

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC
CENTRO TECNOLÓGICO – CTC

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL – ECV

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE TORRE METÁLICA
AUTOPORTANTE PARA TELECOMUNICAÇÃO E
DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO – ESTUDO DE CASO.**

ACADÊMICO: RENAN DIEGO PROBST

PROFESSOR ORIENTADOR: Dr. LEANDRO FLECK FADEL MIGUEL

FLORIANÓPOLIS

2013/2

RENAN DIEGO PROBST

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE TORRE METÁLICA
AUTOPORTANTE PARA TELECOMUNICAÇÃO E
DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO – ESTUDO DE CASO.**

Trabalho de Conclusão do
Curso para obtenção de grau de
Engenheiro Civil pelo curso de
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina - UFSC.

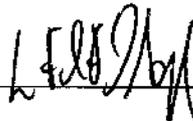
FLORIANÓPOLIS

2013/2

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE TORRE METÁLICA
AUTOPORTANTE PARA TELECOMUNICAÇÃO E
DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO – ESTUDO DE CASO.**

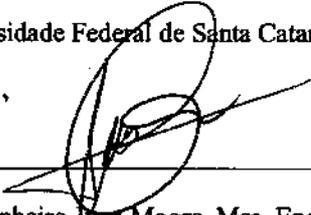
Este trabalho foi julgado adequado para a conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil, sendo aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

BANCA EXAMINADORA:



Prof.^o Leandro Fleck Fadel Miguel, Dr., Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Engenheiro Juan Moore, Msc. Eng.

Prof. Otávio Augusto Alves da Silveira Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

FLORIANÓPOLIS

2013/2

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar força e saúde para que pudesse alcançar mais este objetivo na minha vida.

A minha mãe Elza H. S. Probst por todos estes anos de educação, carinho e paciência, sem ela nada disso seria possível.

Agradeço ao meu pai EnoProbst (in memorian) que de alguma maneira esteve ao meu lado em todos os momentos.

Ao meu irmão Felipe LuisProbst por toda ajuda nas horas difíceis, por transmitir sua experiência de graduação, seus conhecimentos nas disciplinas e por toda parceria, paciência e amizade.

Ao meu irmão Rodrigo H. Probst por todo apoio e educação nos momentos em que precisei.

Ao professor orientador Leandro F. F. Miguel pela dedicação, empenho e competência no auxílio ao orientar-me neste trabalho.

Ao co-orientador Eng. Juan Moore por estar sempre disposto a ensinar e ajudar na execução deste documento.

Aos engenheiros e amigos Giancarlo Pozza e Guilherme Lazzaris Vieira por toda ajuda na elaboração deste trabalho.

A empresa Cleomar Engenharia e principalmente aos meus amigos de trabalho do setor Laudos e Projetos Estruturais, por todos os ensinamentos ao longo destes anos e por todo apoio na execução deste trabalho, é a eles a quem devo todos os ensinamentos na área de estrutura de telecomunicações.

A todas as pessoas, amigos e colegas, que de alguma maneira me ajudaram nesta caminhada.

RESUMO

Neste trabalho será elaborada a análise estrutural de uma torre metálica autoportante para telecomunicações que se encontra instalada na cidade de Urucânia/MG. Será avaliada a condição da estrutura após a ampliação de carregamento decorrente da inclusão de antenas de rádio frequência (RF) e de micro-ondas (MW). Com o resultado da análise preliminar verificou-se que a estrutura existente não estava em condições seguras de receber estes acréscimos, com isso, foi dimensionado uma estrutura de reforço para resistirem às solicitações devido à situação existente, antenas a instalar e reserva de carga, condições de ampliação.

Serão apresentadas neste trabalho, a revisão bibliográfica, a análise da estrutura vertical existente e o dimensionamento dos componentes da estrutura de reforço (perfis, chapas de ligação, chapas de base e chumbadores).

A torre foi modelada com ajuda da ferramenta computacional STRAP_2012 seguindo as prescrições e recomendações da ABNT NBR 8850/2003 – Execução de suportes metálicos para linhas de transmissão – procedimento, ABNT NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações e da NBR 8681:2003 – Ações e segurança nas estruturas – procedimento. Verificou-se a capacidade de suporte da estrutura existente com o consequente dimensionamento do reforço da estrutura sob a ação das seguintes cargas: peso próprio, peso dos acessórios, peso das antenas, peso dos suportes, peso da escada, peso dos cabos, vento nas peças, vento nas antenas, vento nos cabos, acessórios e de manutenção.

Palavras chaves: Estruturas de telecomunicações, análise estrutural, dimensionamento de reforço.

ABSTRACT

In this work will be developed a structural analysis of a freestanding telecommunication steel tower installed in the city of Urucânia, state of Minas Gerais, Brazil. It will be evaluated the structure condition after a loading increase by the inclusion of Radio Frequency (RF) and Microwaves (MW) antennas. With the result of the analysis it was found that the existing structure was not in a safe condition to receive these extras, so it was specified a reinforcement structure to support the actual situation, new antennas and a loading reserve.

It will be presented in this work the bibliographical review, the analysis of the existing vertical structure and the dimensioning of the reinforcement structure components (profiles, connection plates, base plates and anchor bolts).

The tower was designed with support of the computational tool STRAP_2012, following the prescription and guidelines of the standards NBR 8850/2003 – Execution of metal supports for transmission lines – procedure, NBR 6123:1988 – Forces due to wind on buildings and NBR 8681:2003 – Actions and safety on structures – procedure. It was verified the support capacity of the existing structure with the consequent dimensioning of the structure reinforcement with the following loads: own weight, accessories weight, antennas weight, supports weight, weight of the ladder, cables weight, wind in parts, wind in the antennas, wind in the cables, accessories and maintenance.

Keywords: Telecommunication structures, structural analysis, reinforcement dimensioning.

Sumário

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE FIGURAS	12
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo	1
1.2.1 Objetivo Geral.....	1
1.2.2 Objetivo Específico.....	1
1.3 Estruturas de Telecomunicações.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 Considerações Iniciais	6
2.2 Software de Análise Estrutural	6
2.3 Planilha Programável.....	7
2.4 Abordagem ABNT NBR-8186:2003 – Ações e Segurança nas Estruturas – Procedimento.....	8
2.4.1 Ações Permanentes	8
2.4.2 Ações Variáveis	8
2.4.3 Ações Excepcionais	8
2.4.4 Valores representativos das ações.....	8
2.4.5 Ações-tipo de carregamento e critérios de combinação.....	8
2.4.6 Critérios de Combinação das Ações	9
2.4.7 Combinação Última Normal de Ações	9
2.5 Abordagem ABNT NBR-6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações..	11
2.5.1 Força de arrasto (F_a).....	11
2.5.2 Pressão dinâmica (q)	11

2.5.3	Velocidade característica do vento (V_k).....	11
2.5.4	Velocidade básica do vento (V_0).....	11
2.5.5	Fator topográfico S_1	12
2.5.6	Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno – fator S_2	13
2.5.7	Fator estatístico – S_3	14
2.5.8	Coeficiente de arrasto C_a	14
2.5.9	Barras prismáticas de seção circular	16
2.5.10	Componentes da força de arrasto	16
2.6	Abordagem ABNT NBR-8850:2003 – Execução de Suportes Metálicos Treliçados para Linhas de Transmissão – Procedimento	17
2.6.1	Definições	17
2.6.2	Materiais	18
2.6.3	Projeto estrutural.....	18
2.6.4	Dimensionamento Compressão.....	19
2.6.5	Esbeltez Efetiva	21
2.6.6	Dimensionamento Tração	22
2.6.7	Dimensionamento das Ligações.....	23
2.6.8	Fundação – Chumbadores.....	23
2.6.9	Fabricação	24
3.	ESTUDO DE CASO	25
3.1	Descrição da Estrutura.....	25
3.2	Parâmetros de Cálculo	25
3.2.1	Velocidade Básica do Vento V_0	25
3.2.2	Fator Topográfico S_1	26
3.2.3	Rugosidade do Terreno, Dimensões da Edificação e Altura Sobre o Terreno: Fator S_2	26
3.3	Materiais da Estrutura.....	27
3.4	Cargas Consideradas.....	28
3.4.1	Cargas Permanentes (pesos).....	28

3.4.2	Cargas Variáveis (vento).....	28
3.5	Silhueta da Estrutura.....	29
3.6	Cálculo das Ações Atuantes na Estrutura	30
3.6.1	Hipóteses de Carregamento	30
3.6.2	Cargas de Vento	31
3.7	Modelo Computacional	35
3.7.1	Geometria.....	35
3.7.2	Cargas	36
3.7.3	Resultados	37
3.7.4	Metálica.....	39
3.7.5	Conclusão da Estrutura Existente.....	42
4.	DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO	43
4.1	Proposta de Reforço.....	43
4.2	Definição da Geometria	43
4.3	Silhueta da Estrutura.....	45
4.4	Materiais da Estrutura de Reforço	46
4.5	Carregamento.....	46
4.6	Resultados.....	46
4.7	Metálicas.....	48
4.8	Dimensionamento das Ligações	52
4.9	Dimensionamento dos Chumbadores	56
4.10	Dimensionamento da Chapa de Base.....	57
4.11	Detalhamento do Clipe de Ligação.....	59
4.12	Conclusão das Estruturas	60
5.	CONCLUSÃO.....	61
6.	RECOMENDAÇÕES	61
7.	BIBLIOGRAFIA	62
	APÊNDICE 1 – RELATÓRIO FOTOGRÁFICO.....	63
	APÊNDICE 2 – PLANILHAS DE CARREGAMENTO (ESTRUTURA EXISTENTE). ...	65

