



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CAMPUS CARAUBAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

TÚLIO SALES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE TORRES TRELIÇADAS
AUTOPORTANTES PARA TELECOMUNICAÇÕES**

Caraúbas/RN
(2018)

TÚLIO SALES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE TORRES TRELIÇADAS
AUTOPORTANTES PARA TELECOMUNICAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia civil
da Universidade Federal Rural do
Semiárido (UFERSA), Campus Caraúbas,
como parte dos requisitos para obtenção
do Título de Bacharel em Ciência e
Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Dênis
Costa Ferreira - UFERSA

Caraúbas/RN
(2018)

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Oliveira, Túlio Sales.

Análise e dimensionamento de torres treliçadas autoportantes para telecomunicações.

CARAÚBAS-RN / Túlio Sales de Oliveira. - Caraúbas, 2018.

81 f. : il.

Orientador: Manoel Dênis Costa ferreira

Monografia (Graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Engenharia Civil, 2018.

1. Dimensionamento. 2. Torre autoportante. 3. Análise estática. 4. Vento. I. Ferreira, Manoel Dênis Costa, Orient. II. Análise e dimensionamento de torres treliçadas autoportantes para telecomunicações.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

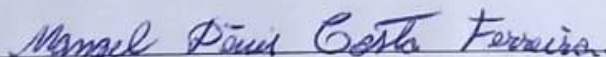
TÚLIO SALES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE TORRES TRELIÇADAS AUTOPORTANTES
PARA TELECOMUNICAÇÕES**

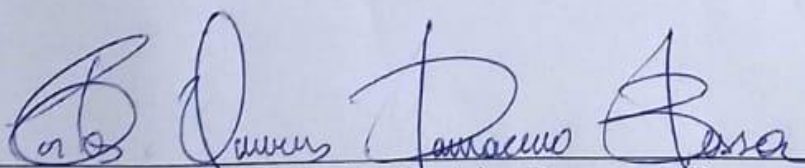
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Câmpus Caraúbas, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Engenheiro Civil

Orientador: Prof. Dr. Manoel Dênis Costa Ferreira - UFERSA.

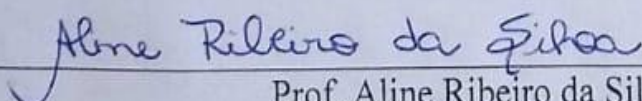
APROVADO EM: 13/09/18



Prof. Dr. Manoel Dênis Costa Ferreira
Presidente



Prof. Carlos Vinicius Damaceno Bessa
Membro



Prof. Aline Ribeiro da Silva
Membro

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

(Albert Einstein)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda minha família em especial ao meu pai, Francisco Barros de Sales, minha mãe Lucia Ferreira de Oliveira Sales e a minha irmã Lissia Farrures Sales de Oliveira, que sempre estiveram do meu lado nas horas boas e nos momentos de dificuldade.

Túlio Sales de Oliveira

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pela oportunidade e capacidade de vencer uma das etapas dessa jornada.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais e minha querida irmã.

Aos meus amigos de infância que por algum tempo não pude estar reunido com eles, devido a realização desse trabalho.

Aos meus colegas de faculdade, onde surgiu a oportunidade de saber o quanto foram importantes nessa caminhada, especialmente a, Alexandre Peres, Anderson Nunes, Dennys Lacerda, Fernanda Beatriz, Fredson Gomes, João Marcos, Hallison Galdino, Marcos Alves, Webert Araújo.

Aos Professores Manoel Dênis, e Gilvan Bezerra, pela paciência e contribuição, pois sem eles não seria possível o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço a todos vocês, pois foram muito importantes e contribuíram para que eu chegasse até esse momento. Além disso, testemunharam todo esforço e dedicação que pude apresentar para que tudo ocorresse da melhor maneira possível.

RESUMO

As torres autoportantes são sistemas estruturais compostos por elementos esbeltos, que toleram as cargas de forma eficiente, com baixo custo e segurança. Porém, o mau funcionamento ou até mesmo o colapso de tais estruturas podem causar danos à vida de pessoas e/ou grandes prejuízos. Desde a década de 90 que vem apresentando um grande avanço no setor de telecomunicações e hoje, acrescentando a possibilidade de transmissão de dados, há um desenvolvimento significativo e constante que acarreta em grande procura deste tipo de estrutura. Este trabalho aborda alguns aspectos envolvidos no projeto de uma torre de telecomunicações: características de cada tipo de torre, normas, estados limites, principais ações (que a estrutura é submetida), modelagem e dimensionamento. A modelagem foi realizada através de uma análise estática utilizando o método dos elementos finitos, considerando o vento incidindo a 0° e 45° sob a estrutura NBR 6123/88, observando-se as variações dos esforços nas barras, e dos deslocamentos máximos gerados de acordo com cada caso de incidência do vento. O dimensionamento foi realizado a partir dos esforços obtido entre os dois casos de carregamento de vento, através das prescrições da NBR 8800/08.

Palavras-chave: Esforços, Carregamento, Análise estática, Vento.

ABSTRACT

Self-supporting towers are structural systems composed of slender elements, which tolerate loads efficiently, with low cost and safety. However, malfunctioning or even collapse of such structures can cause damage to people's lives and / or major damage. Since the 90's, which has been making a major breakthrough in the telecommunications sector, and today, adding the possibility of data transmission, there is a significant and constant development that leads in great demand of this type of structure. This work deals with some aspects involved in the design of a telecommunications tower: characteristics of each type of tower, norms, boundary states, main actions (which structure is submitted), modeling and sizing. The modeling was performed through a static analysis using the finite element method, considering the wind incident at 0° and 45° under the structure NBR 6123/88, observing the variations of the forces in the bars, and the maximum displacements generated according to each case of wind incidence. The sizing was carried out from the efforts obtained between the two cases of wind loading, according to the requirements of NBR 8800/08.

Palavras-chave: Effort, Loading, Static analysis, Wind.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Torre auroportante.	20
Figura 2: Isoplelas de velocidade básica.	23
Figura 3: Consideração do fator estatístico.	24
Figura 4: Ligação flangeada.	28
Figura 5: Estilos de peças que sofrem tração.	29
Figura 6: Modelo de base quadrada.	32
Figura 7: Módulos e principais peças da estrutura.	33
Figura 8: Direção do vento em relação a estrutura.	41
Figura 9: Distribuição da força.	41
Figura 10: Vértice da torre.	45
Figura 11: Gráfico das isoplelas.	80
Figura 12: Classes para determinação do fator de rugosidade.	80
Figura 13: Parâmetros meteorelógico.	81
Figura 14: Valores mínimos do fator estatístico.	81
Figura 15: Ábaco para obtenção do coeficiente de arrasto.	82

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Propriedades do aço.	27
Tabela 2: Valores dos coeficientes de ponderação das resistências.....	28
Tabela 3: Áreas efetivas por módulos.....	34
Tabela 04: Fator de rugosidade do terreno.	35
Tabela 5: Velocidade característica e pressão dinâmica do vento.	36
Tabela 6: Índice de área exposta.	37
Tabela 7: Coeficiente de arrasto para vento a 0°.	37
Tabela 8: Coeficiente de arrasto para vento a 45°.	38
Tabela 9: Força de arrasto incidindo a 0°.	38
Tabela 10: Força de arrasto incidindo a 45°.	39
Tabela 11: Força de arrasto das antenas.....	39
Tabela 12: Força de arrasto total para o vento incidindo a 0°.	40
Tabela 13: Força de arrasto total para vento incidindo a 45°.	40
Tabela 14: Fator de proteção.....	42
Tabela 15: Forças resultante nas faces da torre caso 01.....	43
Tabela 16: Força resultante nas faces da torre caos 02.....	44
Tabela 17: Força de arrasto distribuida por vértice caso 01.....	46
Tabela 18: Força de arrasto distribuida por vértice - caso 02.....	47
Tabela 19: Peso dos casos existentes.....	50
Tabela 20: Barras submetidas à força axial de tração - montante.....	53
Tabela 21: Barras submetidas à força axial de tração - diagonal.	54
Tabela 22: Barras submetidas à força axial de tração - horizontal.	54
Tabela 23: Flambagem local das barras axialmete comprimidas.	58
Tabela 24: Força axial de flambagem elástica.	58
Tabela 25: Barras submetidas à força axial de compressão.	59
Tabela 26: Flambagem local das barras axialmente comprimidas.	59
Tabela 27: Força axial de flambagem elástica.	60
Tabela 28: Barras submetidas à força axial de compressão.	60
Tabela 29: Flambagem local das barras axialmente comprimidas.	61
Tabela 30: Força axial de flambagem elástica.	61
Tabela 31: Barras submetidas à força axial de compressão.	62
Tabela 32: Valores da relação largura - espessura - montante	63
Tabela 33: Otenção da resistente.	64

Tabela 34: Relação entre a largura - espessura - diagonal.	64
Tabela 35: Obtenção da resistente.	64
Tabela 36: Relação entre largura - espessura - horizontal.	65
Tabela 37: Obtenção da resistente.	65
Tabela 38: Obtenção da resistente montante.	67
Tabela 39: Obtenção da resistente diagonal.	67
Tabela 40: Obtenção da resistente horizontal.	68
Tabela 41: Verificação para o montante.	69
Tabela 42: Verificação para a diagonal.	70
Tabela 43: Verificação para a horizontal.	70
Tabela 44: Verificação para a montante.	71
Tabela 45: Verificação para a diagonal.	71
Tabela 46: Verificação para a horizontal.	72
Tabela 47: Verificação para o montante.	72
Tabela 48: Verificação para a diagonal.	73
Tabela 49: Verificação para a horizontal.	73
Tabela 50: Verificação para o montante.	74
Tabela 51: Verificação para a diagonal.	74
Tabela 52: Verificação para a horizontal.	75
Tabela 53: Verificação do tramo montante.	75
Tabela 54: Verificação do tramo diagonal.	76
Tabela 55: Verificação do tramo horizontal.	76

LISTA DE SIMBOLOS

V_k Velocidade característica do vento

V_0 Velocidade básica do vento

A_e Área efetiva

C_a Coeficiente de arrasto

F_a Força de arrasto

F_r Fator de rajada

f_y Tensão de escoamento

f_u Tensão de ruptura

I Momento de inércia da seção transversal

L Comprimento da barra

N_e Força axial de flambagem elástica

r Raio de giração

S_1 Fator topográfico

S_2 Fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação

S_3 Fator estatístico

γ_{a1} Coeficiente de segurança

γ_g Coeficiente de ponderação para ações permanentes

γ_q Coeficiente de ponderação para ações variáveis

$\emptyset$ Índice de área exposta

A Área de contorno

b Parâmetro meteorológico

E Módulo de elasticidade

K Coeficiente de flambagem

η Fator de proteção

p Parâmetro meteorológico

q Pressão dinâmica

Q Coeficiente redutor de instabilidade localizada da seção transversal

λ Índice de esbeltez

χ Coeficiente redutor de instabilidade global da estrutura

R_e Número de Reynolds

d Diâmetro da peça

A_n Área líquida

C_t Coeficiente de redução

$N_{t,Rd}$ Força axial de tração resistente de cálculo

$N_{t,Sd}$ Força axial de tração solicitante de cálculo

$N_{c,Rd}$ Força axial de compressão resistente de cálculo

$N_{c,Sd}$ Força axial de compressão resistente de cálculo

M_{Rd} Momento fletor resistente de cálculo

M_{Sd} Momento fletor solicitante de cálculo

V_{Rd} Força cortante resistente de cálculo

V_{Sd} Força cortante solicitante de cálculo

λ_0 Índice de esbeltez reduzido

b Largura

t Espessura

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.2 OBJETIVOS.....	18
1.2.1 Objetivos gerais.....	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
2. REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 ESTRUTURAS TRELIÇADAS	19
2.1.1 Torres Autoportantes	20
2.2 AÇÕES DO VENTO	21
2.2.1 Força de arrasto (F_a).....	21
2.2.2 Coeficiente de arrasto (C_a).....	25
2.3 TENSÃO	25
2.4 TENSÕES DE ESCOAMENTO	25
2.5 MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS.....	25
2.6 SOFTWARES DE ANÁLISE ESTRUTURAL	26
2.7 ESTRUTURAS METALÍCAS	26
2.8 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇ.....	26
2.9 ESTADOS LIMITES.....	27
2.10 COEFICIENTE DE PODERAÇÃO DAS RESITÊNCIAS.....	27
2.11 LIGAÇÃO FLANGEADA.....	28
2.12 ESFORÇOS.....	29
2.12.1 Força axial de tração.....	29
2.12.2 Força axial de compressão.....	29
2.12.3 Esforço de flexão.....	30
2.13 AÇÕES	30

2.13.1 Ações Permanentes	30
2.13.2 Ações variáveis	30
2.13.3 Ações excepcionais	30
2.14 COMBINAÇÕES DE AÇÕES	31
2.14.1 Combinações de ações últimas	31
2.14.2 Combinações de ações de serviço	31
3 METODOLOGIA.....	31
3.1 MODELOS.....	31
3.2 DADOS DO PROJETO DA TORRE	32
3.4 NORMAS TÉCNICAS UTILIZADAS	33
3.5 DIMENSIONAMENTO	33
3.5.1 Análise de carregamento de vento	33
3.5.2 Cargas variáveis	34
3.6 ESFORÇO SOLICITANTE.....	48
3.6.1 Esforço solicitante.....	48
3.6.2.1 Tração.....	52
3.6.2.2 Compressão.....	54
3.6.2.2.1 Montante	57
3.6.2.2.2 Diagonal.....	59
3.6.2.2.3 Horizontal	60
3.6.2.3 Flexão	62
3.6.4 2 Cisalhamento	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1 PARA O MODELO PARCIALMENTE ROTULADO	69
4.1.1 Esforço de tração:	69
4.1.2 Esforço de compressão:.....	71
4.1.3 Esforço de flexão:	72
4.1.4 Esforço de cisalhamento:	74

5 CONCLUSÃO.....	77
6.REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	78
ANEXO A: FORÇA DEVIDO AO VENTO	80

1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico vivenciado pelo Brasil nos últimos anos tem gerado um acentuado crescimento dos sistemas de telecomunicações, radio-transmissão, transmissão de energia elétrica e internet. Para o adequado funcionamento desses sistemas, sem interferências de pessoas, edificações ou veículos, é necessário que eles fiquem em considerável altura em relação ao solo. Para tanto, é comum a utilização de torres em treliças para suportar, elevar e posicionar as antenas e cabos de tais sistemas.

