria norma. A conclusão do estudo se deu no momento que se obteve a seção nominal de perfil a qual atendeu todos os requisitos da norma.

Palavras-chave: Dimensionamento. Estrutura metálica. Protensão de cordoalhas. Compressão axial.

1 INTRODUÇÃO

Ao referir-se à eficiência estrutural, as estruturas metálicas se destacam por conceberem um processo de construção mais eficiente em relação à estruturas de outros gêneros (concreto moldado “*in loco*” e pré-moldado). Além de caracterizarem-se estruturas relativamente leves, constituídas por elementos com área de seção transversal menor e mais esbelta, os quais são compostos por um material único e homogêneo com limites de ruptura e escoamento bem definidos, destaca Gervásio (2008). A autora ainda ressalta que as estruturas metálicas oportunizam a criação de estruturas com formas ousadas e simplificam uma posterior modificação ou ampliação da obra.

O curso de Engenharia Mecânica perpassa por inúmeros conteúdos teóricos, sendo um deles o aço e suas propriedades. Por conta das particularidades que o aço dispõe sobre as estruturas metálicas, outras áreas da engenharia fazem proveito de estruturas deste gênero,

¹ Pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

² UCEFF Faculdades, estudante de Engenharia Mecânica, danrlei_bresciani@hotmail.com

³ Químico, UCEFF Faculdades, Professor, Químico, paulomigueldet@gmail.com.

⁴ Docente do curso de Engenharia Mecânica da UCEFF, keilaorso@hotmail.com

como por exemplo, a oportuna aplicação na manufatura do concreto pré-moldado protendido no ramo da Engenharia Civil.

O concreto pré-moldado protendido com aderência inicial pode ser uma possível alternativa de armadura para construção civil, visto que, sua aplicação dispõe de benefícios pertinentes ao elemento cimentício que o emprega. Com relação a esses benefícios, El Debs (2017) menciona que este método tem a intenção de impedir ou limitar a fissuração e deformação desses elementos nos estados-limite últimos, além de aliviar o peso bruto e economizar matéria prima. Este tipo de armadura, considerada armadura ativa, exprime o conceito de alongar previamente cordoalhas⁵ contidas internamente no elemento de concreto, ante a cura do mesmo, e pós cura mantêm-se tensionadas aderidas no concreto.

Para manufatura do concreto citado acima se faz necessário uma estrutura robusta que suporte ao esforço conseqüente do alongamento das cordoalhas, segundo El Debs (2017). Esforço este, que neste artigo é tratado como uma força de compressão disposta no eixo axial da estrutura metálica, que por sua vez, tem como características ser predominantemente horizontal. Ademais, a estrutura metálica possui perfis principais onde se concentram a carga, não depende de um apoio secundário para executar a função destinada (autoportante) e tem a possibilidade de movimentação.

Admitindo a estrutura citada como alvo de estudo, é oportuno frisar que o presente artigo traz como objetivo geral dimensionar essa estrutura metálica autoportante, de acordo com a NBR8800/2008 pleiteada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas⁶, que atenda protensão de cordoalhas e seus esforços circunstanciais que pode chegar a 300 toneladas.

Alguns sistemas de protensão com aderência inicial utilizados pelas indústrias de pré-moldado de concreto são métodos antiquados, que ocupam um espaço generoso do setor fabril o que acarreta em uma área inutilizável para outros processos de fabricação, servindo exclusivamente para peças protendidas.

Esse sistema tem como outros pontos não favoráveis, não poder ser retirado do local e também sofrem com deformações plásticas com o passar do tempo. Esses pontos podem ser solucionados utilizando uma estrutura metálica autoportante no lugar do sistema antigo. Então,

⁵ Cordoalhas são cabos compostos de arames de aço, comumente confundidas com o cabo de aço propriamente dito, porém o que os diferencia é sua produção constituída por arames de aço de maior densidade, espessura e com menos "fios" do que os cabos de aço.

⁶ Associação Brasileira De Normas Técnicas comumente conhecida como ABNT, fundada em 1940 é o Foro nacional de Normalização por reconhecimento da sociedade brasileira e confirmado pelo governo federal por meio de diversos instrumentos legais.

perante o exposto, questiona-se: **como dimensionar uma estrutura metálica autoportante que atenda protensão de cordoalhas, a qual suporte os esforços circunstanciais de 300 toneladas?**

Nessa linha de considerações, este estudo justifica-se pela necessidade em dimensionar uma estrutura metálica autoportante que atenda protensão de cordoalhas, além de suportar os esforços circunstanciais de 300 toneladas, apresentando um sistema sustentável e reutilizável para produção em grande escala. A estrutura considerada para este estudo prevê que futuramente uma forma metálica (reutilizável) seja acoplada em seu interior, o que proporcionará também uma redução significativa nos resíduos sólidos gerados pela confecção de formas convencionais de madeira.