APÊNDICE 3 – PLANILHAS DE CARREGAMENTO (REFORÇO).....	68
APÊNDICE 4 – PLANILHAS DE DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES (REFORÇO)	69
ANEXO – PROJETO EXECUTIVO	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Solicitações máximas do montante da base (kgf / kgf.m).....	37
Tabela 2 – Máximo deslocamento dos nós.....	38
Tabela 3– Reações de apoio.	39
Tabela 4 – Solicitações máximas do montante da base (kgf / kgf.m).....	46
Tabela 5– Máximo deslocamento dos nós.....	47
Tabela 6– Reações de apoio.	47
Tabela 7– Dados dos montantes.	52
Tabela 8–Chapas de ligação.	55
Tabela 9– Máximos esforços para o carregamento (7,27 m ²).....	56
Tabela 10– Resistências da estrutura.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Torre metálica autoportante.	3
Figura 2 - Torre metálica estaiada.	3
Figura 3– Poste metálico.	4
Figura 4 – Mastro metálico.	4
Figura 5 – Cavalete metálico.	5
Figura 6- Valores dos coeficientes de ponderação das ações Permanentes e Variáveis.	9
Figura 7– Coeficientes de ponderação de ações permanentes.	10
Figura 8 - Valores dos fatores de combinação ψ_0 e de redução ψ_1 e ψ_2 para as ações variáveis.	10
.....	
Figura 9– isopletas da velocidade básica V_0 (m/s).	12
Figura 10 – Valores de S_2	14
Figura 11– Valores mínimos do fator estatístico S_3	14
Figura 12– coeficientes de arrasto, C_a , para torre reticuladas de seção quadrada e triangular equilátera, formadas por barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondadas.	15
Figura 13 – Coeficiente de arrasto, C_a , para torres reticuladas de seção triangular equilátera, formadas por barras de seção circular.	15
Figura 14 – Coeficiente de arrasto, C_a , para barras prismáticas de seção circular e de comprimento infinito.	16
Figura 15 – Componentes da força de arrasto, nas faces de torres reticuladas de seção quadrada ou triangular equilátera.	16
Figura 16– Dimensões de cantoneira.	20
Figura 17– Furos alinhados.	22
Figura 18– Furos desalinhados.	23
Figura 19– Coeficiente u	24
Figura 20 – Localização da cidade de Urucânia/MG.	25
Figura 21 – Localização do site.	26
Figura 22– Vista em torno do site.	27
Figura 23– Silhueta da estrutura.	29
Figura 24– Consideração das ações do vento na estrutura.	30

Figura 25– Vista das antenas existentes.	31
Figura 26– Vista dos cabos existentes.	32
Figura 27 – Escada existente.	33
Figura 28– Estrutura existente.....	35
Figura 29– Modelo geométrico tridimensional.	36
Figura 30– Nós com deslocamento máximo.	38
Figura 31 – Nós das reações de apoio.	39
Figura 32 – Resultados das barras da estrutura.	40
Figura 33 – Legenda com os resultados de acordo com as cores.	41
Figura 34 - Resultados das solicitações da base e topo da estrutura.....	41
Figura 35 - Resultados detalhados do montante da base.	42
Figura 36 - Silhueta da estrutura.....	43
Fonte – Levantamento técnico.....	43
Figura 37 – Reforço da estrutura.	44
Figura 38 – Reforço da estrutura – Silhueta / Base / Topo da estrutura.	44
Figura 39 – Propriedades da estrutura de reforço.....	45
Figura 40 – Nós com deslocamentos máximos.	47
Figura 41– Nós das reações de apoio.	48
Figura 42– Resultados das barras da estrutura.	49
Figura 43– Legenda com os resultados de acordo com as cores.	50
Figura 44–Taxa de utilização das peças da base e topo da estrutura.	50
Figura 45 - Resultados detalhados do montante da base.	51
Figura 46 – Montante e chapas de ligação.	53
Figura 47 – Chapa de base.....	58
Figura 48 – Clipes de ligação.	59

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho será apresentada a análise e verificação de uma estrutura vertical existente (estudo de caso) e o dimensionamento da estrutura de reforço. Será feita a análise de uma torre metálica autoportante existente para verificação da segurança quanto às solicitações impostas a esta estrutura e, após análise estrutural, será dimensionado o reforço da estrutura e de seus componentes.

1.1 Motivação

Ao longo da vida profissional de um engenheiro, muitos desafios são enfrentados em diversas áreas da engenharia como obras civis, estradas, pontes, entre outras. A área de estruturas metálicas difere das outras principalmente no que se refere à de torres metálicas, visto que, raramente este assunto é abordado na graduação.

A responsabilidade de um engenheiro que dimensiona este tipo de estrutura é muito grande, pois estas devem suportar vários esforços, tais como o peso próprio e de equipamentos, o vento e ainda os devidos às manutenções. As solicitações devido ao vento são baseadas em um mapeamento com a definição da velocidade básica do vento nas diversas regiões e características destas regiões em torno das estruturas. A deficiência desta estrutura pode causar grandes prejuízos, não só por colocar pessoas e patrimônios em risco, mas também pelos danos causados às empresas de telecomunicações e cidades.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a segurança e estabilidade de uma torre autoportante localizada na cidade de Uruçânia/MG e apresentar o dimensionamento do reforço da estrutura.

1.2.2 Objetivo Específico

O objetivo específico deste trabalho é apresentar um modelo de cálculo para análise estrutural de uma torre autoportante, além da apresentação e dimensionamento de reforço de torre metálica autoportante.

O presente estudo de caso será elaborado conforme informado anteriormente, realizando uma análise crítica da situação da torre para que ela suporte os carregamentos existentes, carregamentos de ampliação (antenas a instalar) e carregamentos de capacidade de reserva (reserva de carga).

1.3 Estruturas de Telecomunicações

Atualmente, devido ao considerável aumento de tecnologias na área de telefonia móvel e fixa e à abertura de novas empresas concorrentes na área, a competitividade entre empresas de telefonia faz com que elas tenham que, cada vez mais, implantar novas estruturas e ampliação de estruturas existentes que suportem e atendam às especificações na necessidade de transmissão de sinal ou necessidade de ampliação de suporte das estruturas existentes. Os locais onde são implantados estas estruturas são chamados de “estações radio base – ERB”, “cell sites” ou simplesmente “sites”.

Antigamente, as estruturas utilizadas nestes sites eram postes de concreto. Entretanto, devido à necessidade de maiores alturas e de estruturas mais duráveis, estes foram substituídos por outros modelos de estruturas utilizando como principal material o aço. Os principais modelos utilizados atualmente são: torre autoportante, torre estaiada, poste metálico, cavalete metálico e mastro metálico.

As torres autoportantes (Figura 1), estudo de caso deste trabalho, são indicadas quando há a necessidade de uma altura elevada e grande carregamento. Pelo fato de serem autoportantes, não necessitam de uma grande área de implantação, já que não requerem estais para suportar o carregamento e esteja em condições seguras de utilização.

As torres autoportantes têm como forma estrutural um sistema treliçado, sendo com seção transversal quadrada ou triangular, geralmente constituídos de perfis cantoneiras. Sua silhueta consiste geralmente em duas partes, uma trapezoidal inclinada e outra seção reta.

Os maiores esforços são retidos pelos montantes e diagonais da torre, sendo que as horizontais e os braços têm como principal função diminuir o comprimento de flambagem das peças. Já os anti-torçores, por sua vez, tem a função de evitar os deslocamentos de rotação entre os elementos da torre.

Para o dimensionamento das fundações devem ser consideradas diversas hipóteses de direção do vento, sendo dimensionadas para as piores situações de esforços tanto de tração como de compressão.



Figura 1 - Torre metálica autoportante.
Fonte – Levantamento técnico

Torres estaiadas (Figura 2) são estruturas treliçadas que diferem das autoportantes principalmente pela necessidade de cabos para que se garanta a sua estabilidade. Com isso, necessitam de uma maior área de implantação, se comparadas às torres autoportantes.



Figura 2 - Torre metálica estaiada.
Fonte – Levantamento técnico

Postes metálicos (Figura 3) são estruturas formadas por tubos metálicos, em geral, em formas circulares ou poligonais de seção constante ou variável. Com alturas maiores que 10 metros, diferem das torres pela área de implantação devido à menor área da fundação, porém, estes tipos de estruturas geralmente têm menor capacidade de suporte.

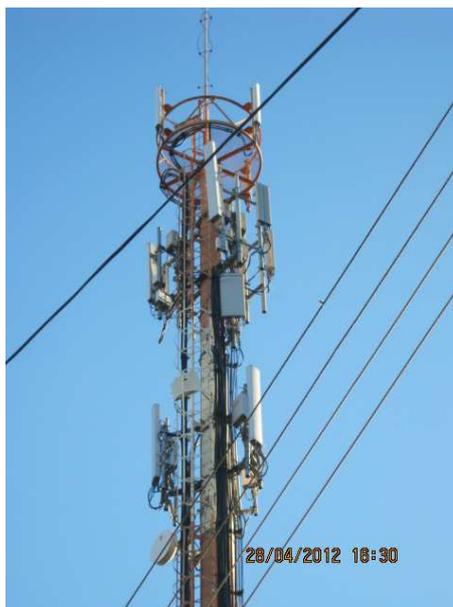


Figura 3– Poste metálico.
Fonte – Levantamento técnico

Mastros metálicos (Figura 4) são estruturas com menores dimensões, tendo no máximo 10 metros de altura e são implantados geralmente no topo de edificações. Em geral, os mastros são compostos de um tubo principal e seus contraventamentos em cantoneiras. Os mastros são instalados em blocos de concreto engastados geralmente nas vigas-parede das caixas d água, vigas da cobertura ou pilares da estrutura.



Figura 4 – Mastro metálico.
Fonte – Levantamento técnico

Cavalete metálico (Figura 5) é basicamente uma torre metálica em menor escala e podem ser estaiados ou autoportantes. São estruturas mais leves e normalmente instaladas em topo de prédios ou outro tipo de estrutura que suporte tais esforços.



Figura 5 – Caveleto metálico.
Fonte – Levantamento técnico

Caveletes metálicos, assim como os mastros metálicos, só poderão ser instalados nas edificações após comprovação de que a mesma suporte os novos carregamentos. Geralmente para instalação destes equipamentos são elaborados laudos técnicos para comprovação de que o acréscimo de carregamento não prejudique a estabilidade e segurança da estrutura.

Para definição da estrutura algumas informações são essenciais:

- Capacidade de área de exposição ao vento (AEV): a operadora que implanta um novo site deve ter o conhecimento do número de antenas e modelos que tal região necessita e, com isso, pode ser calculada a área de exposição ao vento, que resumidamente é a área da face da antena multiplicada por um coeficiente de arrasto definido por norma.

- Altura: a definição da altura da estrutura se dá principalmente pela área de propagação dos sinais das antenas, para que não tenha interferência e consiga uma transmissão de sinais entre sites. Porém, a definição da altura da estrutura se restringe principalmente às leis municipais e ao COMAR (comandos aéreos regionais).