As estruturas metálicas são muito utilizadas na construção civil, isso, porque esse tipo de material propiciam construções limpas e rápidas no seu entorno. São muito úteis para obras de infraestrutura, tais como aeroportos, galpões, torres e demais instalações que sejam essenciais para o bom funcionamento das cidades.

De acordo com (GUANABARA, 2010), esse material apresenta algumas vantagens como: menor tempo de execução, confiabilidade, resistência, que se estendem por maiores vãos. Por outro lado também tem suas desvantagens, impossibilidade de ser moldada em obra, entre outras.

As torres autoportantes são sistemas estruturais de grande esbeltez, que suportam as cargas de forma eficiente, com baixo custo e segurança. Porém, o mau funcionamento ou até mesmo o colapso de tais estruturas podem causar danos à vida de pessoas e/ou grandes prejuízos.

Este trabalho de conclusão de curso estará voltado para o dimensionamento de estruturas metálicas autoportantes (Geometrias escolhidas dentre as existentes), auxiliando na escolha do perfil mais adequado a ser utilizado. O dimensionamento propriamente dito seguirá rigorosamente as especificações da NBR 8800/2008, norma que rege o projeto de estruturas de aço no Brasil.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos gerais

Com a realização da análise estrutural da ação do vento nas estruturas autoportantes será feito um dimensionamento das barras que constitui a estrutura segundo as especificações da ABNT NBR 8800/2008.

1.2.2 Objetivos específicos

Dimensionar as barras mediante os esforços de:

- Tração;
- Compressão;
- Flexão;
- Cisalhamento.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico serão apresentados alguns conceitos importantes que foram estudos durante à análise da ação do vento (ABNT NBR 6123/1988 – Forças devido ao vento em edificações), na estrutura metálicas relacionadas a torres autoportantes, além disso, será abordado o dimensionamento das barras metálicas que compõe a estrutura de acordo com cada esforço correspondente, seguindo as especificações da ABNT NBR 8800/2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

Segundo Motta (2015) as Estruturas metálicas são baseadas na união de elementos metálicos (normalmente de aço do tipo estrutural) com seções transversais conhecidas (perfis), gerando um conjunto de determinada geometria ou topologia, possibilitando seu uso estrutural de forma otimizada. A alta resistência do aço estrutural proporciona o desenvolvimento de projetos mais leves e com um tempo de produção pequeno.

2.1 ESTRUTURAS TRELIÇADAS

O emprego de torres metálicas treliçadas é a solução mais econômica devido a rapidez na montagem, com menor mobilização de material e equipamentos na execução. (SINGH, 2009, p. 10)

Segundo Zampiron (2008), o tipo de material utilizado na construção de uma torre apresenta grande influência no seu comportamento estrutural, no seu peso, na forma de montagem e custo. Existem várias alternativas de materiais, como madeira, aço e concreto armado.

2.1.1 Torres Autoportantes

As torres autoportantes são formadas por apenas um mastro, de treliça ou tubular, que resiste a todos os carregamentos, as vantagens deste tipo de estrutura sobre as torres estaiadas é a menor necessidade de área para instalação e menores custos de manutenção, sendo usualmente utilizadas entre baixas e médias alturas, até 120 m (ABDALLA, 2002).

Segundo Labegaline *et al* (apud KELLEN, 2009, p.12) as torres autoportantes podem ser de três tipos:

Rígidas: São aquelas que, mesmo sob a ação das maiores solicitações, não apresentam deformações elásticas perceptíveis em qualquer direção.

Flexíveis: São aquelas que, sob a ação das solicitações de maior intensidade, apresentam deformações sensíveis, que, por serem elásticas, desaparecem ao cessar a solicitação. São típicos deste tipo de suportes, os postes e pórticos articulados, independentemente do material com que são confeccionados.

Suportes mistos ou semi-rígidos: São estruturas que apresentam rigidez em uma das direções principais, como por exemplo, os pórticos contra ventados.

Figura 1: Torre autoportante.



FONTE: www.google.com.br/search?q=torres+autoportantes&rlz

2.2 AÇÕES DO VENTO

Segundo a ABNT NBR 6123/1998 um dos principais carregamentos que atua nas estruturas das torres é o decorrente da ação vento, então, a segurança das mesmas está ligada diretamente com a adequada determinação dos efeitos provocados por esses esforços.

N a ABNT NBR 6123/1988, há diferentes formas para se considerar os efeitos produzidos pelo vento, para fins de cálculo. Todos os tratam como uma carga estática equivalente à ação real, dinâmica, do vento.

Segundo Vaz (2015), resultados experimentais obtidos em túnel de vento, com simulação das principais características do vento natural Podem ser usados em substituição do recurso aos coeficientes constantes nesta norma.

2.2.1 Força de arrasto (F_a)

Segundo a ABNT NBR 6123/1988, a força de arrasto na direção do vento (F_a) é uma força estática sendo representada por:

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_e \quad (1)$$

Onde:

C_a : é o coeficiente de arrasto;

q : é a pressão dinâmica do vento;

A_e : é a área frontal efetiva.

Obs.: *Área frontal efetiva: área da projeção ortogonal da edificação, estrutura ou elemento estrutural sobre um plano perpendicular à direção do vento (“área de sombra”), (ABNT NBR 6123, 1988, p.5).*

2.2.1.1 Pressão dinâmica de vento (q)

De acordo com a ABNT NBR 6123/1988, a pressão dinâmica de vento é determinada pela expressão matemática indicada abaixo.

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

(V_k) é a velocidade característica do vento.

2.2.1.1.1 Velocidade característica do vento (V_k)

A velocidade característica do vento (V_k) é a velocidade do vento que atua sobre uma determinada parte da estrutura. Depende da altura do solo, da rugosidade do terreno, das variações do relevo e das dimensões e do grau de segurança da estrutura, e é obtida pela expressão a seguir (ABNT NBR 6123/1988, item 4.2 (b), p.4).

$$V_k = V_0 . S_1 . S_2 . S_3 \quad (3)$$

Onde:

V_0 : é a velocidade básica do vento;

S_1 : é o fator topografico;

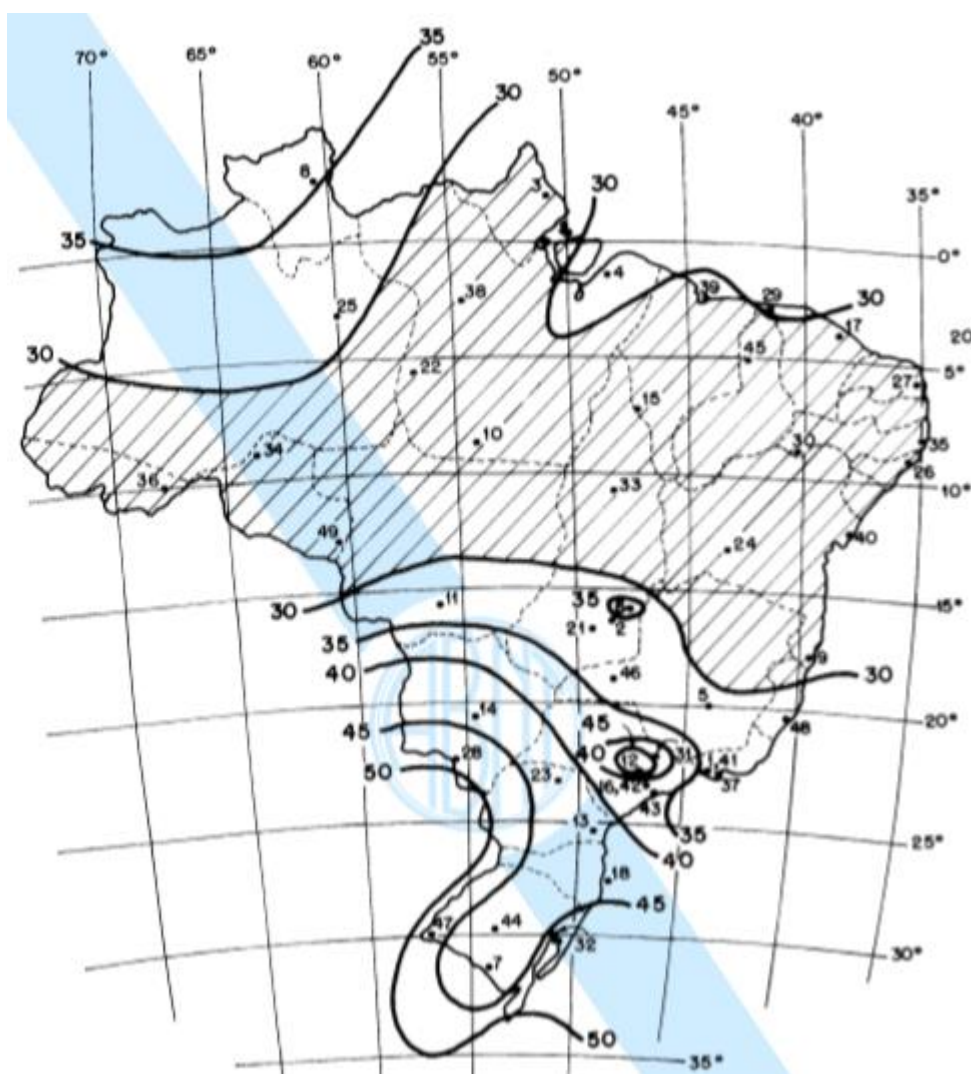
S_2 : é o fator que considera a rugosidade do terreno, dimensões da estrutura e altura sobre o terreno;

S_3 : é o fator estatístico.

2.2.1.1.1.1 Velocidade básica do vento (V_0)

A velocidade básica do vento, é a velocidade de uma rajada de 3s, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano. A velocidade do vento depende da região do Brasil e onde a torre será instalada. (ABNT NBR 6123/1988, p. 5).

Figura 2: Isopletas de velocidade básica.



FONTE: ABNT NBR 6123/1988.

2.2.1.1.1.2 Fator topográfico (S_1)

Segundo a (ABNT NBR 6123/1988 p.5), o fator topográfico leva em consideração as variações do relevo do terreno sendo considerado.

- Terrenos planos ou fracamente acidentados: = 1,0;
- Taludes e morros: item 5.2 da norma ;
- Vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção:

2.2.1.1.1.3 Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (S_2)

Para determinar esse fator é necessário classificar o terreno em relação a sua rugosidade (categoria) e a estrutura em relação as suas dimensões que se refere às classes. (ABNT NBR 6123/1988). Segundo a norma, o fator pode ser determinado diretamente da norma juntamente com a expressão abaixo.

$$S_2 = b.F_r.(Z/10)^p \quad (4)$$

2.2.1.1.1.4 Fator estatístico (S_3)

O fator estatístico S_3 é baseado em conceitos estatísticos, e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação, o mesmo é obtido pela figura abaixo de acordo com o grupo que a estrutura se adequa. (ABNT NBR 6123/1988, p 10).

Figura 3: Consideração do fator estatístico.

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

Fonte: ABNT NBR 6123/1988.

2.2.2 Coeficiente de arrasto (C_a)

Os coeficientes de arrasto dos acessórios geralmente são fornecidos nos catálogos dos produtos. Para torres reticuladas constituídas por barras prismáticas de seção circular, os valores do coeficiente de arrasto são obtidos em função do número de Reynolds e do índice de área exposta ϕ , da NBR 6123, p. 27.

De acordo com o item 7.6 da ABNT NBR 6123 (1988) “ η ” é o fator de proteção, na qual, as forças do vento nas partes protegidas dos reticulados devem ser multiplicadas por este mesmo fator de proteção η , que depende do índice de área exposta do reticulado situado imediatamente a barlavento do reticulado em estudo, e do respectivo afastamento relativo e/h .

2.3 TENSÃO

Segundo Hibbeler (2010), tensão é denominada pelo quociente da intensidade da força interna sobre um plano específico (área). A intensidade da força ou força por unidade de área, que age perpendicularmente à área, é definida com tensão normal σ . Se a força normal ou tensão tracionar o elemento de área, ela será denominada tensão de tração (+), caso contrário, se comprimir o elemento, ela será denominada tensão de compressão (-) (HIBBELER, 2010).

2.4 TENSÕES DE ESCOAMENTO

O projeto de qualquer edificação, máquina ou outro elemento qualquer é um estudo através da qual a estrutura em si e suas partes componentes são dimensionadas de forma que tenha resistência suficiente para suportar os esforços para as condições de uso a que serão submetidas.

Esse processo envolve a análise de tensões das partes componentes da estrutura, é de vital importância ressaltar que a análise de tensões, esforços e as propriedades mecânicas dos materiais são os principais aspectos da resistência dos materiais.

2.5 MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS

Segundo Pinto (2013) a ideia básica do Método dos Elementos Finitos (MEF) consiste em utilizar como parâmetros as variáveis nodais de um número finito de pontos previamente escolhidos, denominados de nós. No MEF o domínio de integração é subdividido em uma série de regiões, ou elementos finitos, interconectados entre si através de um número discreto de pontos nodais.

“Para cada região (ou elemento) se estabelece um comportamento local aproximado, de tal forma que as incógnitas do problema em qualquer ponto do elemento podem ser definidas em função das mesmas incógnitas nos pontos nodais do elemento. Em seguida, obtido as somas das contribuições de cada elemento, se chega a um sistema total de equações, cuja solução permite conhecer os valores das incógnitas nos pontos nodais. Finalmente a partir desses valores podem-se calcular outros resultados intermediários, como por exemplo, a determinação do estado de tensão e deformação.” (MARINHO 2002).

2.6 SOFTWARES DE ANÁLISE ESTRUTURAL

O software Sap 2000, possui a alternativa de deliberar o tipo de carregamento, podendo ser nas barras, carga distribuída, peso próprio entre outros, ou nos próprios nós, carga pontual. Logo depois de aplicar o carregamento o usuário pode colocar o programa pra rodar e por sua vez calcular, mostrando todos os resultados presentes na estrutura como: força axial, força cortante, momento fleto, dentre outros. (PROBST, 2013, p.6).