2 ESTRUTURAS METÁLICAS

Segundo Dias (1997), em uma construção alguns componentes ou a união deles, o qual são destinados a resistir a cargas são denominados estruturas. Cada componente é responsável por resistir suas cargas circunstâncias e propaga-las ao solo. De forma integral, as estruturas possuem vínculos, uniões e sistemas de travamento que interligam os componentes, com objetivo de assegurar a não-hipostaticidade do conjunto.

Para Pfeil e Pfeil (2009), inicialmente em meados de 1800 o ferro fundido e o ferro forjado foram os pioneiros nas construções de estruturas, sendo aplicados para resistir à esforços de compressão e tração respectivamente. O aço que conhecemos hoje, passou a ser utilizado em larga escala partir de meados de 1900.

Atualmente o aço é a matéria prima mais utilizada para confecção de estruturas metálicas, por isso, devido à grande gama de aplicação é impossível relatar sobre cada conceito estrutural de forma plena e ordenada. A idealização de cada estrutura é concebida puramente da necessidade a que se destina (BRASIL, 1989).

Respeitando o objetivo principal de suportar a compressão ocasionada por cordoalhas tracionadas, a estrutura metálica proposta neste estudo dispõe de características específicas, como estar predominantemente na horizontal, ter a possibilidade de movimentação quando não utilizada e ser autoportante, ou seja, suportar-se de forma independente, dispensando o auxílio de outras estruturas para executar sua função. As Figura 1 demonstra a extremidade de uma estrutura similar a proposta neste estudo:

Figura 1 – Cabeceira da estrutura metálica autoportante para compressão (vista em perspectiva)



Fonte: ROTESMA artefatos de cimento (2018).

A Figura 2 apresenta a mesma estrutura em uma vista lateral, possibilitando a identificação clara de seus componentes.

Figura 2 – Cabeceira da estrutura metálica autoportante para compressão (vista lateral)



Fonte: ROTESMA artefatos de cimento (2018)

Vale salientar que os componentes da estrutura considerados aqui para dimensionamento são os perfis “P1” e “P2” destacados na Figura 2.

2.1 IDENTIFICAÇÃO DO PERFIL IDEAL

A identificação do perfil ideal comercialmente para o estudo em questão é feita a partir da seção transversal resultante dos cálculos esclarecidos no item 2.1.4 em diante. Para isso, é indispensável conhecer as propriedades e características do material utilizado.

Para um melhor entendimento do estudo, essa sessão se divide em subitens dissertados a fim de esclarecer separadamente cada propriedade e característica que o material utilizado para o dimensionamento dispõe.

2.1.1 Propriedades mecânicas

As ligas de aço são vigorosamente influenciadas pelos materiais que as integram. Por exemplo, em ligas de aço com teor de carbono baixo, a resistência a tração também é baixa, no entanto são mais dúcteis, e vice-versa para uma liga com maior teor. (PFEIL e PFEIL, 2009).

Por conta dessa variação, para estabelecer um padrão a ABNT (2008), que rege a NBR8800, determina que as propriedades mecânicas do aço para aplicação em estruturas metálicas devem seguir os valores do Quadro 1.

Quadro 1 – Propriedades físicas

Constante física	Valor
Módulo de elasticidade, E	200x10 ³ MPa
Coefficiente de Poisson, ν	0,3
Módulo de elasticidade transversal, G	77x10 ³ MPa
Coefficiente de dilatação térmica, β	1,2x10 ⁻⁵ °C ⁻¹
Massa específica, ρ	7850kg/m ³

Fonte: adaptado de ABNT (2008).

Essas constantes são válidas em uma faixa normal de temperaturas atmosféricas.

2.1.2 Coeficiente de ponderação das resistências

O coeficiente de ponderação das resistências é uma constante empregada afim de obter o valor da resistência de cálculo, é composto pela variabilidade das resistências dos materiais envolvidos na estrutura, sendo, diferença entre a resistência do materiais do corpo-de-prova e na estrutura, e os desvios gerados na construção em relação ao projeto de acordo com as resistências. (ABNT, 2008).

No Quadro 2 são apresentados os valores que devem ser adotados de acordo com a combinação exigida em cálculo.

Quadro 2 – Constantes físicas

Combinações	Aço estrutural (γ_a)	
	Escoamento, flambagem e instabilidade (γ_{a1})	Ruptura (γ_{a2})
Normais	1,10	1,35
Especiais ou de construção	1,10	1,35
Excepcionais	1,00	1,15

Fonte: ABNT (2008).