- Parâmetros: os parâmetros (V_0 , S_1 , S_2 , S_3) são essenciais para definição da estrutura a ser dimensionada, pois são eles que definem os esforços de vento aos quais a estrutura estará exposta.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

Este documento está embasado nas seguintes normas específicas para análises e dimensionamento de torres metálicas:

- ABNT NBR 8681:2003 – Ações e segurança nas estruturas – procedimento.
- ABNT NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações;
- ABNT NBR 8850:2003 – Execução de suportes metálicos treliçados para linhas de transmissão – Procedimento;

Para o dimensionamento das estruturas, serão utilizados como ferramentas softwares que auxiliarão no desenvolvimento dos cálculos e análise da estrutura existente e do reforço estrutural, sendo estes:

- STRAP-V12 – Structural Analysis Programs;
- Excel – Microsoft office excel 2007.

2.2 Software de Análise Estrutural

Para a elaboração deste trabalho foi utilizado um software de análise estrutural por elementos finitos, que dispõe de avançados recursos para a elaboração de diversos tipos de modelos estruturais. O programa desenvolvido por gráficos possui diversos recursos que facilitam a modelagem de estruturas simples ou complexas. A modelagem se dá basicamente com o lançamento dos nós da estrutura que serão posteriormente interligados por barras. Estas barras, após serem lançadas, assumirão uma propriedade e seção transversal atribuída pelo usuário. O programa possui uma biblioteca de perfis metálicos e pode ainda criar o seu próprio tipo de perfil de chapa dobrada parametrizado. O programa ainda possui um módulo de modelagem de perfis, o CROSEC, que é um módulo de seções que permite calcular características geométricas de seções poligonais com ou sem furos. Permite, também, a definição de perfis de chapa dobrada genéricos (qualquer forma), que ficam parametrizados, isto é, em função de variáveis, para que o usuário monte uma biblioteca de várias seções do perfil criado. Este módulo calcula além das características geométricas dos perfis criados, o C_w (coeficiente de empenamento) e o centro de torção. Tem-se ainda a opção de renderizar a estrutura, objetivando-se a verificação das escalas dos perfis e da estrutura. Definem-se ainda os apoios a serem utilizados, que no estudo de caso específico deste trabalho, em torres autoportantes, serão do tipo engastados.

Depois de criado o modelo da estrutura, propriedades atribuídas, apoios, o programa possui o recurso de se definir os carregamentos em que a estrutura será solicitada. As cargas podem ser aplicadas nas barras (com a opção de ser carga distribuída uniforme ou variável, concentrada, peso próprio, de temperatura, pré-tensão, alongamento e superfície), nos nós (carga pontual), carga global

(carga distribuída em uma determinada área) ou combinada. Após finalizar o carregamento da estrutura o programa pode calcular os resultados. Neste recurso são inseridas as combinações entre as cargas, definidas por norma específica. É possível verificar todos os resultados das barras e nós da estrutura, obtendo as solicitações das barras, axiais, cortantes e momentos, deslocamentos dos nós, reações de apoio da estrutura (utilizado para cálculo das fundações), enfim, todos os resultados detalhados podem ser visualizados.

O programa apresenta ainda a taxa de utilização dos perfis, o resultado se dá por uma combinação de esforços axiais, devido aos esforços atribuídos a esta estrutura. O projetista define a norma que irá seguir, o tipo de aço a utilizar, parâmetros e procedimentos que estará seguindo.

Neste item, foram apresentados resumidamente os comandos e procedimentos mais utilizados na análise e dimensionamento de uma torre metálica autoportante. O software possui inúmeros comandos, porém, como o estudo de caso deste trabalho será a análise estrutural de uma torre metálica autoportante e do reforço estrutural da mesma, foi dada maior ênfase nos comandos utilizados para este fim.

Para a elaboração das análises e dimensionamento foi utilizado como auxílio a ferramenta de análise computacional STRAP-V12 – Structural Analysis Programs,

2.3 Planilha Programável

Foram utilizadas planilhas programáveis para cálculo das solicitações devido ao vento, cálculo das ligações, chumbadores e parafusos. A partir destas planilhas, os resultados das solicitações obtidos serão inseridos no programa de análise estrutural. Para elaboração deste trabalho foi utilizado como auxílio a ferramenta EXCEL da Microsoft.

2.4 Abordagem ABNT NBR-8186:2003 – Ações e Segurança nas Estruturas – Procedimento

A norma NBR 8681:2003 define como carregamento um conjunto de ações que têm probabilidade não desprezível de ocorrer durante um período pré-estabelecido. A combinação é feita determinando os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura.

2.4.1 Ações Permanentes

As ações permanentes podem ser classificadas em diretas e indiretas. As ações permanentes diretas são ações dos elementos de construção do tipo peso próprio, peso dos equipamentos permanentes de construção e de outros tipos de ações permanentes sobre elas aplicadas. Já as ações permanentes indiretas são as ações do tipo protensão, os recalques de apoio e a retração dos materiais.

2.4.2 Ações Variáveis

São ações variáveis as cargas acidentais das construções, bem como efeitos, tais como forças de frenagem, de impacto e centrífugo, os efeitos do vento, das variações de temperatura, do atrito nos aparelhos de apoio e, em geral, as pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas. Ações variáveis são classificadas em ações normais ou especiais.

2.4.3 Ações Excepcionais

Consideram-se como ações excepcionais ações tais como explosões, choques de veículos, incêndios, enchentes ou sismos excepcionais.

2.4.4 Valores representativos das ações

As ações são quantificadas por seus valores representativos, que podem ser valores característicos, valores característicos nominais, valores reduzidos de combinação, valores convencionais excepcionais, valores reduzidos de utilização e valores raros de utilização.

2.4.5 Ações-tipo de carregamento e critérios de combinação

Durante o período de vida de uma construção ela está sujeita a vários tipos de carregamentos, que podem ser classificados em carregamento normal, especial e excepcional.

- Carregamento normal: são os carregamentos que devem ser considerados por toda vida útil da estrutura, tanto para verificação dos estados últimos quanto ao de utilização.

- Carregamento especial: são carregamentos considerados transitórios, com duração curta em relação à duração da vida útil da estrutura. São considerados em geral apenas para a verificação dos estados limites últimos.

- Carregamento excepcional: O carregamento excepcional é transitório, com duração extremamente curta. Com um carregamento do tipo excepcional, considera-se apenas a verificação

da segurança em relação ao estado limite último, através de uma única combinação última excepcional de ações.

2.4.6 Critérios de Combinação das Ações

Para a verificação da segurança quanto aos estados limites, devem ser consideradas todas as combinações ações desfavoráveis que possam acarretar efeitos na estrutura. As ações permanentes devem ser totalmente consideradas, já as ações variáveis devem ser consideradas as que produzem efeitos desfavoráveis.

2.4.7 Combinação Última Normal de Ações

As combinações últimas normais de ações são aquelas que decorrem do uso específico da estrutura. Devem ser consideradas todas as combinações para quantas forem às cargas variáveis, sendo alternadas entre principal e secundária. Em cada combinação devem ser feitas as devidas considerações de ponderação para cada tipo de carregamento. A expressão que representa essas combinações é apresentada a seguir:

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} F_{Gj,k} + \gamma_q [F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} F_{Qj,k}]$$

Os valores de $F_{Gi,k}$, são referentes às cargas permanentes, $F_{Q1,k}$ é a carga variável escolhida como principal e por fim os valores de $F_{Qj,k}$, são as demais cargas variáveis que podem atuar simultaneamente com a ação variável principal. Os valores de γ_g , γ_{q1} , γ_{q2} e ψ_o podem ser obtidos na Figura 6, Figura 7 e Figura 8.

Combinação	Tipo de ação	Coefficiente de ponderação
Normal	Ações truncadas ¹⁾	1,2
	Efeito de temperatura	1,2
	Ação do vento	1,4
	Ações variáveis em geral	1,5
Especial ou de construção	Ações truncadas ¹⁾	1,1
	Efeito de temperatura	1,0
	Ação do vento	1,2
	Ações variáveis em geral	1,3
Excepcional	Ações variáveis em geral	1,0

¹⁾ Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico de modo que o valor dessa ação não pode superar o limite correspondente. O coeficiente de ponderação mostrado na tabela 4 se aplica a esse valor limite.

Figura 6- Valores dos coeficientes de ponderação das ações Permanentes e Variáveis.
Fonte: ABNT NBR 8681:2003

Combinação	Tipo de ação	Efeito	
		Desfavorável	Favorável
Normal	Peso próprio de estruturas metálicas	1,25	1,0
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,30	1,0
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,35	1,0
	Elementos construtivos industrializados ¹⁾	1,35	1,0
	Elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	1,40	1,0
	Elementos construtivos em geral e equipamentos ²⁾	1,50	1,0
Especial ou de construção	Peso próprio de estruturas metálicas	1,15	1,0
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,20	1,0
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,25	1,0
	Elementos construtivos industrializados ¹⁾	1,25	1,0
	Elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	1,30	1,0
	Elementos construtivos em geral e equipamentos ²⁾	1,40	1,0
Excepcional	Peso próprio de estruturas metálicas	1,10	1,0
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,15	1,0
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,15	1,0
	Elementos construtivos industrializados ¹⁾	1,15	1,0
	Elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	1,20	1,0
	Elementos construtivos em geral e equipamentos ²⁾	1,30	1,0

¹⁾ Por exemplo: paredes e fachadas pré-moldadas, gesso acartonado.
²⁾ Por exemplo: paredes de alvenaria e seus revestimentos, contrapisos.

Figura 7 – Coeficientes de ponderação de ações permanentes.
Fonte – ABNT NBR 8681:2003

Ações	ψ_0	ψ_1	ψ_2 ^{3), 4)}
Cargas acidentais de edifícios			
Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ¹⁾	0,5	0,4	0,3
Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ²⁾	0,7	0,6	0,4
Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento			
Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura			
Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos			
Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
Pontes rodoviárias	0,7	0,5	0,3
Pontes ferroviárias não especializadas	0,8	0,7	0,5
Pontes ferroviárias especializadas	1,0	1,0	0,6
Vigas de rolamentos de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5

¹⁾ Edificações residenciais, de acesso restrito.
²⁾ Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.
³⁾ Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para ψ_2 o valor zero.
⁴⁾ Para combinações excepcionais onde a ação principal for o fogo, o fator de redução ψ_2 pode ser reduzido, multiplicando-o por 0,7.