2.7 ESTRUTURAS METALÍCAS

De acordo Pfeil e Pfeil (2009), explicam que o primeiro material siderúrgico empregado na construção foi o ferro fundido, entre 1780 e 1820, sendo utilizado na construção de puentes em arco e treliçadas nos elementos sujeitos à compressão. Os elementos que resistiam aos esforços de tração eram feitos de ferro forjado, que além da excelente resistência à tração, apresentava boa resistência à corrosão.

2.8 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO

As propriedades mecânicas do aço variam bastante devido aos diferentes materiais incorporados a sua liga. Por exemplo, para níveis de carbono mais altos, tanto a resistência do aço quanto a sua fragilidade aumentam e sua resistência à tração diminui, por isso a NBR 8800/2008 define como propriedades do aço para uso em estruturas as da tabela 01.

Tabela 1: Propriedades do aço.

CONSTANTE FÍSICA	VALOR
Modulo de elasticidade, E	200.000 Mpa
Coeficiente de Poisson, ν	0,3
Coeficiente de dilatação térmica, β	$12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ \text{C}^{-1}$
Massa específica, ρ	7.850 kg/m ³
Módulo de elasticidade transversal do aço, G	77.000 Mpa

Fonte: Pfeil e Pfeil, 2009.

2.9 ESTADOS LIMITES

De acordo Pfeil e Pfeil (2009), o estado limite ocorre quando a estrutura não satisfaz mais um de seus objetivos, seja manter a sua estabilidade, seja gerar conforto e segurança para seus usuários. Podendo ser dividido em duas categorias, ou seja, estado limite de serviço e último.

O estado limite de serviço ou de utilização, como também é conhecido, está associado a cargas em serviço e é atingido sempre que a estrutura apresentar vibrações ou deformações excessivas que gerem desconfortos aos seus usuários (PFEIL E PFEIL, 2009).

O estado limite último está associado à ocorrência de cargas excessivas e consequente colapso da estrutura, e pode ser visto como uma condição que deve ser atendida, no qual os esforços solicitantes, S, devem ser menores que os resistentes, R, a diferença entre esses dois esforços é denominada margem de segurança (PFEIL E PFEIL, 2009).

2.10 COEFICIENTE DE PODERAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS

De acordo com a (NBR 8800/2008, p. 22 – 23), o coeficiente de ponderação da resistência é uma constante utilizada para obtenção do valor da resistência de cálculo, e é constituído de parcelas referentes a variabilidade da resistência dos materiais utilizados, a diferença entre a resistência obtida no corpo-de-prova e na estrutura, e a falha na construção. Os valores destes coeficientes são apresentados na tabela 2 conforme a classificação da combinação última de ações.

Tabela 2: Valores dos coeficientes de ponderação das resistências.

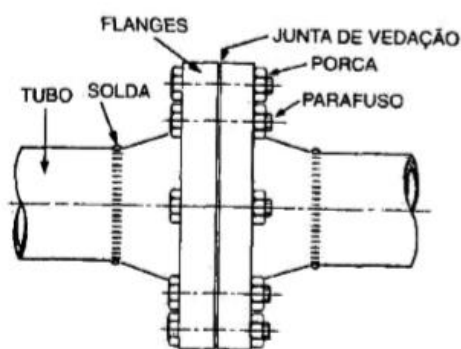
COMBINAÇÕES	AÇÃO ESTRUTURAL γ_a	
	ESCOAMENTO, FLAMBAGEM E INSTABILIDADE γ_{a1}	RUPTURA γ_{a2}
Normais	1,10	1,35
Especiais ou de construções	1,10	1,35
excepcionais	1,00	1,15

Fonte: NBR 8800/2008, p. 23.

2.11 LIGAÇÃO FLANGEADA

Segundo SILVA (2001), uma ligação flangeada é composta de dois flanges, um jogo de parafusos ou estojos com porcas e uma junta de vedação. As ligações flangeadas, que são ligações facilmente desmontáveis, empregam-se principalmente para tubos de 2" ou maiores, em dois casos específicos:

Figura 4: Ligação flangeada.



Fonte: Silva Telles.

2.12 ESFORÇOS

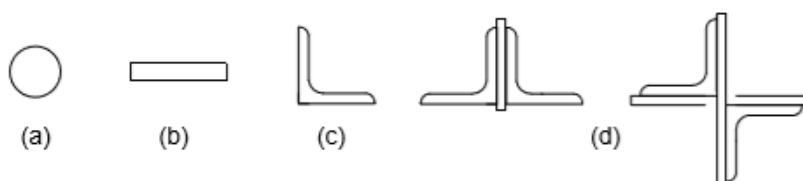
2.12.1 Força axial de tração

De acordo com a NBR 8800/2008, denomina-se peças tracionadas as peças sujeitas a solicitação de tração axial, ou tração simples. As peças tracionadas são empregadas nas estruturas, sob diversas formas, dentre elas:

- Tirantes e pendurais;
- Contraventamentos de torres (estais);
- Tirantes de vigas armadas;
- Barras tracionadas de treliças.

As peças tracionadas podem ser constituídas por barras de seção simples ou composta, como, por exemplo, barras redondas e chatas, como na figura 5.

Figura 5: Estilos de peças que sofrem tração.



Fonte: O autor.

2.12.2 Força axial de compressão

De acordo com a NBR 8800/2008, denomina-se compressão as peças comprimidas axialmente que na maioria dos casos são encontradas em componentes de treliças, sistemas de travamento e em pilares de sistemas contraventados de edifícios. Ao contrário do esforço de tração, que tende a retificar as peças reduzindo o efeito de curvaturas iniciais existentes, o esforço de compressão tende a acentuar esse efeito. Os deslocamentos laterais produzidos compõem o processo conhecido por flambagem por flexão que, em geral, reduz a capacidade de carga da peça em relação ao caso da peça tracionada.

2.12.3 Esforço de flexão

Segundo a NBR 8800/2008, os elementos que sofrem flexão simples, calculam-se, para as seções críticas, o momento e o esforço cortante resistentes de projeto para compará-los aos respectivos esforços solicitantes de projeto.

2.13 AÇÕES

Segundo a NBR 8800 (2008), deve-se levar em consideração de forma geral todas as ações existentes que venham a causar efeitos significativos na estrutura. Para isso, a NBR 8681 (2003) classifica em três pontos, são elas, permanentes, variáveis e excepcionais.

2.13.1 Ações Permanentes

De acordo com Pinto 2013 (ano, p. 27 apud Zampiron, 2003), as ações permanentes estão relacionadas ao longo da vida útil da estrutura apresentam um valor que se mantém constante. As mesmas ainda podem, ser classificadas em diretas, se forem constituídas pelo peso próprio da estrutura, de elementos fixos ou instalações permanentes e outra forma é indireta quando o caso é de imperfeições geométricas.

2.13.2 Ações variáveis

De acordo com Pinto 2013 (ano, p. 27 apud Zampiron, 2003), estão relacionadas com as variações significativas ao longo de toda vida útil. São constituídas pelas cargas acidentais devidas ao uso da estrutura, pelo efeito do vento.

2.13.3 Ações excepcionais

Estas ações mostram tempo muito curto e probabilidade considerada muito baixa para sua ocorrência também na vida útil da estrutura, mas existe a possibilidade de ser consideradas no projeto. O mesmo destaca alguns exemplos dessas

ocorrências, como: efeitos de explosões, sismos, enchentes, incêndios (NBR 8800/2008).

2.14 COMBINAÇÕES DE AÇÕES

A norma NBR 8681 (2003) estabelece como carregamento um conjunto de ações que tem probabilidade não desprezível de ocorrer durante um período préestabelecido. A combinação é feita determinando os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura. Para a verificação dos estados limites últimos e de serviço, essas combinações são divididas respectivamente em últimas e de serviço.

2.14.1 Combinações de ações últimas

De acordo com a intensidade e duração das ações, essas combinações são classificadas em normais, especiais ou de construção e excepcionais. Cada combinação é composta pelas ações permanentes, pela ação variável principal, com seus respectivos valores característicos de ponderação, e pelas demais ações variáveis acompanhadas por seus valores reduzidos de combinações (ZAMPIRON, 2008).

2.14.2 Combinações de ações de serviço

Segundo Zampiron (2008), Essas combinações são classificadas, de acordo com a permanência na estrutura em: quase permanentes, frequentes e raras. São compostas pelas ações permanentes, além das ações variáveis que podem ser tomadas com seus valores quase permanentes, frequentes ou característicos.

3 METODOLOGIA

Esse trabalho foi desenvolvido com o objetivo de apresentar a metodologia para o dimensionamento das barras tubulares circulares de torres autoportantes. Para isto, pesquisou-se todo o procedimento especificado na norma ABNT NBR 8800/2008.

3.1 MODELOS

Dentre os modelos de torres treliçadas autoportantes, existentes como triangular e quadrada foi observado com frequência o de base de seção quadrada que por sua vez foi realizado o estudo.

3.2 DADOS DO PROJETO DA TORRE

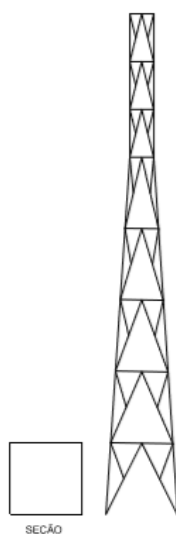
Neste capítulo foi considerado algumas informações geométricas, as quais foram úteis para a elaboração do modelo de torre autoportante treliçada.

- 42m de altura total, sendo 12m da parte reta superior;
- Base inferior de 6m e base superior de 2m;
- Módulos de 4m cada na parte reta superior;
- Módulos de 6m cada na parte inclinada inferior.

3.3 ESCOLHA DO SOFTWARE

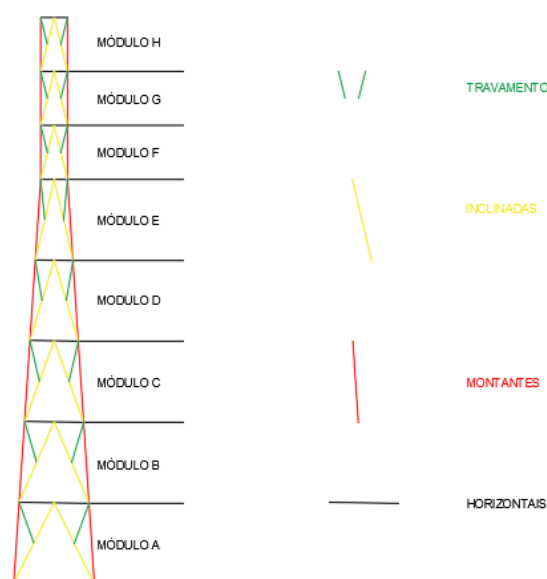
O SAP 2000 foi um software de vital importância para a elaboração desse modelo de torre autoportante, selecionado para realização dos estudos de interesse deste trabalho.

Figura 6: Modelo de base quadrada.



FONTE: Autor.

Figura 7: Módulos e principais peças da estrutura.



Fonte: O autor.

3.4 NORMAS TÉCNICAS UTILIZADAS

- ABNT NBR 6123/1988 - Forças devidas ao vento em edificações;
- ABNT NBR 8800/2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.
- Telebrás, SDT – 240 – 410 – 600: Procedimentos de projeto para torres metálicas auto-suportadas, estaidas e postes metálicos.

3.5 DIMENSIONAMENTO

3.5.1 Análise de carregamento de vento

A tabela 03, resume o cálculo da área efetiva total referente a cada módulo, em que a mesma depende basicamente da largura (b_f) da peça (montante, diagonal e horizontal) e do seu comprimento (L), então, a área efetiva de cada peça foi determinada pela equação 01, posteriormente a área efetiva total é resultante da soma das áreas efetivas das peças de cada módulo.

$$A_{ef,t} = b_f \cdot L \quad (5)$$

Tabela 3: Áreas efetivas por módulos.

MÓDULO	PEÇAS	bf (m)	L (m)	QUANT. PEÇA/FACE	Ae (m²)	Ae (m²) TOTAL
A	MONTANTE	0,1413	6,03	2	1,38	3,38
	DIAGONAL	0,1143	6,72	2	1,54	
	HORIZONTAL	0,1413	5,20	1	0,46	
B	MONTANTE	0,1413	6,03	2	1,38	3,27
	DIAGONAL	0,1143	6,55	2	1,50	
	HORIZONTAL	0,1413	4,40	1	0,39	
C	MONTANTE	0,1413	6,03	2	1,38	3,00
	DIAGONAL	0,1143	6,40	2	1,30	
	HORIZONTAL	0,1413	3,60	1	0,32	
D	MONTANTE	0,1413	6,03	2	1,38	2,90
	DIAGONAL	0,1143	6,28	2	1,28	
	HORIZONTAL	0,1413	2,80	1	0,25	
E	MONTANTE	0,1413	6,03	2	1,38	2,81
	DIAGONAL	0,1143	6,17	2	1,25	
	HORIZONTAL	0,1413	2,00	1	0,18	
F	MONTANTE	0,1413	4,00	2	0,91	1,93
	DIAGONAL	0,1143	4,12	2	0,84	
	HORIZONTAL	0,1413	2,00	1	0,18	
G	MONTANTE	0,1413	4,00	2	0,91	1,93
	DIAGONAL	0,1143	4,12	2	0,84	
	HORIZONTAL	0,1413	2,00	1	0,18	
H	MONTANTE	0,1413	4,00	2	0,91	1,93
	DIAGONAL	0,1143	4,12	2	0,84	
	HORIZONTAL	0,1413	2,00	1	0,18	

Fonte: O autor.

3.5.2 Cargas variáveis

A região escolhida para a estrutura foi a cidade de Caraúbas-RN, cuja velocidade básica do vento (V_0) equivale a 30 m/s obtido de acordo com a (FÍGURA 10) gráfico das isopletras (ANEXO 01); para o fator topográfico (S_1) adotou-se 1,1, cujo valor é referente as variações do relevo do terreno que está indicado pela letra (a) do

item 5.2 da NBR 6123 (TERRENOS PLANOS). Admitiu-se uma região hipotética com Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústrias com auto fator de ocupação.. Esses dados resultam em um fator estatístico igual a 1. O fator rugosidade do terreno (S_2) foi calculado conforme a equação 4, onde os parâmetros meteorológicos (b e p) e o fator rajada (F_r) são constantes, sendo o único fator variável a cota da edificação (z). Os valores de b , p e (F_r) foram retirados da (FÍGURA 12) do anexo A, que são iguais a 0,85, 0,125 (CATEGÓRIA IV e CLASSE B) e 1,00 (CATEGÓRIA II e CLASSE A) respectivamente. A (TABELA 04) a seguir apresenta os valores do fator rugosidade do terreno obtidos:

Tabela 04: Fator de rugosidade do terreno.