No caso de aço estrutural os coeficientes γ_{a1} e γ_{a2} são respectivamente definidos para estados-limites últimos relacionados a escoamento, flambagem, instabilidade e ruptura.

2.1.3 Coeficiente de ponderação das ações

O coeficiente de ponderação das ações se trata de majorações aplicadas a carga de modo que a estrutura seja dimensionada com uma qualidade superior ao requisitado, isso serve como segurança para cargas acidentais ou até mesmo uma melhora na durabilidade, desempenho em serviço e capacidade resistente.

Esse coeficiente pode ser avaliado através de ações variáveis, sejam elas vento, temperatura, entre outras, ou ações permanentes, as quais se considera o peso próprio da estrutura ou equipamentos e tubulações, por exemplo.

A ponderação deve ser aplicada de acordo com as combinações exercidas, as quais estão apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações permanentes

Combinações	Diretas				Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados e empuxos permanentes	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	
Normais	1,25	1,35	1,40	1,50	1,20
Especiais ou de construção	1,15	1,25	1,30	1,40	1,20
Excepcionais	1,10	1,15	1,20	1,30	0

Fonte: adaptado de ABNT (2008).

É obrigatório considerar todas as ações que possam causar implicações significativas na estrutura, considerando os estados limites últimos e de serviço.

2.1.4 Propriedades geométricas de perfis

Para dimensionamento coeso e eficiente é necessário conhecer a geometria do perfil adotado nos cálculos, pois propriedades como, centro de gravidade, G, centro de torção, O, momento de inércia, I, e etc. podem variar de acordo com a seção transversal.

O perfil que efetivamente se enquadra como melhor opção para o esforço de compressão expresso no item 2.1.5 é o perfil tubular circular, por ter um momento de inércia superior aos demais perfis comerciais como por exemplo, o perfil I, que se enquadra como uma opção menos vantajosa.

No perfil tubular circular o centro de torção e o centro de gravidade da seção transversal, avaliados no seu eixo axial, concentram-se em seu eixo central. Já a inércia e a área bruta de seção transversal de um perfil tubular circular, A_g , segundo Gaspar (2005), seguem respectivamente as equações 1 e 2.

$$I = \frac{\pi(D^4 - D_i^4)}{64} \quad (1)$$

$$A_g = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi D_i^2}{4} \quad (2)$$

Onde:

D = diâmetro externo da seção tubular circular;

D_i = diâmetro interno da seção tubular circular.

2.1.5 Dimensionamento sob compressão axial

De forma oposta a força de tração que busca corrigir os componentes submetidos à ela retirando a flexão inicial existente, a compressão enfatiza esse fenômeno. Como resultado deste tipo de esforço temos as flambagens, que por via de regra, são deformações laterais que debilitam a aptidão para cargas do componente exigido. (PFEIL e PFEIL, 2009).

Com relação as flambagens laterais, Hibbeler (2004) acrescenta que essa qualidade física é tratada de forma crítica, pois dependendo do esforço tende a ocorrer um lapso repentino e grave.

Ao referir-se a um perfil tubular circular como uma barra prismática, considerando que o mesmo é objeto de estudo para o esforço citado, a ABNT (2008) estabelece que a equação 3 deve ser atendida.

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (3)$$

Onde:

$N_{c,Sd}$ = força axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{c,Rd}$ = força axial de compressão resistente de cálculo.

Para determinar a força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, visando os estados-limites últimos de instabilidade por flexão, por torção ou flexo-torção e de flambagem local já englobados, devemos aplicar a equação 4:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (4)$$

Onde:

χ = fator de redução associado à resistência à compressão, obtido em 2.1.5.1;

Q = fator de redução total associado à flambagem local, obtido em 2.1.5.5;

A_g = área bruta de seção transversal da barra;

f_y = resistência ao escoamento do aço;

γ_{a1} = coeficiente de ponderação relacionado a escoamento, flambagem e instabilidade.

2.1.5.1 Fator de redução

Para estabelecer o fator de redução, χ , é necessário conhecer primeiro o índice de esbeltez reduzido, λ_0 , dado pela equação 5:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (5)$$

Onde:

N_e = força axial de flambagem elástica, cujo o valor deve ser obtido em 2.1.5.2;

λ_0 = índice de esbeltez reduzido

Conhecendo λ_0 , aplica-se o valor dele nas duas equações que originam χ . Neste caso, se $\lambda_0 \leq 1,5$, utiliza-se equação 6. Já para valores superiores a 1,5, χ é dado pela equação 7 (ABNT, 2008).