Figura 8 - Valores dos fatores de combinação ψ_0 e de redução ψ_1 e ψ_2 para as ações variáveis.
Fonte: ABNT NBR 8681:2003

2.5 Abordagem ABNT NBR-6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações

As solicitações devido ao vento são as mais importantes a serem consideradas no dimensionamento e análise de torres metálicas. Com isso, serão apresentados parâmetros importantes utilizados para cálculo das forças de vento em estruturas reticuladas que são estruturas formadas por barras retas.

2.5.1 Força de arrasto (F_a)

A força de arrasto na direção do vento é uma força estática obtida pela seguinte relação:

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_e$$

Onde:

- C_a = coeficiente de arrasto;
- q = pressão dinâmica;
- A_e = área efetiva.

2.5.2 Pressão dinâmica (q)

A pressão dinâmica do vento em N/m^2 é dada pela seguinte relação:

$$q = 0,613(V_k)^2$$

Onde:

V_k = velocidade característica do vento em m/s.

2.5.3 Velocidade característica do vento (V_k)

A velocidade característica do vento é a velocidade do vento que atua sobre certa parte da estrutura. Esta é definida pela seguinte relação:

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

Onde:

V_0 = velocidade básica do vento;

S_1 = fator topográfico;

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

S_3 = fator estatístico.

2.5.4 Velocidade básica do vento (V_0)

A velocidade básica do vento é a velocidade de uma rajada de 3 segundos, excedida em média uma vez a cada 50 anos, a 10 metros acima do terreno, em campo plano e aberto, é obtida seguindo a isopleta da Figura 9.

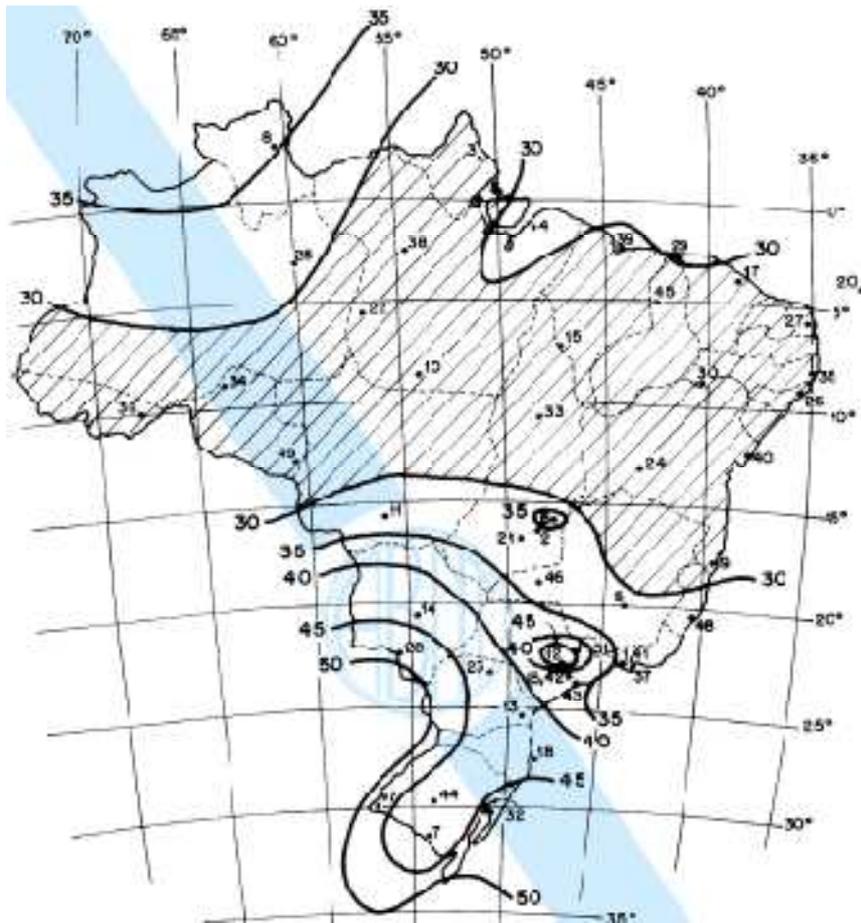


Figura 9– isopletas da velocidade básica V_0 (m/s).
 Fonte – ABNT NBR – 6123:1988

2.5.5 Fator topográfico S_1

Conforme descrito na ABNT NBR-6123:88 o fator topográfico S_1 leva em consideração as variações do relevo e é determinado do seguinte modo:

- a) Terrenos planos ou fracamente acidentados: $S_1 = 1,0$
- b) Taludes e morros (para torre situada no topo)

$$\theta \leq 3^\circ \rightarrow S_1(z) = 1,0;$$

$$6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ \rightarrow S_1(z) = 1,0 + (2,5 - (z/d)) \cdot \text{Tg}(\theta - 3^\circ) \geq 1$$

$$\theta \geq 45 \rightarrow S_1(z) = 1,0 + (2,5 - (z/d)) \cdot 0,31 \geq 1$$

[interpolar linearmente para $3^\circ < \theta < 6^\circ < 17^\circ < \theta < 45^\circ$]

Onde:

z = altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado;

d = diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro;

θ = inclinação média do talude ou encosta do morro

2.5.6 Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno – fator S_2

Conforme descrito na ABNT NBR-6123:1988 o fator topográfico S_2 considera o efeito da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração.

Conforme a ABNT NBR-6123:1988, a rugosidade do terreno é classificada em cinco categorias:

- Categoria I: Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão medida na direção do vento. (mar calmo, lagos e rios, pântanos sem vegetação).

- Categoria II: Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos. (zonas costeiras planas, pântanos com vegetação rala, campos de aviação, pradarias e charnecas, fazendas sem sebes ou muros). Cota média dos obstáculos de 1,0 metro.

- Categoria III: terrenos planos ou ondulados com obstáculos. (granjas e casas de campo, fazendas com sebes ou muros, subúrbios a considerável distancia do centro). Cota média dos obstáculos de 3,0 metros.

- Categoria IV: terrenos cobertos por obstáculos numerosos e poucos espaçados. (zonas de parques e bosques com muitas árvores, cidades pequenas e seus arredores, subúrbios densamente construídos de grandes cidades, áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas). Cota média dos obstáculos de 10 metros.

- Categoria V: terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. (floresta com árvores altas, centro de grandes cidades, complexos industriais). Cota média dos obstáculos igual ou superior a 25 metros.

Segundo a ABNT NBR-6123:1988 a velocidade do vento varia continuamente, e seu valor médio pode ser calculado sobre qualquer intervalo de tempo. Foi verificado que o intervalo mais curto das medidas usuais (3s) corresponde a rajadas cujas dimensões envolvem convenientemente obstáculos de até 20 metros na direção do vento médio, ou seja, quanto maior o intervalo de tempo no cálculo da velocidade média, tanto maior a distância abrangida pela rajada.

Com isso, foram escolhidas 3 classes de edificações:

Classe A: toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20m;

Classe B: toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical esteja entre 20m e 50m;

Classe C: toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical exceda 50m.

Os valores do parâmetro S_2 podem ser verificados na Figura 10 abaixo.

z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
140	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
160	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,20	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
300	-	-	-	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35	1,33	1,30	1,30	1,30
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,32	1,32	1,32
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,34

Figura 10 – Valores de S_2
 Fonte – ABNT NBR – 6123:1988

2.5.7 Fator estatístico – S_3

Para fins da norma ABNT NBR-6123:1988 o fator estatístico S_3 é baseado em conceitos estatísticos, e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação, o fator pode ser retirado da Figura 11.

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

Figura 11– Valores mínimos do fator estatístico S_3 .
 Fonte – ABNT NBR – 6123:1988

2.5.8 Coeficiente de arrasto C_a

Os coeficientes de arrasto dos equipamentos e antenas geralmente são fornecidos nos catálogos, retirados através de ensaios em túnel de vento.

Para torres reticuladas constituídas por barras prismáticas de faces planas, com cantos vivos ou levemente arredondados, os valores dos coeficientes de arrasto para o vento incidindo perpendicularmente a uma das faces são fornecidos pelo gráfico da Figura 12:

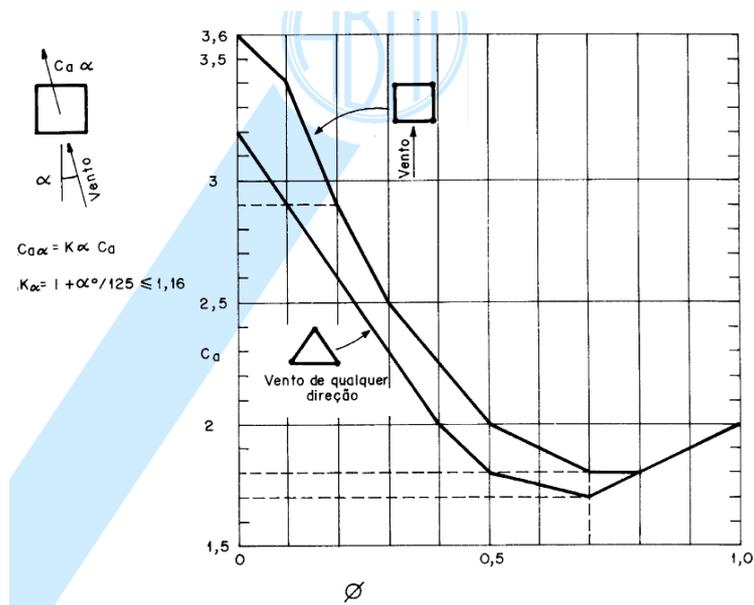


Figura 12– coeficientes de arrasto, C_d , para torre reticuladas de seção quadrada e triangular equilátera, formadas por barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondadas.
Fonte – NBR – 6123:1988

Para torres reticuladas de seção triangular constituídas por barras de seção circular, os valores dos coeficientes de arrasto para o vento incidindo perpendicularmente a uma das faces são fornecidos pelo gráfico da Figura 13:

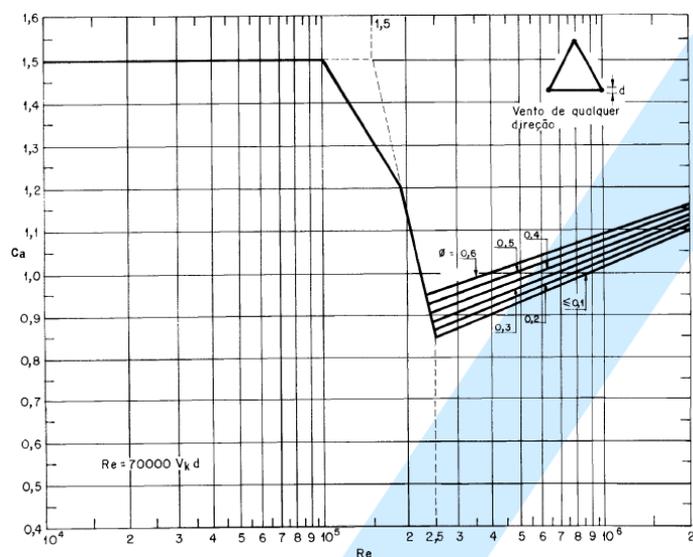


Figura 13 – Coeficiente de arrasto, C_d , para torres reticuladas de seção triangular equilátera, formadas por barras de seção circular.
Fonte – NBR – 6123:1988

2.5.9 Barras prismáticas de seção circular

Para barras prismáticas de seção circular, os coeficientes de arrasto C_a dependem do valor do número de Reynolds (Re), e são dados na Figura 14 a seguir.