MÓDULO	Z (m)	F_r	b	p	S_2
A	6	1	0,85	0,125	0,797
B	12	1	0,85	0,125	0,870
C	18	1	0,85	0,125	0,915
D	24	1	0,85	0,125	0,948
E	30	1	0,85	0,125	0,975
F	34	1	0,85	0,125	0,990
G	38	1	0,85	0,125	1,004
H	42	1	0,85	0,125	1,017
ANTENA 01	24	1	0,85	0,125	0,948
ANTENA 02	38	1	0,85	0,125	1,004
PLATAFORMA 01	12	1	0,85	0,125	0,870
PLATAFORMA 02	30	1	0,85	0,125	0,975

Fonte: O autor.

A partir da definição dos fatores S_1 , S_2 , S_3 e V_0 , é possível determinar a velocidade característica do vento (V_k) para a região em estudo. Essa velocidade é calculada conforme a equação 6 e a pressão dinâmica do vento (q) conforme a equação 7. Os resultados destas grandezas, obtidos para cada módulo da torre, são apresentados na (TABELA 05) a seguir.

$$V_k = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot V_0 \quad (6)$$

$$q = 0,613. (V_k)^2 \quad (7)$$

Tabela 5: Velocidade característica e pressão dinâmica do vento.

MÓDULO	S ₁	S ₂	S ₃	V ₀ (m/s)	V _k (m/s)	q (N/m ²)
A	1	0,797	1	30	23,91	350,44
B	1	0,87	1	30	26,10	417,58
C	1	0,915	1	30	27,45	461,90
D	1	0,948	1	30	28,44	495,81
E	1	0,975	1	30	29,25	524,46
F	1	0,99	1	30	29,70	540,72
G	1	1,004	1	30	30,12	556,12
H	1	1,017	1	30	30,51	570,62
ANTENA 01	1	0,948	1	30	28,44	495,81
ANTENA 02	1	1,004	1	30	30,12	556,12
PLATAFORMA 01	1	0,87	1	30	26,10	417,58
PLATAFORMA 02	1	0,975	1	30	29,25	524,46

Fonte: O autor.

O valor do coeficiente de arrasto (C_a) para barras prismáticas de seção circular, foram obtidos pela FIGURA 14 do ANEXO A. Esses gráficos relacionam o índice de área exposta (φ) com o coeficiente de arrasto (C_a). O índice de área exposta (φ) é definido como sendo a razão entre a área frontal efetiva da torre (A_e) e a área frontal da superfície (A) limitada pelo contorno, conforme equação 8.

$$\varphi = \frac{A_e}{A} \quad (8)$$

Tabela 6: Índice de área exposta.

MÓDULO	A _e (m ²)	A (m ²)	φ
A	3,38	36,18	0,1
B	3,27	26,53	0,1
C	3,00	21,71	0,1
D	2,90	16,88	0,2
E	2,81	12,06	0,2
F	1,93	8,0	0,2
G	1,93	8,0	0,2
H	1,93	8,0	0,2

Fonte: O autor.

Tabela 7: Coeficiente de arrasto para vento a 0°.

MÓDULO	C _a
A	2,10
B	2,10
C	2,10
D	1,85
E	1,85
F	1,85
G	1,85
H	1,85

Fonte: O autor.

Para a situação de vento incidindo a 45°, conforme apresentado na equação 9, multiplicou-se o coeficiente de arrasto (C_a) pelo fator de correção (K_α), que equivale a 1,16.

$$C_{a\alpha} = K_{\alpha} \cdot C_a \quad (9)$$

Tabela 8: Coeficiente de arrasto para vento a 45°.

MÓDULO	Ka	Ca	Caα
A	1,16	2,10	2,436
B	1,16	2,10	2,436
C	1,16	2,10	2,436
D	1,16	1,85	2,146
E	1,16	1,85	2,146
F	1,16	1,85	2,146
G	1,16	1,85	2,146
H	1,16	1,85	2,146

Fonte: O autor.

A força de arrasto (F_a) foram calculadas conforme a equação 10. Nas (TABELA 08) e (TABELA 09), encontram-se os valores da (F_a) obtidos para cada módulo da torre.

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_e \quad (10)$$

Tabela 9: Força de arrasto incidindo a 0°.

MÓDULO	q (N/m²)	Ae (m²)	Ca	Fa (N)
A	350,44	3,38	2,10	2487,42
B	417,58	3,27	2,10	2867,52
C	461,9	3,00	2,10	2909,97
D	495,81	2,90	1,85	2660,02
E	524,46	2,81	1,85	2726,41
F	540,72	1,93	1,85	1930,64
G	556,12	1,93	1,85	1985,63
H	570,62	1,93	1,85	2037,40

Fonte: O autor.

Tabela 10: Força de arrasto incidindo a 45°.

MÓDULO	q (N/m ²)	A _e (m ²)	C _a α	F _a (N)
A	350,44	3,38	2,436	2885,4
B	417,58	3,27	2,436	3326,3
C	461,9	3,00	2,436	3375,6
D	495,81	2,90	2,146	3085,6
E	524,46	2,81	2,146	3162,6
F	540,72	1,93	2,146	2239,5
G	556,12	1,93	2,146	2303,3
H	570,62	1,93	2,146	2363,4

Fonte: O autor.

Como todas as plataformas encontram-se alinhadas com as horizontais, a força de arrasto (F_a) atuante sobre as mesmas já foram consideradas. Já para as antenas, foi mantido o coeficiente de arrasto original de projeto igual a 1,6 a (TABELA 10) a seguir, apresenta seus respectivos valores.

Tabela 11: Força de arrasto das antenas.

MÓDULO	d (m)	A _e (m ²)	C _a	F _a (N) 0°	F _a (N) 45°
ANTENA 01	1,2	1,131	1,6	897,23	1040,78
ANTENA 02	1,2	1,131	1,6	1006,36	1167,38

Fonte: O autor.

As forças totais de arrasto em cada módulo, para a situação de vento incidindo perpendicularmente (0°) e a 45°, são apresentada na (TABELA 12) e (TABELA 13), respectivamente, abaixo:

Tabela 12: Força de arrasto total para o vento incidindo a 0°.

MÓDULO	Fa - PEÇAS (N)	Fa - ANTENA (N)	Fa - TOTAL (N)
A	2487,42		2487,42
B	2867,52		2867,52
C	2909,97		2909,97
D	2660,02	897,23	3557,25
E	2726,41		2726,41
F	1930,64		1930,64
G	1985,63	1006,36	2991,99
H	2037,40		2037,40

Fonte: O autor.

Tabela 13: Força de arrasto total para vento incidindo a 45°.

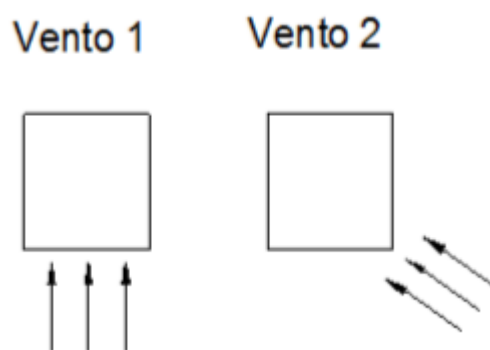
MÓDULO	Fa - PEÇAS (N)	Fa - ANTENA (N)	Fa - TOTAL (N)
A	2885,41		2885,41
B	3326,33		3326,33
C	3375,57		3375,57
D	3085,62	1040,78	4126,41
E	3162,63		3162,63
F	2239,54		2239,54
G	2303,33	1167,38	3470,70
H	2363,38		2363,38

Fonte: O autor.

A distribuição da força de arrasto foi distribuída ao longo da estrutura de acordo com a NBR 6123/1988 e conforme apresentado na FÍGURA 07. Então teremos para torres de seção quadrada, o vento atuando perpendicularmente e a 45°.

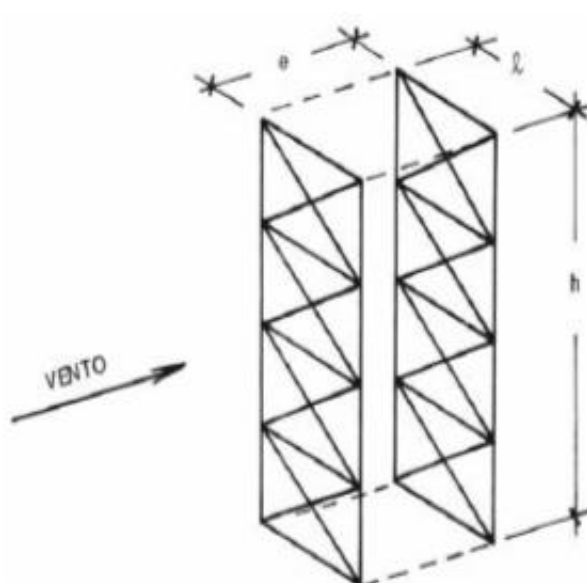
Para o caso 01 foi necessário a determinação do fator de correção η , que está diretamente relacionado com o afastamento relativo (e/h), FÍGURA 08 e o índice de área exposta ϕ .

Figura 8: Direção do vento em relação a estrutura.



Fonte: O autor.

Figura 9: Distribuição da força.



Fonte: O autor.

Flachsbart e Winter (1935) surgere a equação para determinação do fator de proteção η , pela visão de valores mais precisos.

$$\eta = 1,15 \cdot [1 - 1,45 \cdot \varphi \cdot (e/h)^{-0,25}] \quad (11)$$

Para o cálculo do fator de proteção η , foi utilizado como referência a base de cada módulo, a tabela 14 a seguir, apresenta os valores do fator de proteção η .

Tabela 14: Fator de proteção.

MÓDULO	e	h	e/h	ϕ	η
A	5,2	6	0,9	0,1	0,99
B	4,4	6	0,7	0,1	0,93
C	3,6	6	0,6	0,1	0,89
D	2,8	6	0,5	0,2	0,80
E	2,0	5	0,4	0,2	0,66
F	2,0	5	0,4	0,2	0,64
G	2,0	5	0,4	0,2	0,64
H	2,0	2	1,0	0,2	0,75

Fonte: O autor.

As TABELAS 15 e TABELA 16 apresentam os valores das componentes das forças correspondentes aos casos 01 (Vento incidindo a zero grau na estrutura) e 02 (Vento incidindo a 45° na estrutura) respectivamente

Tabela 15: Forças resultante nas faces da torre caso 01.

MÓDULO	F _a (N)	FACES	F FACES (N) η	F FACES (N)
A	2487,42	I	0,50	1249,961
		II		
		III	0,50	1237,462
		IV		
B	2867,52	I	0,52	1485,763
		II		
		III	0,48	1381,759
		IV		
C	2909,97	I	0,53	1539,667
		II		
		III	0,47	1370,303
		IV		
D	3557,25	I	0,56	1976,250
		II		
		III	0,44	1581,000
		IV		
E	2726,41	I	0,60	1642,413
		II		
		III	0,40	1083,992
		IV		
F	1930,64	I	0,61	1177,220
		II		
		III	0,39	753,421
		IV		
G	2991,99	I	0,61	1824,382
		II		
		III	0,39	1167,604
		IV		
H	2037,40	I	0,57	1164,228
		II		
		III	0,43	873,171
		IV		

Fonte: O autor.

Tabela 16: Força resultante nas faces da torre caos 02.

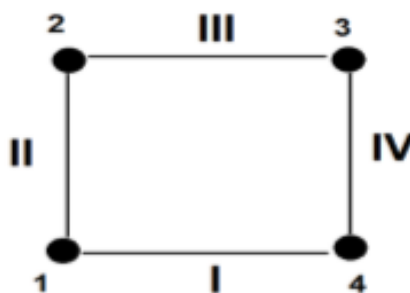
MÓDULO	F _a (N)	FACES	F FACES (N)		F FACES (N)		
			η	t	η	t	R
A	2885,41	I	0,2	0,2	577,1	577,1	816,1
		II	0,2	0,2	577,1	577,1	816,1
		III	0,15	0,15	432,8	432,8	612,1
		IV	0,15	0,15	432,8	432,8	612,1
B	3326,33	I	0,2	0,2	665,3	665,3	940,8
		II	0,2	0,2	665,3	665,3	940,8
		III	0,15	0,15	498,9	498,9	705,6
		IV	0,15	0,15	498,9	498,9	705,6
C	3375,57	I	0,2	0,2	675,1	675,1	954,8
		II	0,2	0,2	675,1	675,1	954,8
		III	0,15	0,15	506,3	506,3	716,1
		IV	0,15	0,15	506,3	506,3	716,1
D	4126,41	I	0,2	0,2	825,3	825,3	1167,1
		II	0,2	0,2	825,3	825,3	1167,1
		III	0,15	0,15	619,0	619,0	875,3
		IV	0,15	0,15	619,0	619,0	875,3
E	3162,63	I	0,2	0,2	632,5	632,5	894,5
		II	0,2	0,2	632,5	632,5	894,5
		III	0,15	0,15	474,4	474,4	670,9
		IV	0,15	0,15	474,4	474,4	670,9
F	2239,54	I	0,2	0,2	447,9	447,9	633,4
		II	0,2	0,2	447,9	447,9	633,4
		III	0,15	0,15	335,9	335,9	475,1
		IV	0,15	0,15	335,9	335,9	475,1
G	3470,70	I	0,2	0,2	694,1	694,1	981,7
		II	0,2	0,2	694,1	694,1	981,7
		III	0,15	0,15	520,6	520,6	736,2
		IV	0,15	0,15	520,6	520,6	736,2
H	2363,38	I	0,2	0,2	472,7	472,7	668,5
		II	0,2	0,2	472,7	472,7	668,5
		III	0,15	0,15	354,5	354,5	501,3
		IV	0,15	0,15	354,5	354,5	501,3

Fonte: O autor.

- *Componente normal a face.
- **Componente paralelo a face.
- ***Resultante da força a face.