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (6)$$

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (7)$$

2.1.5.2 Força axial de flambagem elástica

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), a força axial de flambagem elástica é o esforço tolerado pelo elemento que está sendo comprimido até o momento onde não sofra flambagens, essa propriedade varia de acordo com a seção transversal do mesmo.

Deste modo, de acordo com a ABNT (2008), para perfis com seção transversal duplamente simétrica ou simétrica a partir de um ponto, que é o caso de perfil I, H e barras redondas, N_e , é dado pelas equações 8 e 9:

Para eixos X e Y:

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (8)$$

Para flambagem por torção em relação ao eixo Z (longitudinal):

$$N_e = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] \quad (9)$$

Onde:

KL = comprimento de flambagem em relação ao eixo de inércia analisado, dado K em 2.1.5.3;

$K_z L_z$ = coeficiente de flambagem por torção, dado em 2.1.5.4;

I = momento de inércia de da seção transversal em relação ao eixo de inércia analisado;

E = módulo de elasticidade do aço;

C_w = constante de empenamento da seção transversal;

G = módulo de elasticidade transversal do aço;

J = constante de torção da seção transversal;

r_0 = raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento, dado pela equação 10:

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2)} \quad (10)$$

Onde:

r_x = raio de giração em relação ao eixo central x;

r_y = raio de giração em relação ao eixo central y;

x_0 = coordenada do centro de cisalhamento na direção do eixo x em relação ao centro geométrico da seção;

y_0 = coordenada do centro de cisalhamento na direção do eixo y em relação ao centro geométrico da seção;

2.1.5.3 Valores do coeficiente de flambagem

Os valores de coeficiente de flambagem, K, são definidos conforme Quadro 4.

Quadro 4 – Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
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	<ul style="list-style-type: none"> Rotação e translação impedidas Rotação livre, translação impedida Rotação impedida, translação livre Rotação e translação livres 					

Fonte: ABNT (2008).

Os seis casos no citados quadro acima, são em circunstâncias ideais onde rotação e translação das extremidades são totalmente livres ou totalmente impedidas.

2.1.5.4 Coeficiente de flambagem por torção

Os valores de coeficiente de flambagem por torção, K_x ou K_y , variam de acordo com a situação, se há impedimento de rotação nas extremidades e empenamento livre atribui-se 1. Se

há impedimento de rotação e empenamento livre em uma extremidade e empenamento livre, e na outra extremidade rotação e empenamento impedidos, então atribui-se 2. Em casos onde nenhuma das situações se aplica deve-se atribuir valor de 0,00 para o coeficiente (ABNT, 2008).

2.1.5.5 Fator de redução total associado à flambagem local

No caso de tubos com seção circular a Flambagem local, Q , segundo ABNT (2008), devem ser considerados os parâmetros das equações 11 ou 12:

$$Q = 1,00, \text{ para } \frac{D}{t} \leq 0,11 \frac{E}{f_y} \quad (11)$$

$$Q = \frac{0,038}{D/t} \frac{E}{f_y} + \frac{2}{3}, \text{ para } 0,11 \frac{E}{f_y} < \frac{D}{t} \leq 0,45 \frac{E}{f_y} \quad (12)$$

Neste caso não é previsto a utilização de seções com a relação descrita pela equação 13.

$$\frac{D}{t} > 0,45 \frac{E}{f_y} \quad (13)$$

Onde:

t = espessura;

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste estudo baseou-se no método hipotético-dedutivo, segundo Gil (2008) este método se aplica quando o conhecimento disponível é insuficiente para resolver o problema proposto, então em forma de hipóteses surgem possíveis soluções que serão deduzidas e validadas de forma lógica. Isto posto, aplicou-se para o dimensionamento referido neste artigo, pois apesar de já ter conhecimento do modelo de estrutura e da capacidade que se deseja atender, ainda foi necessário encontrar o perfil ideal para atender as solicitações do esforço de 300 toneladas, que por sua vez, foi apresentado em forma de hipótese o perfil tubular circular. Este perfil teve preferência na escolha porque tem um momento de inércia superior aos demais, como por exemplo, um perfil I.

Mediante a essa hipótese, empregou-se premissas descritas de acordo com a norma brasileira regulamentadora NBR8800/2008, as quais denotam os parâmetros necessários para o dimensionamento de componentes integrados de aço estrutural.

Ainda conforme Gil (2008), este estudo corresponde ao nível de pesquisa exploratória, delineando-se para um estudo de caso. Quanto ao nível de pesquisa, assim se caracterizou porque visa através de bibliografias destacar o problema de forma explícita. Ademais, no que diz respeito ao problema, se resume dimensionar o perfil adotado na hipótese para que a estrutura metálica suporte o esforço de compressão axial ocasionado pelo alongamento das cordoalhas.