Regime de fluxo ($Re = 70000 V_k d$) [V_k em m/s; d em m]		C_a
Subcrítico	$Re < 4,2 \cdot 10^5$	1,2
Acima do crítico	$4,2 \cdot 10^5 \leq Re < 8,4 \cdot 10^5$	0,6
	$8,4 \cdot 10^5 \leq Re < 2,3 \cdot 10^6$	0,7
	$Re \geq 2,3 \cdot 10^6$	0,8

Figura 14 – Coeficiente de arrasto, C_a , para barras prismáticas de seção circular e de comprimento infinito.
Fonte – ABNT NBR-6123:1988

2.5.10 Componentes da força de arrasto

As componentes da força de arrasto nas faces das torres são obtidas multiplicando pelos valores descritos na Figura 15.

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

n : componente perpendicular à face
t : componente paralela à face

Figura 15 – Componentes da força de arrasto, nas faces de torres reticuladas de seção quadrada ou triangular equilátera.
Fonte – NBR – 6123:1988

2.6 Abordagem ABNT NBR-8850:2003 – Execução de Suportes Metálicos Treliçados para Linhas de Transmissão – Procedimento

Neste item serão apresentadas algumas definições básicas da ABNT NBR-8850:2003. Os limites e definições específicas ficam mais claros no dimensionamento da estrutura e onde esta norma é aplicada em cada subitem.

2.6.1 Definições

A norma em questão especifica algumas definições básicas que podem ser utilizadas ao longo do dimensionamento e análise de uma estrutura, são elas:

- Contratante: empresa responsável pela aquisição da estrutura;
- Fabricante: empresa responsável pela fabricação da estrutura;
- Projetista: profissional ou empresa responsável pelo dimensionamento e projeto da estrutura;
- Condições específicas de projeto: documento contendo informações, dados, exigências, critérios e procedimentos específicos do projeto a ser desenvolvido;
- Cargas de projeto: são as cargas em que levam a estrutura em seu estado limite;
- Hipóteses de cálculo: são carregamentos montados de modo em que as combinações serão feitas levando em consideração a situação que a estrutura terá a situação de máximos carregamentos;
- Estado limite: situação em que a estrutura não atende a solicitação a que foi projetada;
- Estado limite ultimo: estado em que a estrutura tende a ruína, total ou parcial, deformações excessivas ou instabilidade;
- Estado limite de utilização: estado em que por algum motivo a estrutura sofreu danos que não são compatíveis a sua utilização, como deformações permanentes inaceitáveis ou vibrações excessivas;
- Resistência limite ou característica (R_k): representa a capacidade da estrutura quando um ou mais elementos atingem o estado limite ultimo;
- Fator de minoração da resistência limite (Φ_R): coeficiente que minora a resistência limite;
- Resistência de cálculo (R_d): capacidade resistente da estrutura minorada pelos fatores de minoração;
- Solicitação de cálculo (S_d): esforços transmitidos à estrutura devido aos carregamentos de projeto.

2.6.2 Materiais

Os materiais empregados no dimensionamento de uma torre metálica são chapas e perfis que podem ser de aço carbono comum, aço carbono de alta resistência e de baixa liga. Os aços utilizados nestes dimensionamentos devem atender as especificações da ABNT NBR-7007 – Aço carbono e microligados para uso estrutural em geral.

Nesta norma recomenda-se a utilização de perfis laminados a quente e, somente em casos específicos, deverão ser utilizadas chapas dobradas a frio ou chapas soldadas.

Os parafusos devem atender as especificações da ABNT NBR-8855:2003 - Propriedades mecânicas de elementos de fixação - Parafusos e prisioneiros – Especificação, na serie métrica, e na serie em polegadas as especificações da ASTM-A394– Tower bolt - tipo 0 e tipo 1.

As porcas são definidas conforme os parafusos da estrutura e atendem às mesmas especificações.

As arruelas e os calços devem ser em aço e atender às especificações da ABNT NBR-9983 - Arruela lisa de uso em parafuso sextavado estrutural de alta resistência - Dimensões e material.

As contra-porcas tipo palmut e arruelas de pressão devem atender especificações dos aços classe SAE-1010/1020 ou SAE-1055/1065 da norma SAE-J1397.

2.6.3 Projeto estrutural

Os projetistas, além de seguir as especificações e condições específicas de projeto, devem otimizar o projeto e facilitar as soluções nos seguintes pontos:

- Inclinação dos montantes;
- Abertura de base, já pensando na ligação com a fundação;
- Inclinação dos mastros e estais;
- Dimensionamentos das bitolas, verificação e estudo do mercado;
- Garantia na qualidade de montagem;
- Facilidade de fabricação, estocagem, transporte e montagem.

O projeto deve apresentar em sua silhueta todas as dimensões principais, a composição de extensões e pernas, a identificação das barras, o desenho esquemático da posição das grelhas ou stubs, o ângulo de inclinação e diâmetro dos estais.

O dimensionamento da estrutura deve ser baseado nos estado limites, devendo atender aos estados limites últimos e estados limites de utilização.

Para estados limites últimos, a estrutura deve ser dimensionada para resistir às solicitações e deve atender a seguinte equação:

$$S_d \leq R_d$$

Onde:

- S_d : representa as solicitações de cálculo, sendo tanto de compressão, tração, flexão, cisalhamento e esmagamento, atuantes nos diferentes elementos da estrutura;

- R_d : representa a resistência de cálculo, sendo tanto de compressão, tração, flexão, cisalhamento e esmagamento, obtido através da aplicação do fator de minoração sobre a resistência característica:

$$R_d = \Phi_R \cdot R_k$$

Onde:

- R_k : representa a resistência limite da estrutura;

- Φ_R : representa o fator de minoração da resistência limite da estrutura, que são divididos da seguinte maneira:

- Para suporte projetado e testado através de protótipo conforme ABNT NBR-8842: $\Phi_R = 0,93$;

- Para suporte projetado sem teste de protótipo: $\Phi_R = 0,90$ para suportes de suspensão;

$\Phi_R = 0,85$ para suportes de ancoragem especiais.

Para estados limites de utilização a estrutura deve ser dimensionada e verificada para atender as especificações dos estados limites de utilização, em que além de atender as cargas solicitadas e apresentar desempenho satisfatório durante sua vida útil, não deve apresentar danos e defeitos que possam comprometer seu desempenho, durabilidade ou impacto visual.

2.6.4 Dimensionamento Compressão

A ABNT NBR-8850:2003 prevê, para o dimensionamento de barras comprimidas, que o esforço solicitante de compressão S_{dc} seja menor ou igual à resistência de cálculo R_{dc} , desta barra. Sendo expresso da seguinte maneira:

$$S_{dc} \leq R_{dc}$$

Onde a resistência de cálculo pode ser expressa da seguinte maneira:

$$R_{dc} = \Phi_R \cdot F_c \cdot A_g$$

Onde:

Φ_R = fator de minoração da resistência limite;

A_g = área bruta da seção transversal do perfil, em cm^2 ;

F_c = tensão limite de compressão, em daN/cm^2 , (kgf/cm^2);.

A tensão limite de compressão, atuando na área bruta da seção transversal das barras submetidas ao carregamento deve ser:

$$F_c = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{kL/r}{C_c} \right)^2 \right] F_y \quad \text{Se } kL/r \leq C_c$$

Ou

$$F_c = \frac{\pi^2 E}{(kL/r)^2} \quad \text{Se } kL/r > C_c$$

Onde:

$$C_c = \pi (2E / F_y)^{1/2}$$

Onde:

- F_y = tensão limite de escoamento do aço, em daN/cm², (kgf/cm²);
- E = módulo de elasticidade longitudinal, em daN/cm², (kgf/cm²);
- $k.L/r$ = esbeltez efetiva.