Os vértices da torre foram dispostos conforme a FÍGURA 09, e a partir da obtenção das forças resultantes nessas faces, determinou-se a parcela de força a ser aplicada em cada vértice do modelo, conforme demonstrado nas TABELAS 19 e TABELA 20.

Figura 10: Vértice da torre.



Fonte: O autor.

Tabela 17: Força de arrasto distribuída por vértice caso 01.

MÓDULO	VÉRTICES	F VÉRTICES (N)
A	1	624,98
	2	618,73
	3	618,73
	4	624,98
B	1	742,88
	2	690,88
	3	690,88
	4	742,88
C	1	769,83
	2	685,15
	3	685,15
	4	769,83
D	1	988,13
	2	790,50
	3	790,50
	4	988,13
E	1	821,21
	2	542,00
	3	542,00
	4	821,21
F	1	588,61
	2	376,71
	3	376,71
	4	588,61
G	1	912,19
	2	583,80
	3	583,80
	4	912,19
H	1	582,11
	2	436,59
	3	436,59
	4	582,11

Fonte: O autor.

Tabela 18: Força de arrasto distribuída por vértice - caso 02.

MÓDULO	VÉRTICES	F VÉRTICES (N)	F _x (N)	F _y (N)
A	1	816,12	577,08	577,08
	2	714,10	504,95	504,95
	3	612,09	432,81	432,81
	4	714,10	504,95	504,95
B	1	940,83	665,27	665,27
	2	823,22	582,11	582,11
	3	705,62	498,95	498,95
	4	823,22	582,11	582,11
C	1	954,75	675,11	675,11
	2	835,41	590,72	590,72
	3	716,07	506,33	506,33
	4	835,41	590,72	590,72
D	1	1167,12	825,28	825,28
	2	1021,23	722,12	722,12
	3	875,34	618,96	618,96
	4	1021,23	722,12	722,12
E	1	894,53	632,53	632,53
	2	782,71	553,46	553,46
	3	670,90	474,39	474,39
	4	782,71	553,46	553,46
F	1	633,44	447,91	447,91
	2	554,26	391,92	391,92
	3	475,08	335,93	335,93
	4	554,26	391,92	391,92
G	1	981,66	694,14	694,14
	2	858,96	607,37	607,37
	3	736,25	520,61	520,61
	4	858,96	607,37	607,37
H	1	668,47	472,68	472,68
	2	584,91	413,59	413,59
	3	501,35	354,51	354,51
	4	584,91	413,59	413,59

Fonte: O autor.

3.6 ESFORÇO SOLICITANTE

3.6.1 Esforço solicitante

Para o cálculo dos esforços solicitantes foi considerado algumas Casos que foram necessárias para a relaização das combinações realizadas no software SAP 2000, são elas:

1. Cargas permanentes:
 - Peso próprio da estrutura;
 - Peso das antenas;
 - Peso das plataformas
2. Cargas acidentais:
 - Peso de pessoas para manutenção;
 - Peso de equipamentos auxiliares para instalações de antenas.
 - Vento.

Dentre os casos existentes foram levados em consideração para as antenas e plataformas o vento incidindo a 0° e 45° . Segue abaixo os casos gerias considerados:

- Casos gerais:

DEAD

Vento 01

Vento 02

Antena 01 / vento 01

Antena 01 / vento 02

Antena 02 / vento 01

Antena 02 / vento 02

Plataforma 01 / vento 01

Plataforma 01 / vento 02

Plataforma 02 / vento 01

Plataforma 02 / vento 02

Pessoas para manutenção

Equipamentos auxiliares

Depois de inserir todos os casos, foi atribuído os pesos (forças) a cada um. A força de vento que incide na estrutura, também irá incidir nas antenas, então, a mesma força de vento que incide na estrutura foi atribuída a antena na sua determinada altura de localização na estrutura, considerando o vento perpendicularmente quanto a 45°. Da mesma forma foi realizado para as plataformas.

Foi levado em consideração o peso de pessoas que realizam as devidas manutenções na estrutura, logo de acordo com a SDT 240 – 410 – 600, o peso de 4 pessoas de 70 kg foi transformado em força, qual, foi inserida ao longo de toda estrutura. Além disso, foi considerado o peso dos equipamentos auxiliares para instalação de antenas que é equivalente a 150 kg, o mesmo foi transformado em força e inserido ao longo de toda estrutura. O peso próprio (DEAD) da estrutura já é considerado pelo software SAP 2000. A TABELA 19 mostra todos os pesos referidos a cada caso.

Tabela 19: Peso dos casos existentes.

Antena 01 Hipotese 01		897,23 N	
Antena 01 Hipotese 02		1040,78 N	
Antena 02 Hipotese 01		1006,36 N	
Antena 02 Hipotese 02		1176,38 N	
Plataforma 01 Hipotese 01		742,88 N	
		690,88 N	
		690,88 N	
		742,88 N	
Plataforma 01 Hipotese 02		Fx	Fy
		665,27 N	665,27 N
		582,11 N	582,11 N
		498,95 N	498,95 N
		582,11 N	582,11 N
Plataforma 02 Hipotese 01		821,21 N	
		542 N	
		542 N	
		821,21 N	
Plataforma 02 Hipotese 02		Fx	Fy
		632,53 N	632,53 N
		553,46 N	553,46 N
		474,39 N	474,39 N
		553,46 N	553,46 N
Pessoas para manutenção	280 kg	2745,862 N	
Equipamentos auxiliares	150 kg	1470,9975 N	

Fonte: O autor.

3.6.2 Combinações de ações

As combinações de ações foram realizada no próprio software SAP 2000. Dentre os casos existentes foram realizadas 4 combinações de ações para o modelo estudado (totalmente rotulado). De acordo com a NBR 8681 o coeficiente de ponderação para ação permanente foi considerado de 1,25 e para a ação variável foi de 1,4.

Para o modelo parcialmente rotulado:

- Combinação 01:

DEAD

Hipotese 01

Antena 01 / hipotese 01

Plataforma 01 / hipotese 01

Pessoas para manutenção

Equipamentos auxiliares

- Combinação 02

DEAD

Hipotese 01

Antena 01 / hipotese 02

Plataforma 01 / hipotese 02

Pessoas para manutenção

Equipamentos auxiliares

- Combinação 03

DEAD

Hipotese 02

Antena 02 / hipotese 01

Plataforma 02 / hipotese 01

Pessoas para manutenção

Equipamentos auxiliares

- Combinação 04

DEAD

Hipotese 02

Antena 02 / hipotese 02

Plataforma 02 / hipotese 02

Pessoas para manutenção

Equipamentos auxiliares

3.6.2 Esforço resistente

3.6.2.1 Tração

De acordo com o item 5.2, pag. 37, da NBR 8800/2008, aplica-se a barras prismáticas submetidas a força axial de tração, incluindo barras ligadas por pinos e barras redondas com extremidades rosquedas. Então, no dimensionamento deve ser atendida a condição:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd}$$

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.

A força axial de tração resistente de cálculo foi a menor obtida entre as duas equações abaixo.

- Para escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (12)$$

- Para ruptura da seção líquida:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_c \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \quad (13)$$

Onde:

A_g : é a área bruta da seção transversal da barra;

A_c : é a área líquida efetiva da seção transversal da barra, determinada conforme a expressão seguinte;

f_y : é a resistência ao escoamento do aço;

A_g : é a resistência à ruptura do aço.

A área líquida efetiva de uma barra, A_c , foi determinada por:

$$A_c = C_t \cdot A_n \quad (14)$$

Onde:

C_t : coeficiente de redução da área líquida;

A_n : é a área líquida da barra.

Tabela 20: Barras submetidas à força axial de tração - montante.

Atender					$N_{t,sd} \leq N_{t,rd}$					S. bruta	Seção I.	Índice de esbeltez		
Mód.	d (cm)	A_g (cm ²)	C_t	A_n (cm ²)	A_e (cm ²)	f_y (KN/cm ²)	f_u (KN/cm ²)	Y_{a1}	Y_{a2}	$N_{t,rd}$ (KN)	$N_{t,rd}$ (KN)	L	r	$\lambda \leq$ 300
A	14,13	21,4	1	21,4	21,4	25	40	1,10	1,35	486,4	634,1	602,7	4,42	143,5
B	14,13	21,4	1	21,4	21,4	25	40	1,10	1,35	486,4	634,1	602,7	4,42	143,5
C	14,13	21,4	1	21,4	21,4	25	40	1,10	1,35	486,4	634,1	602,7	4,42	143,5
D	14,13	21,4	1	21,4	21,4	25	40	1,10	1,35	486,4	634,1	602,7	4,42	143,5
E	14,13	21,4	1	21,4	21,4	25	40	1,10	1,35	486,4	634,1	602,7	4,42	143,5
F	14,13	21,4	1	21,4	21,4	25	40	1,10	1,35	486,4	634,1	400	4,42	95,24
G	14,13	21,4	1	21,4	21,4	25	40	1,10	1,35	486,4	634,1	400	4,42	95,24
H	14,13	21,4	1	21,4	21,4	25	40	1,10	1,35	486,4	634,1	400	4,42	95,24

Fonte: O autor.

Tabela 21: Barras submetidas à força axial de tração - diagonal.

Atender					$N_{t,sd} \leq N_{t,rd}$					S. bruta	Seção l.	Índice de esbeltez		
Mód.	d (cm)	A _g (cm ²)	C _t	A _n (cm ²)	A _e (cm ²)	f _y (KN/cm ²)	f _u (KN/cm ²)	Y _{a1}	Y _{a2}	N _{t,rd} (KN)	N _{t,rd} (KN)	L	r	$\lambda \leq$ 300
A	11,43	35,7	1	35,7	35,7	25	40	1,10	1,35	811,4	1057,8	336	3,67	91,5
B	11,43	35,7	1	35,7	35,7	25	40	1,10	1,35	811,4	1057,8	327,5	3,67	89,23
C	11,43	35,7	1	35,7	35,7	25	40	1,10	1,35	811,4	1057,8	320,1	3,67	87,2
D	11,43	35,7	1	35,7	35,7	25	40	1,10	1,35	811,4	1057,8	313,8	3,67	85,5
E	11,43	35,7	1	35,7	35,7	25	40	1,10	1,35	811,4	1057,8	308,7	3,67	84,1
F	11,43	35,7	1	35,7	35,7	25	40	1,10	1,35	811,4	1057,8	206	3,67	56,13
G	11,43	35,7	1	35,7	35,7	25	40	1,10	1,35	811,4	1057,8	206	3,67	56,13
H	11,43	35,7	1	35,7	35,7	25	40	1,10	1,35	811,4	1057,8	206	3,67	56,13

Fonte: O autor.

Tabela 22: Barras submetidas à força axial de tração - horizontal.

Atender					$N_{t,sd} \leq N_{t,rd}$					S. bruta	Seção l.	Índice de esbeltez		
Mód.	d (cm)	A _g (cm ²)	C _t	A _n (cm ²)	A _e (cm ²)	f _y (KN/cm ²)	f _u (KN/cm ²)	Y _{a1}	Y _{a2}	N _{t,rd} (KN)	N _{t,rd} (KN)	L	r	$\lambda \leq$ 300
A	14,13	21,4	1	21,4	21,4	25	40	1,10	1,35	486,4	634,1	520,0	4,82	107,9
B	14,13	21,4	1	21,4	21,4	25	40	1,10	1,35	486,4	634,1	440,0	4,82	91,3
C	14,13	21,4	1	21,4	21,4	25	40	1,10	1,35	486,4	634,1	360,0	4,82	74,7
D	14,13	21,4	1	21,4	21,4	25	40	1,10	1,35	486,4	634,1	280,0	4,82	58,1
E	14,13	21,4	1	21,4	21,4	25	40	1,10	1,35	486,4	634,1	200,0	4,82	41,5
F	14,13	21,4	1	21,4	21,4	25	40	1,10	1,35	486,4	634,1	200	4,82	41,5
G	14,13	21,4	1	21,4	21,4	25	40	1,10	1,35	486,4	634,1	200	4,82	41,5
H	14,13	21,4	1	21,4	21,4	25	40	1,10	1,35	486,4	634,1	200	4,82	41,5

Fonte: O autor.

3.6.2.2 Compressão

De acordo com o item 5.3.1, pag. 43, da NBR 8800/2008, o esforço submetido a força axial de compressão deve ser atendida a condição:

$$N_{c,SD} \leq N_{c,Rd}$$

Onde:

$N_{c,Ed}$: é a força axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{c,Rd}$: é a força axial de compressão resistente de cálculo. determinada conforme a equação a seguir.

A força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, de uma barra, associada aos estados limites últimos de instabilidade por flexão, por torção ou flexo-torção e de flambagem local, foi determinada pela expressão abaixo.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (15)$$

Onde:

χ : é o fator de redução associado à resistência à compressão, determinado pela tabela 03.

Q : é o fator de redução total associado a flambagem local.

Então, antes de calcular o fator de redução associado à resistência à compressão, foi encontrado o valor do índice de esbeltez reduzido, λ_0 , que foi obtido pela expressão abaixo.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} \quad (16)$$

Onde:

N_e : força axial de flambagem elástica.

Sendo assim, como o fator de redução associado à resistência a compressão variam de acordo com o índice de esbeltez reduzido λ_0 , então, para valores de λ_0 inferiores ou iguais à 1,5, χ foi determinado pela equação 06. Para os demais valores

do índice de esbeltez reduzido, determina-se o fator de redução associado à resistência à compressão conforme indicado na equação 16.

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (17)$$

$$\chi = \frac{0.877}{\lambda_0^2} \quad (18)$$

O cálculo da força axial de flambagem elástica, foi determinado em relação aos eixos principais de inércia e para flambagem por torção e posteriormente escolhido o menor valor entre os três como segue a formulação abaixo.

Para o eixo x e y:

$$N_e = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2} \quad (19)$$

Para o eixo z:

$$N_e = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] \quad (20)$$

Onde:

KL: comprimento de flambagem por flexão em relação a um dos eixos principais de inércia;

I: momento de inércia de seção transversal em relação a um dos eixos principais de inércia;

$K_z L_z$: Coeficiente de flambagem por torção;

E: módulo de elasticidade do aço;

C_w : contante 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 abaixo:

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2)} \quad (21)$$

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.