O estudo de caso correspondeu como tática de pesquisa porque trata de estudar de forma profunda e exaustiva a amostra de modo a propiciar seu entendimento detalhado. Especificamente neste estudo, o caso definido foi “dimensionar uma estrutura metálica autoportante, que atenda protensão de cordoalhas e seus esforços circunstanciais de 300 toneladas” por meio de um *software* computacional de análises de estruturas, o qual foi alimentado das variáveis e normas apresentadas neste artigo.

A coleta de dados, primeiramente, ocorreu por meio de uma conversa informal com um profissional atuante na área de engenharia civil, de uma empresa do ramo de pré-moldados de cimento de porte intermediário, no oeste de Santa Catarina, a fim de obter informações sobre a estrutura metálica estudada. A entrevista ocorreu na última semana do mês de julho de 2018.

Posteriormente a conversa informal, mais precisamente na primeira semana do mês de agosto foi realizada a observação de uma estrutura metálica similar a proposta neste estudo, (essa estrutura metálica é apresentada nas Figuras 2 e 3 do item 2) para obter maior conhecimento de funcionalidade e compreensão do sistema estrutural. Houve uma medição das dimensões gerais da estrutura metálica observada para que a similaridade de parâmetros seja aplicada. O ato foi realizado na mesma empresa que emprega o entrevistado.

A técnica de análise de dados utilizada foi a quanti-quali, ou seja, primeiramente usufruindo do método quantitativo, no qual transcorreu a dedução dos parâmetros extraídos da norma a qual o estudo se baseia e são apresentados no decorrer do estudo. Essa dedução por sua vez foi realizada por meio do *software* computacional de análise estrutural CYPECAD®⁷ 2017 e verificada manualmente para comprovar a veracidade dos dados. O *software* é

⁷ O CYPECAD é um programa para projeto estrutural em concreto armado, pré-moldado, protendido e aço que engloba as etapas de lançamento do projeto, análise e cálculo estrutural, dimensionamento e detalhamento final dos elementos.

comercializado no Brasil pela Multiplus *Softwares* Técnicos.

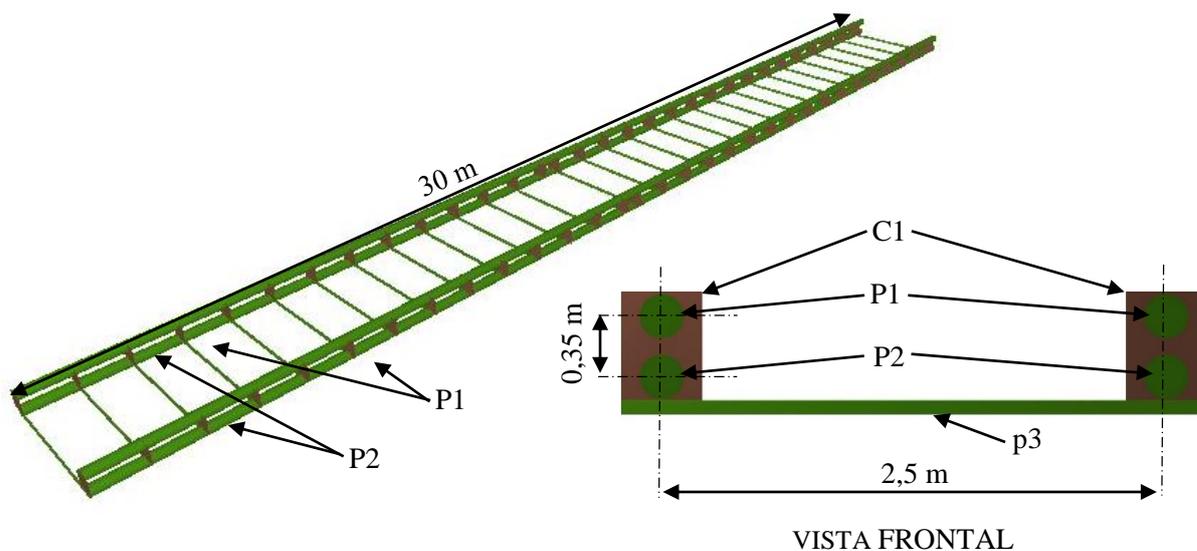
A etapa posterior a aprovação da estrutura metálica pelos resultados baseou-se na análise qualitativa, a qual justifica o segundo termo da expressão “quanti-quali” e serviu para interpretar os resultados das deduções e identificar qual o perfil ideal comercialmente para a concepção da estrutura final.