2.6.4.1 Tensão Limite de compressão

Para o caso específico de cantoneiras (Figura 16), a tensão limite de compressão depende da compacidade (w/t) das mesmas (flambagem local). Neste caso:

$$\text{Se } w/t \leq (w/t)_{\text{lim}} \rightarrow F_{cr} = F_y$$

$$\text{Se } (w/t)_{\text{lim}} < w/t \leq 0,846 (E/F_y) \rightarrow F_{cr} = [1,677 - (0,677 (w/t) / (w/t)_{\text{lim}})] F_y$$

$$\text{Se } w/t > 0,846 (E/F_y)^{1/2} \rightarrow F_{cr} = 0,3276 \cdot E / (w/t)^2$$

O valor de $(w/t)_{\text{lim}}$ pode ser obtido pela seguinte fórmula:

$$(w/t)_{\text{lim}} = 0,470 (E/F_y)^{1/2}$$

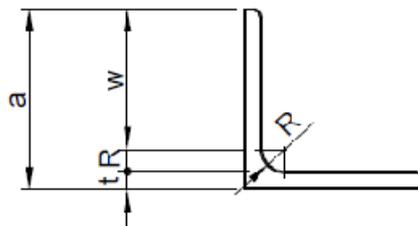


Figura 16– Dimensões de cantoneira.
Fonte – NBR – 8850:2003

Onde:

- a = altura da aba;

- t = espessura da cantoneira;
- R = raio de laminação;
- w = (a - t - R) = largura plana da aba;

2.6.5 Esbeltez Efetiva

Esbeltez efetiva é a razão entre o comprimento de flambagem (L) pelo raio de giração (r) da peça corrigido pelo coeficiente de comprimento efetivo (k). Para o cálculo da esbeltez são levadas em conta condições como as de aplicação de carga e as da extremidade da barra:

Para montantes aparafusados em ambas as abas têm-se:

Se $0 \leq L/r \leq 150$, então, $k.L/r = L/r$

Para as demais barras comprimidas onde temos as seguintes condições:

Barras com cargas concêntricas em ambas as extremidades:

Se $0 \leq L/r \leq 120$, então, $k.L/r = L/r$

Barras com carga concêntrica em uma extremidade e excêntrica na outra:

Se $0 \leq L/r \leq 120$, então, $k.L/r = 30 + (0,75 L/r)$

Barras com cargas excêntricas em ambas as extremidades:

Se $0 \leq L/r \leq 120$, então, $k.L/r = 60 + (0,5 L/r)$

Barras sem restrição parcial à rotação em ambas as extremidades:

Se $0 \leq L/r \leq 200$, então, $k.L/r = L/r$

Barras com restrição parcial à rotação em uma das extremidades:

Se $0 \leq L/r \leq 225$, então, $k.L/r = 28,6 + (0,762 L/r)$

Barras com restrição parcial à rotação em ambas das extremidades:

Se $0 \leq L/r \leq 250$, então, $k.L/r = 46,2 + (0,615 L/r)$

2.6.5.1 Esbeltez Limite

A esbeltez efetiva encontrada não pode exceder aos seguintes valores:

Para montantes:

$$k.L/r \leq 150$$

E para os demais componentes comprimidos:

$$k.L/r \leq 200$$

2.6.6 Dimensionamento Tração

As ligações em peças metálicas que trabalham a tração podem ser feitas por meio de parafusos e furos ou com soldas, sendo que a escolha do tipo de ligação é muito importante, pois pode afetar a distribuição de tensões na peça. Critérios para dimensionamento de barras tracionadas, em geral, são baseados no método das tensões admissíveis, que limitam a tensão média na seção transversal enfraquecida pelos furos à tensão de escoamento.

Para o dimensionamento deve sempre ser atendida a seguinte condição:

$$S_{dt} \leq R_{dt}$$

Onde a resistência de cálculo pode ser expressa da seguinte maneira:

$$R_{dt} = \Phi_R \cdot F_t \cdot A_n$$

Onde:

Φ_R = fator de minoração da resistência limite;

A_n = área líquida da seção transversal do perfil, em cm^2 ;

F_t = tensão limite de tração, em daN/cm^2 , (Kgf/cm^2);

A NBR 8850:2003 não considera a ruptura da seção líquida, considera apenas o escoamento na seção mais crítica que é aquela que apresentar a maior quantidade de furos em sua seção transversal. A tensão limite de tração (F_t) é obtida a partir da tensão de escoamento do aço F_y para cargas de tração atuantes nas barras:

$$F_t = F_y$$

Para solicitações à tração em cantoneiras conectadas somente por uma aba:

$$F_t = 0,9 \cdot F_y$$

Como as ligações são feitas por parafusos a seção transversal é reduzida devida a presença furos. Estes causam concentrações de tensões, e a peça tem que, então, ser verificada para a área reduzida devido a eles, A_n .

A_n é a área líquida da barra, que deve ser calculada subtraindo-se os valores das áreas transversais dos furos, quando os mesmos encontram-se alinhados (Figura 17), conforme a equação:

$$A_n = t (b - n \cdot d_f)$$

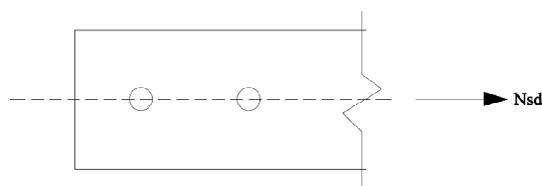


Figura 17– Furos alinhados.
Fonte – NBR – 8850:2003

O diâmetro d_d é obtido a partir do diâmetro do parafuso acrescido de 3,5mm prescrito em norma, e "n" representa a quantidade de furos na seção.

Em uma barra onde existem diversos furos e estes não se encontram alinhados transversalmente na direção em que o carregamento está sendo aplicado, poderá existir mais de uma linha potencial de ruptura. A linha de ruptura será a que tiver a menor área líquida em sua seção. A Figura 18 representa uma barra com furos desalinhados.

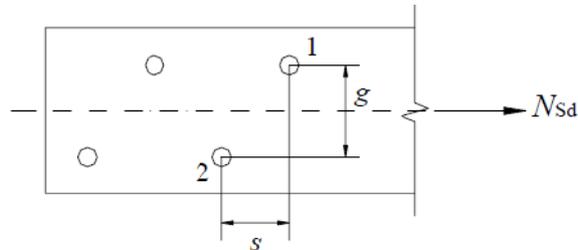


Figura 18– Furos desalinhados.
Fonte – NBR – 8850:2003

Para se determinar qual será a linha de ruptura, deve-se calcular para cada possível linha de ruptura, sua área líquida (A_n), segundo a fórmula apresentada na Equação. Adota-se então aquela linha de ruptura que apresentar a menor área A_n .

$$A_n = t \left(b - \sum d_d + \sum_{i=1}^n \frac{s^2}{4g_i} \right)$$

2.6.7 Dimensionamento das Ligações

Para o dimensionamento das ligações devem ser feitas as seguintes verificações:

- Verificação ao cisalhamento: a sollicitação de cálculo S_{dv} que provoca esforço de cisalhamento nos parafusos de uma ligação deve ser menor ou igual à resistência de cálculo R_{dv} ;
- Verificação a tração: a sollicitação de cálculo S_{dt} que provoca tração nos parafusos de uma ligação deve ser menor ou igual à resistência de cálculo R_{dt} ;
- Verificação ao esmagamento: A sollicitação de cálculo S_{dp} que provoca esmagamento na área de contato dos parafusos com as chapas ou perfis deve ser menor ou igual à resistência de cálculo ao esmagamento R_{dp} .

Uma forma mais prática no dimensionamento das ligações será melhor demonstrada no estudo de caso.

2.6.8 Fundação – Chumbadores

O dimensionamento dos chumbadores deve ser levado em consideração às sollicitações à tração e ao cisalhamento:

$$[S_{dt}/F_Y + S_{dv}/(u \cdot 0,85 \cdot F_Y)] \leq \Phi_R A_r$$

Onde:

- A_r = área líquida da seção da raiz da rosca, em cm^2 ;
- Φ_R = fator de minoração da resistência limite;
- S_{dv} = solicitação de cálculo ao cisalhamento no chumbador, em daN, (Kgf);
- u = coeficiente de atrito entre chapa de base e o concreto ou argamassa (grout) conforme demonstrado na Figura 19, valendo:
 - $u = 0.90$ para chapa de base embutida no concreto;
 - $u = 0.70$ para chapa de base apoiada no concreto;
 - $u = 0,55$ para chapa de base apoiada em argamassa (grout) acima da superfície do concreto

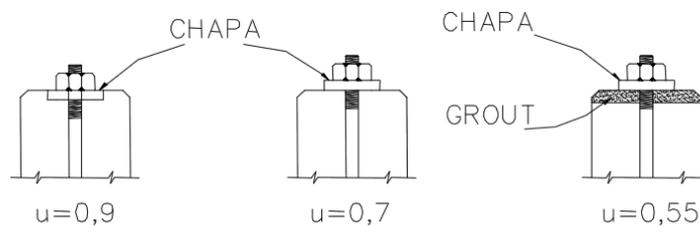


Figura 19– Coeficiente u .
Fonte – NBR – 8850:2003

O comprimento dos chumbadores é definido conforme NBR6118 – Projetos de estrutura de concreto – procedimento.

2.6.9 Fabricação

A norma ainda traz algumas considerações quanto à fabricação das peças, dando algumas recomendações, como:

- Corte e dobramento;
- Furação;
- Soldas;
- Marcação das peças;
- Galvanização.

3. ESTUDO DE CASO

Ao iniciar um projeto estrutural com o auxílio de ferramenta computacional, deve-se tomar como premissa que nenhum software de computador, por mais desenvolvido que seja, substituirá o instinto e julgamento de um engenheiro, que deve saber interpretar a coerência dos resultados que o programa disponibiliza.

Propriedades físicas dos materiais, características do ambiente em torno da obra, informações sobre as condições da estrutura, ações atuantes e critérios de dimensionamento são as principais informações que devem ser verificadas individualmente e alteradas de acordo com o tipo de estrutura e local de implantação.

3.1 Descrição da Estrutura

A estrutura a ser analisada é uma torre de base triangular autoportante de 32 metros de altura, com abertura de base de 1,20 metros e abertura de topo de 0,60 metros. A estrutura se encontra com uma área de exposição ao vento (AEV) de antenas de 4,51m², 1,08m² a ser instalado (acréscimo de antenas) e 30% de reserva de carregamento (AEV) para a operadora detentora da estrutura. Com isso, a área de exposição ao vento total de antenas será de 7,27m², com o coeficiente de arrasto (CA) das antenas incluso.

3.2 Parâmetros de Cálculo

Neste item serão definidos os parâmetros de cálculo adotados para a análise da estrutura existente e dimensionamento do reforço estrutural.

3.2.1 Velocidade Básica do Vento V_0

A estrutura existente encontra-se instalada na cidade de Urucânia, no estado de Minas Gerais. Conforme apresentado na Figura 20, a velocidade básica do vento V_0 no local será considerada 32 m/s.



Figura 20 – Localização da cidade de Urucânia/MG.
Fonte – NBR-6123:1988 / Google Earth

3.2.2 Fator Topográfico S_1



Figura 21 – Localização do site.
Fonte – Google Earth

Conforme demonstrado na Figura 21, a estrutura se encontra no topo de um talude, sendo que a distância entre a base da estrutura e o ponto mais baixo da cidade é de aproximadamente 364 metros de distância. A altitude na base da estrutura é de 534 metros, enquanto que no ponto de referência encontrado é de 464 metros, representando um desnível de 70 metros.

Com isso, tem-se um ângulo de inclinação de $10,9^\circ$, ou seja, $6^\circ \leq 10,9 \leq 17^\circ$. Portanto:

$$6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ: S_1(z) = 1,0 + (2,5 - (z/d)) \cdot \text{Tg}(\theta - 3^\circ) \geq 1$$

$$S_1(z) = 1,29$$

Os valores encontrados de inclinação e, conseqüentemente, o valor de S_1 , são resultados de uma aproximação de valores de distância e altitude. Para que resultem em valores mais precisos, deve ser feito um levantamento de campo específico.