Os perfis de seções tubulares são classificados como elementos AA, pois tem duas bordas vinculadas.

$$Q = 1,00 \quad \text{para} \quad \frac{D}{t} \leq 0,11 \frac{E}{f_y} \quad \text{Condição 01}$$

Onde:

D: diâmetro externo da seção tubular circular;

t: espessura da parede;

E: módulo de elasticidade do aço;

f_y : resistência ao escoamento de aço.

3.6.2.2.1 Montante

Para encontra o valor de Q (Flambagem local das barras), utilizou a condição de número 01, a (TABELA 16, TABELA 19 e a TABELA 22) resumi os cálculos para essa situação, logo esta condição foi válida para os três tramos (montante, diagonal e horizontal):

Tabela 23: Flambagem local das barras axialmente comprimidas.

Modulo	D (cm)	t (cm)	E (KN/cm ²)	f _y (KN/cm ²)	D/t	E/f _y	D/t ≤ E/f _y	Q
A	14,13	0,5	20000	25	28,26	800	OK	1,0
B	14,13	0,5	20000	25	28,26	800	OK	1,0
C	14,13	0,5	20000	25	28,26	800	OK	1,0
D	14,13	0,5	20000	25	28,26	800	OK	1,0
E	14,13	0,5	20000	25	28,26	800	OK	1,0
F	14,13	0,5	20000	25	28,26	800	OK	1,0
G	14,13	0,5	20000	25	28,26	800	OK	1,0
H	14,13	0,5	20000	25	28,26	800	OK	1,0

Fonte: O autor.

Foram calculadas as forças axial de flambagem elástica para os três eixos, de acordo com a equação 19 e equação 20 e dentre os três valores obtidos foi escolhido o menor valor entre os três obtidos para efetuar o cálculo do índice de esbeltez reduzido, a (TABELA 17) representa o resumo do cálculo da força axial de flambagem elástica, sendo assim, esse raciocínio seguiu para todos os tramos (montante, diagonal e horizontal).

Tabela 24: Força axial de flambagem elástica.

π	3,14		E (KN/cm ²)	20000				C _w	0	G (KN/cm ²)	7700	
I _x (cm)	I _y (cm)	K _x L _x (cm)	K _y L _y (cm)	r _x	r _y	x ₀	y ₀	r ₀	J (cm)	N _{ex}	N _{ey}	N _{ez}
498	498	602,7	602,66	4,82	4,82	0	0	5,05	996	270,38	270,38	165054
498	498	602,7	602,66	4,82	4,82	0	0	5,13	996	270,38	270,38	165054
498	498	602,7	602,66	4,82	4,82	0	0	5,19	996	270,38	270,38	165054
498	498	602,7	602,66	4,82	4,82	0	0	5,23	996	270,38	270,38	165054
498	498	602,7	602,7	4,82	4,82	0	0	5,29	996	270,38	270,38	165054
498	498	400	400	4,82	4,82	0	0	5,33	996	613,76	613,76	165054
498	498	400	400	4,82	4,82	0	0	5,37	996	613,76	613,76	165054
498	498	400	400	4,82	4,82	0	0	5,40	996	613,76	613,76	165054

Fonte: O autor.

Dessa forma, sabendo qual foi a força axial de flambagem elástica, foi possível obter o valor do índice de esbelteza pela equação 16, em seguida com o auxílio da equação 17 e equação 18 obteve-se o fator de redução associado à resistência à compressão, χ , por fim obteve-se a resistência à compressão $N_{t,rd}$ por meio da equação 15 a (TABELA 18, TABELA 21 e a TABELA 24), representa esse raciocínio.

Tabela 25: Barras submetidas à força axial de compressão.

Atender			$N_{c,sd} \leq N_{c,rd}$							
A_g	f_y (KN/cm ²)	Y_{a1}	Q	N_e	λ_0	χ	$N_{t,rd}$	L	r	$\lambda \leq 200$
21,4	25	1,10	1,0	270,38	1,407	0,443	215,57	602,66	4,82	125,03
21,4	25	1,10	1,0	270,38	1,407	0,443	215,57	602,66	4,82	125,03
21,4	25	1,10	1,0	270,38	1,407	0,443	215,57	602,66	4,82	125,03
21,4	25	1,10	1,0	270,38	1,407	0,443	215,57	602,66	4,82	125,03
21,4	25	1,10	1,0	270,38	1,407	0,443	215,57	602,66	4,82	125,03
21,4	25	1,10	1,0	613,76	0,934	0,694	337,69	400	4,82	82,99
21,4	25	1,10	1,0	613,76	0,934	0,694	337,69	400	4,82	82,99
21,4	25	1,10	1,0	613,76	0,934	0,694	337,69	400	4,82	82,99

Fonte: O autor.

3.6.2.2.2 Diagonal

Tabela 26: Flambagem local das barras axialmente comprimidas.

Modulo	D (cm)	t (cm)	E (KN/cm ²)	f_y (KN/cm ²)	D/t	E/ f_y	D/t $\leq$ E/ f_y	Q
A	11,43	1,1	20000	25	10,39	800	OK	1,0
B	11,43	1,1	20000	25	10,39	800	OK	1,0
C	11,43	1,1	20000	25	10,39	800	OK	1,0
D	11,43	1,1	20000	25	10,39	800	OK	1,0
E	11,43	1,1	20000	25	10,39	800	OK	1,0
F	11,43	1,1	20000	25	10,39	800	OK	1,0
G	11,43	1,1	20000	25	10,39	800	OK	1,0
H	11,43	1,1	20000	25	10,39	800	OK	1,0

Fonte: O autor.

Tabela 27: Força axial de flambagem elástica.

π	3,14		E (KN/cm ²)	20000			C _w	0		G (KN/cm ²)	7700	
I _x (cm)	I _y (cm)	K _x L _x (cm)	K _y L _y (cm)	r _x	r _y	x0	y _o	r ₀	J (cm)	N _{ex}	N _{ey}	N _{ez}
482	482	336,0	336,0	3,67	3,67	0	0	5,19	963	841,87	841,87	275267,5
482	482	327,5	327,5	3,67	3,67	0	0	5,19	963	885,8	885,8	275267,5
482	482	320,2	320,2	3,67	3,67	0	0	5,19	963	927,28	927,28	275267,5
482	482	313,8	313,8	3,67	3,67	0	0	5,19	963	964,95	964,95	275267,5
482	482	308,7	308,7	3,67	3,67	0	0	5,19	963	997,35	997,35	275267,5
482	482	206	206	3,67	3,67	0	0	5,19	963	2236,40	2236,40	275267,5
482	482	206	206	3,67	3,67	0	0	5,19	963	2236,40	2236,40	275267,5
482	482	206	206	3,67	3,67	0	0	5,19	963	2236,40	2236,40	275267,5

Fonte: O autor.

Tabela 28: Barras submetidas à força axial de compressão.

Atender			N _{c,sd} ≤ N _{c,rd}							
A _g	f _y (KN/cm ²)	Y _{a1}	Q	N _e	λ ₀	χ	N _{t,rd}	L (cm)	r (cm)	λ ≤ 200
35,7	25	1,10	1,0	841,87	1,03	0,827	671,2	336,01	3,67	91,55
35,7	25	1,10	1,0	885,8	1,004	0,870	706,23	327,57	3,67	89,26
35,7	25	1,10	1,0	927,28	0,981	0,911	739,3	320,16	3,67	87,24
35,7	25	1,10	1,0	964,95	0,962	0,948	769,33	313,85	3,67	85,52
35,7	25	1,10	1,0	997,35	0,946	0,980	795,16	308,71	3,67	84,12
35,7	25	1,10	1,0	2236,40	0,632	0,846	686,55	206	3,67	56,17
35,7	25	1,10	1,0	2236,40	0,632	0,846	686,55	206	3,67	56,17
35,7	25	1,10	1,0	2236,40	0,632	0,846	686,55	206	3,67	56,17

Fonte: O autor.

3.6.2.2.3 Horizontal

Tabela 29: Flambagem local das barras axialmente comprimidas.

Modulo	D (cm)	t (cm)	E (KN/cm ²)	f _y (KN/cm ²)	D/t	E/f _y	D/t ≤ E/f _y	Q
1	14,13	0,5	20000	25	28,26	800	OK	1,0
2	14,13	0,5	20000	25	28,26	800	OK	1,0
3	14,13	0,5	20000	25	28,26	800	OK	1,0
4	14,13	0,5	20000	25	28,26	800	OK	1,0
5	14,13	0,5	20000	25	28,26	800	OK	1,0
6	14,13	0,5	20000	25	28,26	800	OK	1,0
7	14,13	0,5	20000	25	28,26	800	OK	1,0
8	14,13	0,5	20000	25	28,26	800	OK	1,0

Fonte: O autor.

Tabela 30: Força axial de flambagem elástica.

π	3,14		E (KN/cm ²)	20000				C _w	0	G (KN/cm ²)	7700	
I _x (cm)	I _y (cm)	K _x L _x (cm)	K _y L _y (cm)	r _x	r _y	x ₀	y ₀	r ₀	J (cm)	N _{ex}	N _{ey}	N _{ez}
496	496	260	260	4,82	4,82	0	0	6,82	996	1446,85	1446,85	165054
496	496	220	220	4,82	4,82	0	0	6,82	996	2020,81	2020,81	165054
496	496	180	180	4,82	4,82	0	0	6,82	996	3018,74	3018,74	165054
496	496	140	140	4,82	4,82	0	0	6,82	996	4990,16	4990,16	165054
496	496	100	100	4,82	4,82	0	0	6,82	996	9780,72	9780,72	165054
496	496	100	100	4,82	4,82	0	0	6,82	996	9780,72	9780,72	165054
496	496	100	100	4,82	4,82	0	0	6,82	996	9780,72	9780,72	165054
496	496	100	100	4,82	4,82	0	0	6,82	996	9780,72	9780,72	165054

Fonte: O autor.

Tabela 31: Barras submetidas à força axial de compressão.

Atender			$N_{c,sd} \leq N_{c,rd}$							
A_g	f_y (KN/cm ²)	Y_{a1}	Q	N_e	λ_0	χ	$N_{t,rd}$	L	r	$\lambda \leq 200$
21,4	25	1,10	1,0	1446,85	0,608	2,372	1153,54	260	4,82	53,94
21,4	25	1,10	1,0	2020,81	0,515	3,313	1611,14	220	4,82	45,64
21,4	25	1,10	1,0	3018,74	0,421	0,929	451,59	180	4,82	37,34
21,4	25	1,10	1,0	4990,16	0,327	0,956	465,02	140	4,82	29,05
21,4	25	1,10	1,0	9780,72	0,234	0,977	475,36	100	4,82	20,75
21,4	25	1,10	1,0	9780,72	0,234	0,977	475,36	100	4,82	20,75
21,4	25	1,10	1,0	9780,72	0,234	0,977	475,36	100	4,82	20,75
21,4	25	1,10	1,0	9780,72	0,234	0,977	475,36	100	4,82	20,75

Fonte: O autor.

3.6.2.3 Flexão

De acordo com o item 5.4.1.1, pag. 46, da NBR 8800/2008, que está relacionado com uma das condições deste trabalho que é seções tubulares circulares fletidas em relação a qualquer eixo que passe pelo centro geométrico. Sendo assim, foi obedecido as seguintes condições abaixo:

$$M_{sd} \leq M_{Rd}$$

Onde:

M_{sd} : momento fletor resistente de cálculo;

M_{Rd} : é o momento fletor resistente de cálculo;

3.8.3.1 Momento fletor resistente de cálculo

O momento fletor de cálculo para seção tubular circular, foi determinado pelas equações que segue abaixo.

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \quad \text{para } \lambda \leq \lambda_p \quad \text{seção compacta} \quad (22)$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left(\frac{0,021E}{D/t} + f_y \right) W, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad \text{seção semi - compacta} \quad (23)$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left(\frac{0,33E}{D/t} \right) W, \text{ para } \lambda > \lambda_r \quad \text{seção esbelta} \quad (24)$$

Com:

$$\lambda = \frac{D}{t} \quad (25)$$

$$\lambda_p = 0,07 \frac{E}{f_y} \quad (26)$$

$$\lambda_r = 0,31 \frac{E}{f_y} \quad (27)$$

Tabela 32: Valores da relação largura - espessura - montante

D (cm)	t (cm)	E (KN/cm ²)	f _y (KN/cm ²)	λ	λ _p	λ _r	λ ≤ λ _p
14,13	0,5	20000	25	28,26	56	248	Compacta
14,13	0,5	20000	25	28,26	56	248	Compacta
14,13	0,5	20000	25	28,26	56	248	Compacta
14,13	0,5	20000	25	28,26	56	248	Compacta
14,13	0,5	20000	25	28,26	56	248	Compacta
14,13	0,5	20000	25	28,26	56	248	Compacta
14,13	0,5	20000	25	28,26	56	248	Compacta
14,13	0,5	20000	25	28,26	56	248	Compacta

Fonte: O autor.

Tabela 33: Otenção da resistente.

Seção compacta $\lambda \leq \lambda_p$				
Módulo	Z (cm ³)	f _y (KN/cm ²)	Y _{a1}	M _{rd} (KN.cm)
1	141	25	1,10	3204,55
2	141	25	1,10	3204,55
3	141	25	1,10	3204,55
4	141	25	1,10	3204,55
5	141	25	1,10	3204,55
6	141	25	1,10	3204,55
7	141	25	1,10	3204,55
8	141	25	1,10	3204,55

Fonte: O autor.

Tabela 34: Relação entre a largura - espessura - diagonal.

D (cm)	t (cm)	E (KN/cm ²)	f _y (KN/cm ²)	λ	λ_p	λ_r	$\lambda \leq \lambda_p$
11,43	1,1	20000	25	10,39	56	248	Compacta
11,43	1,1	20000	25	10,39	56	248	Compacta
11,43	1,1	20000	25	10,39	56	248	Compacta
11,43	1,1	20000	25	10,39	56	248	Compacta
11,43	1,1	20000	25	10,39	56	248	Compacta
11,43	1,1	20000	25	10,39	56	248	Compacta
11,43	1,1	20000	25	10,39	56	248	Compacta
11,43	1,1	20000	25	10,39	56	248	Compacta

Fonte: O autor.

Tabela 35: Obtenção da resistente.