4 APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA METÁLICA

Para que o dimensionamento ocorresse com eficácia foi necessário admitir alguns parâmetros à estrutura metálica estudada. O primeiro parâmetro que visa dar dimensões ao corpo físico da estrutura buscou respeitar as exigências feitas pelo entrevistado, o qual foi atender 30 metros lineares horizontais da mesma. Posteriormente com base na observação feita à estrutura similar existente na empresa visitada, o segundo parâmetro admitido é a largura de 2,5 metros entre os eixos paralelos do par de perfis que percorrem os 30 metros lineares. A distância de espaçamento entre os perfis na vertical de 0,35 metros foi definida com base na observação da estrutura similar.

O entrevistado ainda reconheceu que por a amostra de estudo se tratar de material metálico, se destina a responsabilidade técnica de dimensionamento a um Engenheiro Mecânico. Para uma melhor compreensão da ideia de estrutura metálica que se construiu com as informações acima adotadas, é conveniente a observação da Figura 3.

Figura 3 – Vistas da estrutura metálica admitida para o estudo



VISTA EM PERSPECTIVA

Fonte: Dados do estudo (2018).

Como pode-se observar na Figura 3, a estrutura metálica é composta por dois pares de perfis tubulares circular, dispostos um paralelo ao outro na horizontal. Cada par apresenta os perfis nomeados genericamente de “P1” e “P2”. A estrutura foi construída dispondo de quatro perfis principais, para que o esforço aplicado fosse capaz de ser distribuído em uma área maior e conseqüentemente ocorresse a redução da seção nominal dos perfis. Ademais estes perfis executam a função principal de suportar a compressão de 300 toneladas distribuídas no sentido axial dos eixos. Por conta disso, se fazem o alvo de dimensionamento do presente estudo.

As chapas nomeadas de “C1” estão distanciadas 1 metro umas das outras e executam a função de travar um vínculo do tipo rótula entre os perfis “P1” e “P2”, uma vez que não estão engastadas a eles. A criação deste vínculo como tipo de travamento dificulta (mas não inibe) a flambagem excessiva dos perfis no sentido perpendicular vertical ao eixo axial da força. Isso proporciona que um perfil contenha a deformação do outro. Esta chapa não é o alvo do dimensionamento, se mostrando apenas representativa para o vínculo de travamento.

Outro perfil apresentado na Figura 3 é o “p3”. Este está engastado na base das chapas “C1”, ligando-as horizontalmente e proporcionando um travamento que dificulta (mas não inibe) que os perfis “P1” e “P2” flambem no sentido perpendicular horizontal ao eixo axial da força. Esta ligação possibilita que um par de perfis contenha a deformação do outro par paralelo. Este perfil não é o alvo do dimensionamento, se mostrando apenas representativo para o vínculo de travamento.

4.1 DISTRIBUIÇÃO DA CARGA NA ESTRUTURA METÁLICA

Com a ideia de construção da estrutura metálica concebida, foi possível fazer a distribuição uniforme da carga de 300 toneladas de compressão sobre ela. A carga de foi distribuída de forma igual entre os 4 perfis principais “P1” e “P2” destacados na Figura 3. O resultado disso é que cada perfil recebe uma carga de compressão de 75 toneladas.

Entretanto a norma estabelece que a carga deve ser corrigida de acordo com o coeficiente de ponderação das ações descrito no item 2.1.3. De acordo com a característica da estrutura metálica estudada, verificou-se que está sujeita a cargas não variáveis, então em seu estado limite de serviço é adequado ponderar através de ações permanentes. Logo, aplicou-se de acordo com o Quadro 3, uma combinação de ações permanentes descrita como: normal, direta, tida como peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições *in loco*. Neste caso a majoração ficou em 1,4% da carga sobre o perfil, resultando em 105 toneladas, como ilustrado em um único perfil isolado na Figura 4.

Figura 4 – Perfil “P1” tubo circular isolado



Fonte: Dados do estudo (2018).

Admitindo que as uma das extremidades do perfil comprimido está engastada, assim que a força “ F_1 ” é aplicada na extremidade livre, a força “ F_2 ” tem a função de atuar como normal, seguindo a mesma direção porém em sentido contrário, fazendo com que o sistema permaneça em equilíbrio.

4.2 DIMENSIONAMENTO

O material adotado para o dimensionamento é o Aço ASTM A36, escolhido devido a ser o tipo de aço mais utilizado em estruturas metálicas segundo Rebello (2005). Esse aço tem o limite de escoamento, f_y , em 250MPa.