3.2.3 Rugosidade do Terreno, Dimensões da Edificação e Altura Sobre o Terreno: Fator S_2

O fator topográfico S_2 considera o efeito da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração.

3.2.3.1 Rugosidade do terreno

A rugosidade do terreno é classificada em cinco categorias e, após vistoria de campo e análise de fotos em torno da estrutura (Figura 22), foi considerado que a estrutura encontra-se na categoria III, ou seja, a cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3,0 metros.



Figura 22– Vista em torno do site.
Fonte – Levantamento técnico

3.2.3.2 Dimensões da Edificação

Como a maior dimensão da estrutura é sua altura de 32 metros, ela se encaixa na classe B, que engloba toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical esteja entre 20m e 50m;

Com isso, $S_2 = \text{III-B}$, sendo que os valores de S_2 considerados nas diferentes alturas são retirados da Figura 10 apresentada neste documento e disponível na norma específica.

3.2.3.3 Fator Estatístico S_3

“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 telecomunicações, etc.)”.

Para este grupo o fator estatístico $S_3=1,1$.

Com isso, os parâmetros utilizados no desenvolvimento dos cálculos serão:

Estrutura: Torre triangular metálica –32m;

- V_0 = Velocidade básica do vento – 32m/s;

- $S_1=1,29$;

- S_2 = Rugosidade/altura – CATEGORIA III-B;

- S_3 = Fator estatístico - 1,1.

3.3 Materiais da Estrutura

Por não se ter acesso ao memorial da estrutura ou projetos, não se têm informações das propriedades das peças da estrutura. Sendo assim, os materiais da estrutura foram associados aos tipos os aço mais usuais utilizados para este tipo de estrutura:

- Chapas: Aço ASTM A36 (MR250)

- Perfis Cantoneira: Aço ASTM A36 (MR250)

- Perfis Tubulares: Aço ASTM A36 (MR250)

- Barras: Aço ASTM A36 (MR250)
- Solda: E80-XX
- Galvanização: aço carbono e $\geq 90\mu\text{m}$ ASTM A123

3.4 Cargas Consideradas

3.4.1 Cargas Permanentes (pesos)

As cargas permanentes consideradas são:

- Peso próprio da estrutura;
- Peso da escada;
- Peso da esteira;
- Peso dos cabos;
- Peso das antenas;
- Peso dos suportes;
- Peso das plataformas.
- Peso de manutenções

3.4.2 Cargas Variáveis (vento)

- Vento nas peças;
- Vento na escada;
- Vento na esteira;
- Vento nos cabos;
- Vento nas antenas;
- Vento nas plataformas.

3.5 Silhueta da Estrutura

As propriedades das peças da estrutura existente podem ser vistas na Figura 23.

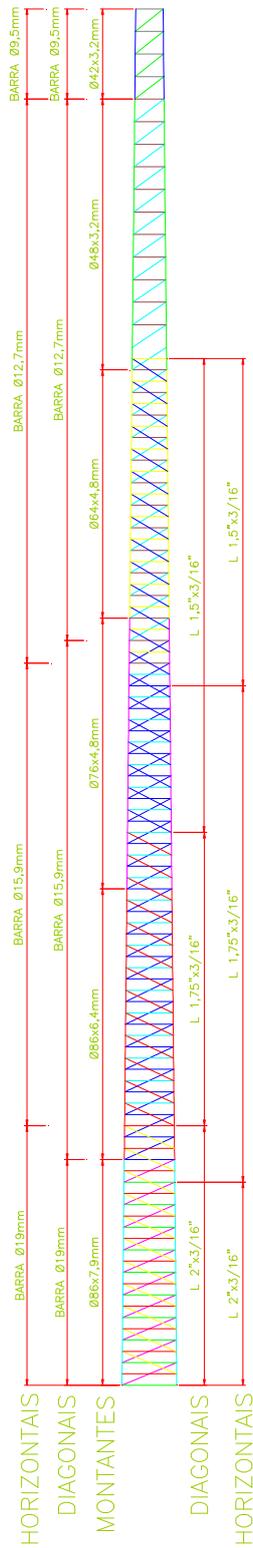


Figura 23– Silhueta da estrutura.
Fonte – Levantamento técnico / AutoCAD 2012

3.6 Cálculo das Ações Atuantes na Estrutura

A estrutura terá como incidência forças devidos ao peso próprio da estrutura, peso dos equipamentos, peso de manutenção, peso dos acessórios e principalmente as cargas devido ao vento agindo perpendicularmente na estrutura e seus componentes.

3.6.1 Hipóteses de Carregamento

A combinação das ações foi feita para condições normais considerando para peso próprio o coeficiente de ponderação para ações permanentes $\gamma_g=1,25$ (estrutura metálica, Figura 7), considerando o vento como ação principal o coeficiente para ações variáveis $\gamma_q=1,4$ (Figura 6). Para os demais equipamentos, considerou-se como sendo ações secundarias, com o coeficiente para ações permanentes de $\gamma_q=1,5$ (Figura 7) e minoradas por um coeficiente de redução (ψ_0) igual a 0,7 (Figura 8).

Serão considerados os ventos incidentes na estrutura orientados em relação à projeção de sua base no solo a 0° , 30° e 60° conforme apresentada na Figura 24.

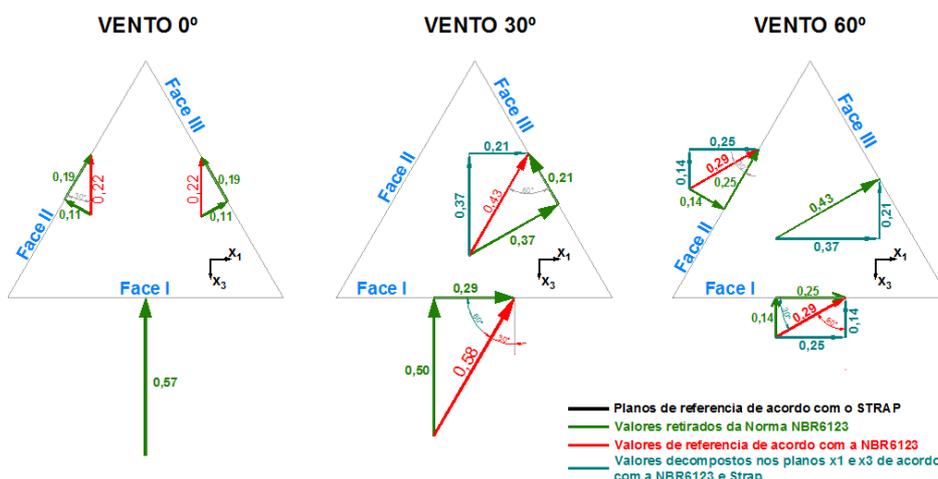


Figura 24– Consideração das ações do vento na estrutura.
Fonte – NBR-6123:88/STRAP

Com isso:

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} F_{Gj,k} + \gamma_q [F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} F_{Qj,k}]$$

Hipótese 1: Peso próprio x 1,25 + Vento 0° x 1,4 + Peso equipamentos x 1,5 x 0,7

Hipótese 2: Peso próprio x 1,25 + Vento 30° x 1,4 + Peso equipamentos x 1,5 x 0,7

Hipótese 3: Peso próprio x 1,25 + Vento 60° x 1,4 + Peso equipamentos x 1,5 x 0,7

3.6.2 Cargas de Vento

3.6.2.1 Vento nas antenas



Figura 25– Vista das antenas existentes.
Fonte – Levantamento técnico

O cálculo do coeficiente da força para cinco antenas HBX-6516DS-VTM (conforme vista na Figura 25) que estão instaladas no topo da estrutura é realizado da seguinte maneira:

- Velocidade característica:

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

$$V_0 = 32 \text{ m/s}$$

$$S_1 = 1,29$$

$$S_2 = \text{III-B } h = 32\text{m} \rightarrow \text{Interpolando entre } h = 30\text{m e } h = 40\text{m}, S_2 = 1,036$$

$$S_3 = 1,1$$

$$V_k = 32 \cdot 1,29 \cdot 1,036 \cdot 1,1$$

$$V_k = 47,04 \text{ m/s}$$

- Pressão dinâmica:

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

$$q = 0,613 \cdot (47,04)^2$$

$$q = 1356,58 \text{ N/m}^2 = 138\text{kgf/m}^2$$

- Coeficiente da força

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_{ef}$$

C_a : para as antenas os valores dos coeficientes de arrasto são pré-estabelecidos pelos fabricantes.

Sendo assim:

Para antenas RF: $C_a = 1,2$

Para antenas MW: $C_a = 1,6$

Para módulos RRU: $C_a = 1,2$

$$F_a = 1,2 \cdot 138 \cdot 1,1 = 182,1 \text{ kgf}$$

Assim, o coeficiente da força a 0° $F_a = 182,1 \text{ kgf}$. Como a torre é triangular, esta força deve ser decomposta para o carregamento do vento a 30° e 60° , portanto:

$$F_{a(x1)} = F_a \times \sin 30^\circ = 91 \text{ kgf}$$

$$F_{a(-x3)} = F_a \times \cos 30^\circ = 157,70 \text{ kgf}$$

Este é um modelo de cálculo do coeficiente da força para algumas antenas, que demonstra a forma de cálculo utilizado para este documento. Os coeficientes das forças das demais antenas são apresentadas em uma planilha, para simplificar o estudo, e os resultados podem ser observados no apêndice 2.

3.6.2.2 Vento nos cabos



Figura 26– Vista dos cabos existentes.
Fonte – Levantamento técnico

A seguir, é apresentado o cálculo da força do coeficiente da força para os cabos (conforme visto na Figura 26) instalados até 5m de altura.