Seção compacta $\lambda \leq \lambda_p$				
Módulo	Z (cm ³)	f _y (KN/cm ²)	Y _{a1}	M _{rd} (KN.cm)
1	169	25	1,10	3840,91
2	169	25	1,10	3840,91
3	169	25	1,10	3840,91
4	169	25	1,10	3840,91
5	169	25	1,10	3840,91
6	169	25	1,10	3840,91
7	169	25	1,10	3840,91
8	169	25	1,10	3840,91

Fonte: O autor.

Tabela 36: Relação entre largura - espessura - horizontal.

D (cm)	t (cm)	E (KN/cm ²)	f _y (KN/cm ²)	λ	λ_p	λ_r	$\lambda \leq \lambda_p$
14,13	0,5	20000	25	28,26	56	248	Compacta
14,13	0,5	20000	25	28,26	56	248	Compacta
14,13	0,5	20000	25	28,26	56	248	Compacta
14,13	0,5	20000	25	28,26	56	248	Compacta
14,13	0,5	20000	25	28,26	56	248	Compacta
14,13	0,5	20000	25	28,26	56	248	Compacta
14,13	0,5	20000	25	28,26	56	248	Compacta
14,13	0,5	20000	25	28,26	56	248	Compacta

Fonte: O autor.

Tabela 37: Obtenção da resistente.

Seção compacta $\lambda \leq \lambda_p$				
Módulo	Z (cm ³)	f _y (KN/cm ²)	γ_{a1}	M _{rd} (KN.cm)
1	141	25	1,10	3204,55
2	141	25	1,10	3204,55
3	141	25	1,10	3204,55
4	141	25	1,10	3204,55
5	141	25	1,10	3204,55
6	141	25	1,10	3204,55
7	141	25	1,10	3204,55
8	141	25	1,10	3204,55

Fonte: O autor.

3.6.4 2 Cisalhamento

Para o cálculo da força cortante é importante que seja obedecido a seguinte condição:

$$V_{sd} \leq V_{Rd}$$

Onde:

V_{sd} : força cortante solicitante de cálculo;

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

Para o cálculo da força cortante resistente de cálculo, V_{Rd} , em seções tubulares circulares fletidas em relação a um eixo central de inercia foi aplicado a formulação abaixo.

$$V_{Rd} = \frac{0,5 \cdot \tau_{cr} \cdot A_g}{\gamma_{a1}} \quad (27)$$

Considerando que o τ_{cr} , foi empregado o maior dos seguintes valores:

$$\tau_{cr} = \frac{1,6 \cdot E}{\sqrt{\frac{L}{D}} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{5/4}} \leq 0,6 \cdot f_y \quad (28)$$

$$\tau_{cr} = \frac{0,78 \cdot E}{\left(\frac{D}{t}\right)^{3/2}} \leq 0,6 \cdot f_y \quad (29)$$

Onde:

D: é o diâmetro externo da seção transversal;

t_d : é a espessura de cálculo da parede da seção transversal, tomada igual a 0,93 vez a espessura nominal para tubos com costura igual a espessura nominal para tubos sem costura;

L: é a distância entre as seções de forças cortantes máxima e nula.

Tabela 38: Obtenção da resistente montante.

Atender		$V_{sd} \leq V_{rd}$										
E (KN/cm ²)	L (cm)	D (cm)	t (cm)	f _y (KN/cm ²)	σ_{cr1} (KN/cm ²)	σ_{cr2} (KN/cm ²)	σ_{cr} (KN/cm ²)	W (cm ³)	0,6.f _y	A _g (cm ²)	Y _{a1}	V _{rd} (KN)
20000	602,66	14,13	0,5	25	75,20	103,84	15	141	15,00	21,4	1,10	145,91
20000	602,66	14,13	0,5	25	75,20	103,84	15	141	15,00	21,4	1,10	145,91
20000	602,66	14,13	0,5	25	75,20	103,84	15	141	15,00	21,4	1,10	145,91
20000	602,66	14,13	0,5	25	75,20	103,84	15	141	15,00	21,4	1,10	145,91
20000	602,66	14,13	0,5	25	75,20	103,84	15	141	15,00	21,4	1,10	145,91
20000	400	14,13	0,5	25	92,31	103,84	15	141	15,00	21,4	1,10	145,91
20000	400	14,13	0,5	25	92,31	103,84	15	141	15,00	21,4	1,10	145,91
20000	400	14,13	0,5	25	92,31	103,84	15	141	15,00	21,4	1,10	145,91

Fonte: O autor.

Tabela 39: Obtenção da resistente diagonal.

Atender		$V_{sd} \leq V_{rd}$										
E (KN/cm ²)	L (cm)	D (cm)	t (cm)	f _y (KN/cm ²)	σ_{cr1} (KN/cm ²)	σ_{cr2} (KN/cm ²)	σ_{cr} (KN/cm ²)	W (cm ³)	0,6.f _y	A _g (cm ²)	Y _{a1}	V _{rd} (KN)
20000	672,01	11,43	1,1	25	223,70	465,74	15	169	15,00	35,7	1,10	243,41
20000	655,13	11,43	1,1	25	226,56	465,74	15	169	15,00	35,7	1,10	243,41
20000	640,31	11,43	1,1	25	229,17	465,74	15	169	15,00	35,7	1,10	243,41
20000	627,69	11,43	1,1	25	231,46	465,74	15	169	15,00	35,7	1,10	243,41
20000	617,41	11,43	1,1	25	233,38	465,74	15	169	15,00	35,7	1,10	243,41
20000	412,31	11,43	1,1	25	285,59	465,74	15	169	15,00	35,7	1,10	243,41
20000	412,31	11,43	1,1	25	285,59	465,74	15	169	15,00	35,7	1,10	243,41
20000	412,31	11,43	1,1	25	285,59	465,74	15	169	15,00	35,7	1,10	243,41

Fonte: O autor.

Tabela 40: Obtenção da resistente horizontal.

Atender		$V_{sd} \leq V_{rd}$										
E (KN/cm ²)	L (cm)	D (cm)	t (cm)	f _y (KN/cm ²)	σ_{cr1} (KN/cm ²)	σ_{cr2} (KN/cm ²)	σ_{cr} (KN/cm ²)	W (cm ³)	0,6.f _y	A _g (cm ²)	Y _{a1}	V _{rd} (KN)
20000	520,00	14,13	0,5	25	80,96	103,84	15	141	15,00	21,4	1,10	145,91
20000	440,00	14,13	0,5	25	88,01	103,84	15	141	15,00	21,4	1,10	145,91
20000	360,00	14,13	0,5	25	97,30	103,84	15	141	15,00	21,4	1,10	145,91
20000	280,00	14,13	0,5	25	110,33	103,84	15	141	15,00	21,4	1,10	145,91
20000	200,00	14,13	0,5	25	130,54	103,84	15	141	15,00	21,4	1,10	145,91
20000	200	14,13	0,5	25	130,54	103,84	15	141	15,00	21,4	1,10	145,91
20000	200	14,13	0,5	25	130,54	103,84	15	141	15,00	21,4	1,10	145,91
20000	200	14,13	0,5	25	130,54	103,84	15	141	15,00	21,4	1,10	145,91

Fonte: O autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PARA O MODELO PARCIALMENTE ROTULADO

Depois de realizar todas as combinações das ações no software SAP 2000, foi possível extrair todos os esforços (tração, compressão, momento e cisalhamento) atuantes na estrutura para todas as barras (montante, diagonal e horizontal). as tabelas a seguir mostra esses resultados.

4.1.1 Esforço de tração:

Tabela 41: Verificação para o montante.

Solicitante				resistente	Verificação
Nt,sd (KN)	Nt,sd (KN)	Nt,sd (KN)	Nt,sd (KN)	Nt,rd (KN)	
Comb 01	Comb 02	Comb 03	Comb 04		
68,602	68,602	68,602	68,602	486,4	Ok
57,545	57,545	57,545	57,545	486,4	Ok
46,384	46,384	46,384	46,384	486,4	Ok
36,103	36,103	36,103	36,103	486,4	Ok
26,038	26,038	26,038	26,038	486,4	Ok
14,800	14,800	14,800	14,800	486,4	Ok
8,641	8,641	8,641	8,641	486,4	Ok
2,480	2,480	2,480	2,480	486,4	Ok

Fonte: O autor.

Tabela 42: Verificação para a diagonal.

Solicitante				resistente	Verificação
Nt,sd (KN)	Nt,sd (KN)	Nt,sd (KN)	Nt,sd (KN)	Nt,rd (KN)	
Comb 01	Comb 02	Comb 03	Comb 04		
0,3224	0,3224	0,3224	0,3224	811,4	Ok
0,3156	0,3156	0,3156	0,3156	811,4	Ok
0,3057	0,3057	0,3057	0,3057	811,4	Ok
0,2954	0,2954	0,2954	0,2954	811,4	Ok
0,2648	0,2648	0,2648	0,2648	811,4	Ok
0,1126	0,1126	0,1126	0,1126	811,4	Ok
0,1126	0,1126	0,1126	0,1126	811,4	Ok
0,1126	0,1126	0,1126	0,1126	811,4	Ok

Fonte: O autor.

Tabela 43: Verificação para a horizontal.

Solicitante				resistente	Verificação
Nt,sd (KN)	Nt,sd (KN)	Nt,sd (KN)	Nt,sd (KN)	Nt,rd (KN)	
Comb 01	Comb 02	Comb 03	Comb 04		
-	-	-	-	486,4	Ok
-	-	-	-	486,4	Ok
-	-	-	-	486,4	Ok
-	-	-	-	486,4	Ok
-	-	-	-	486,4	Ok
-	-	-	-	486,4	Ok
-	-	-	-	486,4	Ok
-	-	-	-	486,4	Ok

Fonte: O autor.

4.1.2 Esforço de compressão:

Tabela 44: Verificação para a montante.

Solicitante				resistente	Verificação
Nc,sd (KN)	Nc,sd (KN)	Nc,sd (KN)	Nc,sd (KN)	Nc,rd (KN)	
Comb 01	Comb 02	Comb 03	Comb 04		
68,602	68,602	68,602	68,602	215,57	Ok
57,545	57,545	57,545	57,545	215,57	Ok
46,384	46,384	46,384	46,384	215,57	Ok
36,103	36,103	36,103	36,103	215,57	Ok
26,038	26,038	26,038	26,038	215,57	Ok
14,800	14,800	14,800	14,800	337,69	Ok
8,641	8,641	8,641	8,641	337,69	Ok
2,480	2,480	2,480	2,480	337,69	Ok

Fonte: O autor.

Tabela 45: Verificação para a diagonal.

Solicitante				resistente	Verificação
Nc,sd (KN)	Nc,sd (KN)	Nc,sd (KN)	Nc,sd (KN)	Nc,rd (KN)	
Comb 01	Comb 02	Comb 03	Comb 04		
9,264	9,264	9,264	9,264	671,20	Ok
33,45	33,45	33,45	33,45	706,23	Ok
27,86	27,86	27,86	27,86	739,3	Ok
31,414	31,414	31,414	31,414	769,33	Ok
72,084	84,636	31,665	31,665	795,16	Ok
153,13	153,13	153,13	153,13	686,55	Ok
106,47	106,47	106,47	106,47	686,55	Ok
-	-	-	-	686,55	Ok

Fonte: O autor.

Tabela 46: Verificação para a horizontal.

Solicitante				resistente	Verificação
Nc,sd (KN)	Nc,sd (KN)	Nc,sd (KN)	Nc,sd (KN)	Nc,rd (KN)	
Comb 01	Comb 02	Comb 03	Comb 04		
-	-	-	-	1153,54	Ok
-	-	-	-	1611,14	Ok
-	-	-	-	451,59	Ok
-	-	-	-	465,02	Ok
-	-	-	-	475,36	Ok
-	-	-	-	475,36	Ok
-	-	-	-	475,36	Ok
-	-	-	-	475,36	Ok

Fonte: O autor.

4.1.3 Esforço de flexão:

Tabela 47: Verificação para o montante.

Solicitante				resistente	Verificação
Msd (KN)	Msd (KN)	Msd (KN)	Msd (KN)	Mrd (KN)	
Comb 01	Comb 02	Comb 03	Comb 04		
353,45	353,45	411,82	411,82	3204,55	Ok
320,53	320,53	339,20	339,20	3204,55	Ok
311,01	311,01	313,39	313,39	3204,55	Ok
370,20	370,20	370,20	370,20	3204,55	Ok
270,91	270,91	270,91	270,91	3204,55	Ok
263,31	263,31	254,98	254,98	3204,55	Ok
360,07	360,07	360,07	360,07	3204,55	Ok
249,42	249,42	221,10	221,10	3204,55	Ok

Fonte: O autor.

Tabela 48: Verificação para a diagonal.

Solicitante				resistente	Verificação
Msd (KN)	Msd (KN)	Msd (KN)	Msd (KN)	Mrd (KN)	
Comb 01	Comb 02	Comb 03	Comb 04		
1,9515	1,9515	1,9515	1,9515	3840,91	Ok
50,3840	50,3840	103,4654	103,4654	3840,91	Ok
81,4266	69,4959	50,7050	50,7050	3840,91	Ok
10,4280	10,4280	9,8670	9,8670	3840,91	Ok
16,2426	13,5824	10,0846	10,0846	3840,91	Ok
1,4172	1,7172	2,2380	1,8216	3840,91	Ok
0,4909	0,4909	0,4360	0,4360	3840,91	Ok
207,98	207,98	207,98	207,98	3840,91	Ok

Fonte: O autor.

Tabela 49: Verificação para a horizontal.

Solicitante				resistente	Verificação
Msd (KN)	Msd (KN)	Msd (KN)	Msd (KN)	Mrd (KN)	
Comb 01	Comb 02	Comb 03	Comb 04		
-	-	-	-	3204,55	Ok
-	-	-	-	3204,55	Ok
-	-	-	-	3204,55	Ok
-	--	-	-	3204,55	Ok
-	-	-	-	3204,55	Ok
-	-	-	-	3204,55	Ok
-	-	-	-	3204,55	Ok
-	-	-	-	3204,55	Ok

Fonte: O autor.

4.1.4 Esforço de cisalhamento:

Tabela 50: Verificação para o montante.

Solicitante				resistente	Verificação
Vsd (KN)	Vsd (KN)	Vsd (KN)	Vsd (KN)	Vrd (KN)	
Comb 01	Comb 02	Comb 03	Comb 04		
0,621	0,621	0,621	0,621	145,91	Ok
0,621	0,621	0,621	0,621	145,91	Ok
0,621	0,621	0,621	0,621	145,91	Ok
0,621	0,621	0,621	0,621	145,91	Ok
0,621	0,621	0,621	0,621	145,91	Ok
-	-	-	-	145,91	Ok
-	-	-	-	145,91	Ok
-	-	-	-	145,91	Ok

Fonte: O autor.