Acertado o aço, utilizou-se do *Software* CYPECAD® 2017 para modelar a estrutura metálica, considerando os eixos dos perfis e a superfície da chapa como referências. Posteriormente a modelagem da estrutura no *software* foi possível iniciar o dimensionamento dos perfis.

Inicialmente ocorreu uma tentativa de fazer com que o *software* dimensionasse automaticamente os perfis, conforme a solicitação de cara um, porém neste caso, ele especificou perfis diferentes para cada trecho travado da estrutura. Isso aconteceu porque ele leva em consideração outras verificações de estados limites últimos, como por exemplo a combinação do esforço axial com a flexão. Como a pretensão é avaliar apenas o estado limite último de compressão e também criar um padrão de construção, os perfis foram arbitrados manualmente com seções aleatórias até chegar em três configurações de dimensionamento, das quais apenas uma atendeu com eficiência segundo o *software*.

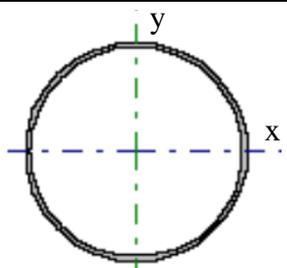
Posteriormente a obtenção dos dados pelo *software* ocorreu a verificação do estado limite último de compressão axial manualmente, seguindo a dedução descrita a partir do item 2.1.5, possibilitando a comprovação da veracidade dos resultados.

4.2.1 Verificação dos Estados Limites Últimos

A primeira configuração com uma seção de 219,1mm de diâmetro e 6,3mm de espessura se demonstrou inviável, pois não corrobora com a premissa maior da norma referente ao estado limite último de compressão axial, a qual exige que a força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, seja superior que a força axial de compressão solicitante de cálculo $N_{c,Sd}$. Essa premissa é expressa na equação 3.

A verificação via *software* e a confirmação dos resultados executados manualmente podem ser observados no Quadro 5, juntamente com a inércia e a área da seção bruta que atendem as equações 1 e 2 respectivamente.

Quadro 5 – Verificação dos E.L.U. e propriedades geométricas do Perfil

Redondo 219,1x6,3mm				
	Propriedades geométricas			
	Área:	4211,74mm ²		
	I _x :	23861392,58mm ⁴	I _y :	23861392,58mm ⁴
	Verificação dos estados limites últimos			
		<i>Software</i>	Manual	
$N_{c,Sd}$:	105,000 ton	105,000 ton		
$N_{c,Rd}$:	96,667 ton	96,666 ton		
Capacidade resistente exigida da seção: 108,6%			Peso/m: 33,06kg	

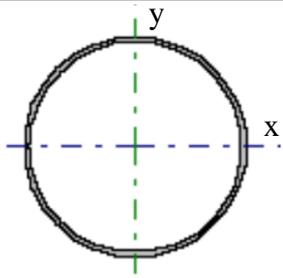
Fonte: Dados do estudo (2018).

O resultado obtido desta primeira verificação demonstrou que foi exigido 108,6% da seção para resistência à compressão axial, excedendo assim sua capacidade resistente que está em 100%. Este percentual de exigência da capacidade se estendeu nos 30 metros de estrutura, porém é válido ressaltar que para atender a equação 5 que se refere ao cálculo do λ_0 , índice de esbeltez reduzido, considerou-se o comprimento do perfil como a distância entre os travamentos ou seja, 1 metro.

A segunda configuração verificada com uma seção de 219,1mm de diâmetro e 8,0mm de espessura se demonstrou inviável desta vez por estar superdimensionada. Esta seção corrobora com a premissa maior da norma esclarecida na equação 3, porém com um excesso de material, o que resulta em um custo extra na aquisição do perfil.

A verificação via *software* e a confirmação dos resultados executados manualmente podem ser observadas no Quadro 6, juntamente com suas propriedades geométricas.

Quadro 6 – Verificação dos E.L.U. e propriedades geométricas do Perfil

Redondo 219,1x8,0mm				
	Propriedades geométricas			
	Área:	5305,52mm ²		
	I _x :	29596328,73 mm ⁴	I _y :	29596328,73 mm ⁴
	Verificação dos estados limites últimos			
	<i>Software</i>	Manual		
N _{c,Sd} :	105,000 ton	105,000 ton		
N _{c,Rd} :	121,753 ton	121,747 ton		
Capacidade resistente exigida da seção: 86,2%			Peso/m: 41,65kg	

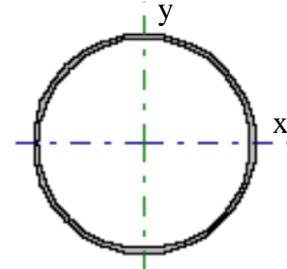
Fonte: Dados do estudo (2018).

O resultado obtido desta segunda verificação demonstrou que foi exigido 86,2% da capacidade resistente da seção para compressão axial, ficando distante de sua eficiência de trabalho que se encontra em 100%. Neste caso para otimizar esta seção, seria necessário trabalhar com um travamento mais espaçado na estrutura metálica, isso afetaria diretamente no λ_0 , índice de esbeltez reduzido.

Já, a terceira configuração verificada com uma seção de 219,1mm de diâmetro e 7,1mm de espessura se demonstrou a mais eficaz para sistema. Esta seção corrobora com a premissa maior da norma esclarecida na equação 3.

A verificação via *software* e a confirmação dos resultados executados manualmente podem ser observadas no Quadro 7, juntamente com suas propriedades geométricas.

Quadro 7 – Verificação dos E.L.U. e propriedades geométricas do Perfil

Redondo 219,1x7,1mm			
	Propriedades geométricas		
	Área:	4728,72mm ²	
	I _x :	26595775,40mm ⁴	I _y :
Verificação dos estados limites últimos			
	<i>Software</i>		Manual
N _{c,Sd} :	105,000 ton	105,000 ton	
N _{c,Rd} :	108,525 ton	108,524 ton	
Capacidade resistente exigida da seção: 96,8%			Peso/m: 37,12kg

Fonte: Dados do estudo (2018)

O resultado obtido desta terceira verificação demonstrou que foi exigido 96,8% da capacidade resistente da seção para compressão axial, ficando muito próxima de sua eficiência de 100%, mas não a excedendo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observou-se que o cálculo manual e o executado através do *software* apresentaram resultados com uma diferença pouco expressiva entre eles, o que acabou atestando a eficiência do *software* e indicando com precisão as características do perfil ideal para a situação proposta.

O dimensionamento se concluiu ao encontrar a seção ideal que irá compor a estrutura metálica, a qual é a de 219,1x7,1mm. Além de atender todos os requisitos da norma referente ao estado limite último de compressão axial, é a que tem o melhor custo benefício, quando se avalia o peso do perfil. Admitindo que se comercializa aço pelo peso.

Serve como sugestão de um futuro estudo o acoplamento de formas metálicas (reutilizáveis) no interior da estrutura metálica estudada. Estas formas são utilizadas para moldar a matéria prima e, tradicionalmente, são confeccionadas de madeira. A implantação de formas reutilizáveis proporcionará uma redução significativa nos resíduos sólidos gerados pelo sistema tradicional de moldagem, que segundo a Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil (2015), a geração de resíduos de madeira nas obras pode chegar a 0,054 m³/m² de área construída atualmente.

REFERÊNCIAS

ABNT. **ABNT NBR 8800 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro: ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

BRASIL. **Manual Brasileiro Para Cálculo de Estruturas Metálicas**. V1, 2 ed. Brasília.

MD/MSI: Graphilivros editores Ltda, 1989.

EL DEBS, Mounir Khalil. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=7Ls6DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT5&dq=concreto+protendido+utiliza%C3%A7%C3%A3o&ots=A73vJBGA4n&sig=XrGdsqLlVehGhNE28s2_O58kAP0#v=onepage&q=c&f=false>. Acesso em 06 Ago. 2018.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem**. 8 ed. São Paulo: Ziguarate Editora, 1997.

GASPAR, Ricardo. **Mecânica dos materiais**. 2005. São Paulo. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/mackenzista2/resistncia-dos-materiais-mecnica-dos-materiais>>. Acesso em 1 Ago. 2018.

GERVÁSIO, Helena Maria. **A sustentabilidade do aço e das estruturas metálicas**. 2008. Disponível em: <http://www.abcem.org.br/construmetal/2008/downloads/PDFs/27_Helena_Gervasio.pdf>. Acesso em 31 Ago. 2018.

GESTÃO AMBIENTAL DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Sinduscon**. São Paulo, 2015. Disponível em: <<https://www.sindusconsp.com.br/wp-content/uploads/2015/09/MANUAL-DE-RES%C3%8DDUOS-2015.pdf>>. Acesso em 06 Nov. 2018.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos materiais**. 5 ed. São Paulo: Pearson Prentice, 2004.

PFEIL, Walter; PEFEIL, Michèle. **Estruturas de aço: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

REBELLO, Yopanan C. P. **Estruturas de aço, concreto e madeira: atendimento da expectativa dimensional**. 7 ed. São Paulo: Ziguarate Editora, 2005.