Tabela 51: Verificação para a diagonal.

Solicitante				resistente	Verificação
Vsd (KN)	Vsd (KN)	Vsd (KN)	Vsd (KN)	Vrd (KN)	
Comb 01	Comb 02	Comb 03	Comb 04		
4,673	4,673	4,673	4,673	243,41	Ok
3,536	3,536	3,536	3,536	243,41	Ok
5,01	6,383	4,225	4,225	243,41	Ok
2,876	2,876	6,501	6,501	243,41	Ok
9,371	9,371	10,579	10,579	243,41	Ok
6,542	6,542	6,542	3,907	243,41	Ok
60,800	60,800	173,272	173,272	243,41	Ok
38,24	38,24	38,24	38,24	243,41	Ok

Fonte: O autor.

Tabela 52: Verificação para a horizontal.

Solicitante				resistente	Verificação
Vsd (KN)	Vsd (KN)	Vsd (KN)	Vsd (KN)	Vrd (KN)	
Comb 01	Comb 02	Comb 03	Comb 04		
2,857	2,857	2,857	2,857	145,91	Ok
2,414	2,414	2,414	2,414	145,91	Ok
1,978	1,978	1,978	1,978	145,91	Ok
1,538	1,538	1,538	1,538	145,91	Ok
1,099	1,099	1,099	1,099	145,91	Ok
1,099	1,099	1,099	1,099	145,91	Ok
1,099	1,099	1,099	1,099	145,91	Ok
1,099	1,099	1,099	1,099	145,91	Ok

Fonte: O autor.

Para escolha adequada do perfil a ser empregado foi consultado o catálogo de tubos estruturais com seção circular, quadrada e retangular da VALLOUREC. A escolha se deu da seguinte forma. Verificou-se qual o esforço solicitante mais alto do tramo montante dos esforços (tração, compressão, flexão e cisalhamento) e comparou com o esforço resistente do tramo montante de cada esforço e daí verificou se atende ao quesito do resistente ser maior ou igual ao solicitante. Isso se repetiu para os demais tramos, a diagonal e o horizontal TABELA . Para as barras de travamento foi considerado um perfil inferior aos demais já que sua finalidade foi só para diminuir o comprimento de flambagem das barras diagonais TABELA .

Tabela 53: Verificação do tramo montante.

SOLICITANTE	RESISTENTE				
	TRAÇÃO	COMPRES.	FLEXÃO	CISALHA.	VERIFIC.
6,529	486,4	215,57	3204,55	145,91	OK
6,529	486,4	215,57	3204,55	145,91	OK
6,529	486,4	215,57	3204,55	145,91	OK
6,529	486,4	215,57	3204,55	145,91	OK
6,529	486,4	215,57	3204,55	145,91	OK
6,529	486,4	215,57	3204,55	145,91	OK
6,529	486,4	215,57	3204,55	145,91	OK
6,529	486,4	215,57	3204,55	145,91	OK

Fonte: O autor.

Tabela 54: Verificação do tramo diagonal.

SOLICITANTE	RESISTENTE				
	TRAÇÃO	COMPRE.	FLEXÃO	CISALHA.	VERIFICAÇÃO
233,09	811,4	671,87	3840,91	243,41	OK
233,09	811,4	706,23	3840,91	243,41	OK
233,09	811,4	739,3	3840,91	243,41	OK
233,09	811,4	769,33	3840,91	243,41	OK
233,09	811,4	795,16	3840,91	243,41	OK
233,09	811,4	686,55	3840,91	243,41	OK
233,09	811,4	686,55	3840,91	243,41	OK
233,09	811,4	686,55	3840,91	243,41	OK

Fonte: O autor.

Tabela 55: Verificação do tramo horizontal.

SOLICITANTE	RESISTENTE				
	TRAÇÃO	COMPRES.	FLEXÃO	CISALHA.	VERIFICAÇÃO
6,529	486,4	1153,54	3204,55	145,91	OK
6,529	486,4	1611,14	3204,55	145,91	OK
6,529	486,4	451,59	3204,55	145,91	OK
6,529	486,4	465,02	3204,55	145,91	OK
6,529	486,4	475,36	3204,55	145,91	OK
6,529	486,4	475,36	3204,55	145,91	OK
6,529	486,4	475,36	3204,55	145,91	OK
6,529	486,4	475,36	3204,55	145,91	OK

Fonte: O autor.

O perfil adotado para os tramentos apresenta as seguintes características:

- 5 Dimensão externa: $D = 10,16 \text{ cm}$
- 6 Espessura da parede: $t = 1,25 \text{ cm}$
- 7 Área bruta: $A_g = 35 \text{ cm}^2$
- 8 Momento de inércia: $I_x = I_y = 354 \text{ cm}^4$
- 9 Raio de giração: $r_x = r_y = 3,18 \text{ cm}$

5 CONCLUSÃO

Em estruturas como torres em treliças a principal força excitante é o carregamento causado pelo vento. O principal objetivo desse trabalho foi dimensionar as barras que compõe a estrutura, para isso foi realizado o estudo do vento. Por meio do estudo realizado, concluiu-se que foi possível encontrar perfis de seção tubular circular que apresentassem resistencia suficiente para resistir aos esforços solicitados.

Com base nos resultados analisados, também se observou que a direção com que o vento incide na estrutura deve ser considerada, pois a não consideração dos dois casos de vento pode levar a estimativa incorreta dos valores máximos de esforços nas barras, o que pode levar a escolha de seções que não suportem tais esforços lavando a estrutura ao colapso.

6.REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABDALLA, H. A. **Assessment of damages and repair of antenna tower concrete foundations**. Construction and Building Materials, 2002.

ABNT, NBR 6123 – **Forças devidas ao vento em edificações – procedimento, 1988**.

ABNT, NBR 8800 – **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**.

FLACHSBART, O. **Wind pressure on solid-walled and framed structures**. Association Internationale des Ponts et Charpentes, V.1 p. 153-72, 1932

GUANABARA, Matheus Kerkhoff. **Dimensionamento de estruturas metálicas: rotina computacional para seleção de perfis metálicos**. 2010. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. 7. Ed. São Paulo: Pearson, 2010. 659 p.

LABEGALINI, P. R., LABEGALINI, J. A., FUCHS, R. D. ALMEIDA, M. T. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**, Editora Edgard Blucher LTDA, 1992.

MARINHO, I.J.P. **Projeto ótimo de estruturas metálicas de arquibancadas reutilizáveis via ANSYS**. Tese (Mestrado em engenharia), PUC-Rio. 2002.

MOTTA, Giordano Paulo Da. **Análise estática de tipologias propostas para aumento de altura de torre autoportante em estrutura metálica**. 2015. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Ciências

Exatas e Engenharias, Unijuí – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2015.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço**: Dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PROBST, Renan Diego. **Análise estrutural de torre metálica autoportante para telecomunicações dimensionamento de reforço – estudo de caso**. 2013. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2013.

SAP 2000 v.14, CSI.

SILVA TELLES, P.C. Tubulações Industriais – Materiais, Projeto, Montagem. 10a. edição, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2001.

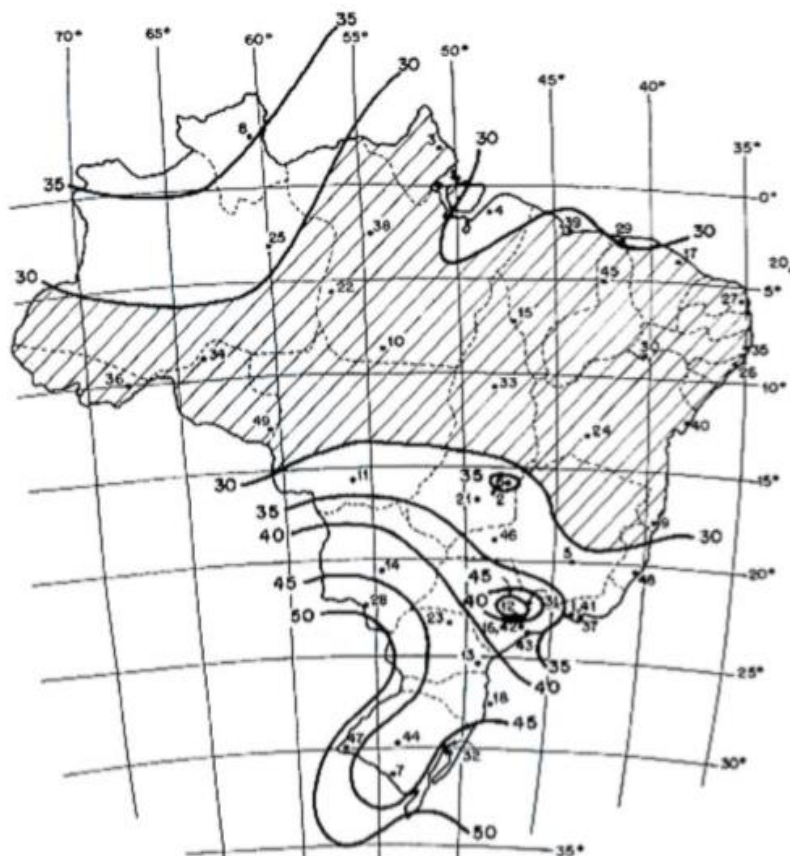
SINGH, Kellen de Souza. **Análise estática de torres metálicas tralçadas autoportantes para linha de transmissão**. 2009. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2009.

ZAMPIRON, I. **Avaliação das características e desempenho de estruturas para telecomunicações visando o projeto de novo modelo de torre autoportante**.

Tese (Mestrado em engenharia) - PPEC/ Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

ANEXO A: FORÇA DEVIDO AO VENTO

Figura 11: Gráfico das isopletras.



Fonte: NBR 6123/1998.

Figura 12: Classes para determinação do fator de rugosidade.

Classe A: Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m.

Classe B: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m.

Classe C: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

Fonte: NBR 6123/1998.

Figura 13: Parâmetros meteorológico.

Categoria	z_0 (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		F_r	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

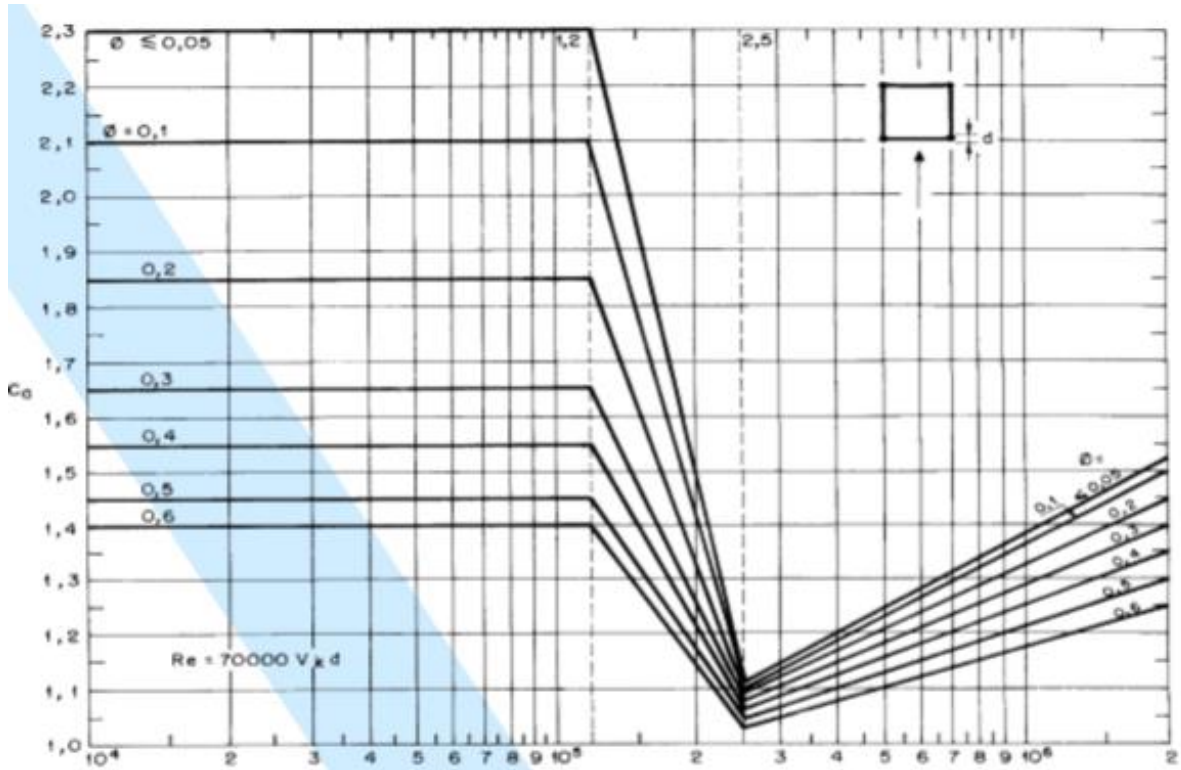
Fonte: NBR 6123/1988.

Figura 14: Valores mínimos do fator estatístico.

GRUPO	DESCRIÇÃO	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros, centrais de comunicação, etc.).	1,10
2	Edificações para hotéis e residências, edificações para comércio e indústria com alto teor de ocupação.	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais e etc.).	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.).	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção.	0,83

Fonte: NBR 6123/1988

Figura 15: Ábaco para obtenção do coeficiente de arrasto.



Fonte: NBR 6123/1988.

A FÍGURA 15 mostra uma tabela que expressa um fator de proteção em cada face

Direção do vento		Face I	Face II	Face III	Face IV
	n	$\frac{1}{1+\eta}$	0	$\frac{\eta}{1+\eta}$	0
	t	0	0	0	0
	n	0,20	0,20	0,15	0,15
	t	0,20	0,20	0,15	0,15
	n	0,57	0,11	0,11	—
	t	0	0,19	0,19	—
	n	0,50	0	0,37	—
	t	0,29	0	0,21	—
	n	0,14	0,14	0,43	—
	t	0,25	0,25	0	—
n : componente perpendicular à face t : componente paralela à face					

Fonte: NBR 6123/1988.