- Velocidade característica:

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

$$V_0 = 32 \text{ m/s}$$

$$S_1 = 1,29$$

$$S_2 = \text{III-B } h = 5\text{m} \rightarrow S_2 = 0,86$$

$$S_3 = 1,1$$

$$V_k = 32.1,29.0,86.1,1$$

$$V_k = 39,05 \text{ m/s}$$

- Pressão dinâmica:

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

$$q = 0,613.(39,05)^2$$

$$q = 934,8 \text{ N/m}^2 = 95,3 \text{ kgf/m}^2$$

- Coeficiente da força:

$$F_a = C_a.q.A_{ef}$$

C_a : O coeficiente de arrasto para cabos é definido pela NBR-6123:1988, conforme Figura 14, apresentada anteriormente.

$$R_e = 7000.V_k.d = 7000.39,05.0,0222 = 6,07 \times 10^3$$

$$C_a = 1,2$$

Sendo assim:

$$F_a = 1,2.95,3.0,0222 = 2,54 \text{ kgf/cabo}$$

A estrutura possui seis cabos de Ø7/8" alinhados, o coeficiente da força para a altura até 5 metros de altura é $F_a = 15,23 \text{ kgf/m}$. O restante do carregamento dos cabos existentes está demonstrado no apêndice 2.

3.6.2.3 Vento na escada



Figura 27 – Escada existente.
Fonte – Levantamento técnico

Para o cálculo do coeficiente da força para a escada (Figura 27) será considerado que a escada tenha uma área de exposição do vento de $A_e = 0,40 \text{ m}^2/\text{m}$

Com isso:

- Velocidade característica:

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

$$V_0 = 32 \text{ m/s}$$

$$S_1 = 1,29$$

$$S_2 = \text{III-B } h = 5\text{m} \rightarrow S_2 = 0,86$$

$$S_3 = 1,1$$

$$V_k = 32 \cdot 1,29 \cdot 0,86 \cdot 1,1$$

$$V_k = 39,05 \text{ m/s}$$

- Pressão dinâmica:

$$q = 0,613 (V_k)^2$$

$$q = 0,613 \cdot (39,05)^2$$

$$q = 934,8 \text{ N/m}^2 = 95,3 \text{ kgf/m}^2$$

- Coeficiente da força:

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_{ef}$$

C_a : O coeficiente de arrasto para torre reticuladas é definido pela ABNT NBR-6123:1988, conforme Figura 12.

\emptyset é definido pela razão entre a área efetiva total e a área efetiva da estrutura, portanto:

$$\emptyset = \frac{14,0}{27,45} = 0,51 \rightarrow C_a = 1,67$$

Sendo assim:

$$F_a = 1,67 \cdot 95,3 \cdot 0,2 = 31,83 \text{ kgf/m}$$

Os coeficientes das forças dos demais módulos da escada estão demonstrados no apêndice 2.

3.6.2.4 Vento nas peças



Figura 28– Estrutura existente.
Fonte – Levantamento técnico

Como pode ser visto na Figura 28, a estrutura é composta da seguinte maneira:

- Montantes: tubulares;
- Horizontais: barras e cantoneiras;
- Diagonais: barras e cantoneiras

O cálculo dos coeficientes de carga das peças na estrutura é feita da mesma maneira demonstrada nos itens anteriores. O que se deve ter cuidado para os cálculos do coeficiente de cargas das peças são os coeficientes de arrasto, que no caso dos perfis tubulares e barras devem ser obtidos na Figura 13, enquanto que para as cantoneiras devem ser obtidos da Figura 12. Estas figuras já descritas neste documento são retiradas da norma de vento ABNT NBR-6123:1988.

Os coeficientes de forças calculados para as peças da estrutura podem ser observadas no apêndice 2.

3.7 Modelo Computacional

Toda a modelagem da estrutura foi feita através do software STRAP-V12 (structural analysis programs), que, conforme apresentado anteriormente, é um programa de análise estrutural por elementos finitos. O programa desenvolvido por gráficos possui diversos recursos que facilitam a modelagem de estruturas simples ou complexas.

3.7.1 Geometria

A estrutura é modelada conforme pode ser visto na Figura 29, através do lançamento dos nós da estrutura, posteriormente interligados por barras. Na sequência, são atribuídas as propriedades das barras que foram levantadas em campo.

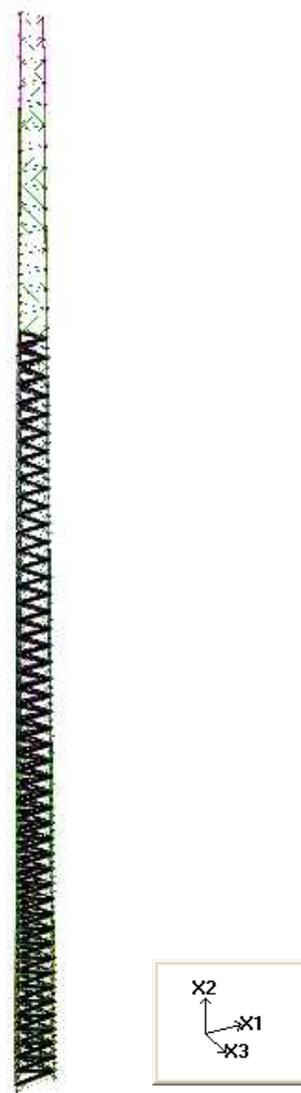


Figura 29– Modelo geométrico tridimensional.
Fonte – STRAP

3.7.2 Cargas

Depois de criado o modelo da estrutura, propriedades atribuídas às barras e apoios, dá-se o carregamento da estrutura onde todos os coeficientes de forças definidos através dos cálculos, conforme demonstradas anteriormente, são aplicados à estrutura.

As cargas foram definidas da seguinte maneira:

- Peso próprio - é o peso real das peças e é definido diretamente pelo programa, com cargas distribuídas em todas as peças da estrutura na direção de $-X_2$.

- Vento/peso das plataformas - o vento e o peso das plataformas são carregados pontualmente no local onde se encontram na estrutura, de acordo com os levantamentos de campo. O peso é carregado através de cargas pontuais na direção $-X_2$, já o vento nas plataformas são carregadas pontualmente nas direções X_1 e $-X_3$, dependendo se o carregamento for em 0° , 30° ou 60° .

- Deformações: As deformações das estruturas são analisadas segundo o estado de utilização. O estado de utilização considerado equivale a considerar a ação das forças de vento para um valor operacional que corresponde a 55% do vento característico, conforme especificação das operadoras.

Os valores máximos de deslocamentos e rotações estão apresentados na Tabela 2, em seu valor máximo, para os nós numerados na Figura 30.

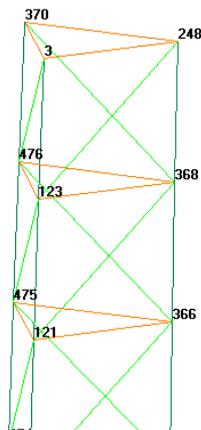


Figura 30– Nós com deslocamento máximo.
Fonte – STRAP

MÁX. DESLOCAMENTOS (Unids: cm)						
Nó	X1	X2	X3	X4	X5	X6
Máx.	9.0832472	-1.1656222	-47.4238358	-0.0299094	0.0021438	-0.0049094
Comb	3	1	1	1	2	3
Nó	248	471	248	366	3	461

Tabela 2 – Máximo deslocamento dos nós.
Fonte – STRAP-V12

A deflexão máxima (α) para estado de utilização da torre é de 0° 30' 00''

$$\alpha = \text{ArcTg}(47,42/3200) = 0^{\circ}50' 56,36''$$

Portanto, o valor calculado é superior ao valor determinado em especificação. Pode-se verificar que há um deslocamento excessivo da estrutura, devendo ser reforçada até que se minimize tais deformações.

- Reações de apoio: as reações de apoio da estrutura é um item muito importante principalmente para análise e dimensionamento da fundação. Para a obtenção das reações de apoio da estrutura, são realizadas as verificações para as piores situações em que a estrutura será solicitada. As reações de apoio dos nós da Figura 31 podem ser observadas na Tabela 3.

REAÇÕES (Unids: kg, kg*metro)							
nó	cmb	X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	Máx	-328.393	-11768.809	2056.317	587.653	15.925	213.534
	Comb	10	10	7	7	9	9
	Mín	-2654.327	-79071.156	414.430	108.846	1.059	15.157
	Comb	9	9	11	12	11	10
2	Máx	1251.787	-2810.390	1599.515	321.963	31.979	121.548
	Comb	7	12	7	8	7	3
	Mín	-308.938	-58830.469	144.211	44.188	5.740	-82.240
	Comb	3	7	12	12	11	7
369	Máx	317.668	122156.352	3198.014	488.858	11.790	178.728
	Comb	7	7	7	7	7	9
	Mín	-282.971	22748.387	528.845	76.000	-1.547	6.151
	Comb	3	12	12	12	2	10

Tabela 3– Reações de apoio.

Fonte – STRAP-V12

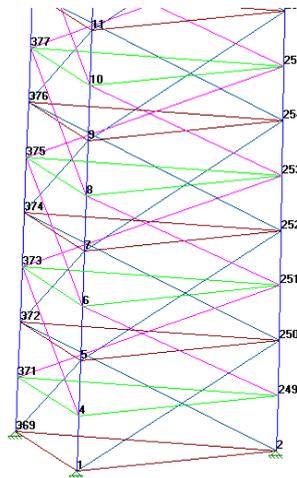


Figura 31 – Nós das reações de apoio.

Fonte – STRAP-V12

3.7.4 Metálica

Verifica-se posteriormente a situação em que a estrutura se encontra. Podemos obter um relatório detalhado das barras e os valores em porcentagem da taxa de utilização de cada barra, conforme apresentadas na Figura 32, Figura 33 e Figura 34. Já os resultados detalhados do montante mais solicitado podem ser observados na Figura 35.

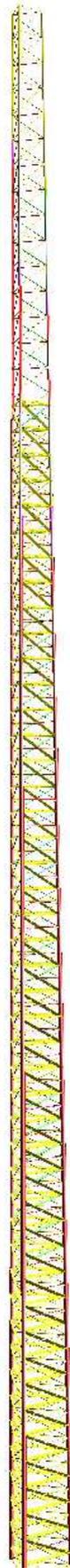


Figura 32 – Resultados das barras da estrutura.
Fonte – STRAP-V12

Cores pela capacidade Exibir % da capacidade

Tipo de resultado : Máximo dos resultados

Não considerar a verificação de esbelteiz

Cor	Capacidade	Cor	Capacidade
	0 % to 60 %		90 % to 102 %
	60 % to 70 %		102 % to 110 %
	70 % to 80 %		110 % to 125 %
	80 % to 90 %		125 % to 999 %

Figura 33 – Legenda com os resultados de acordo com as cores.
 Fonte – STRAP-V12

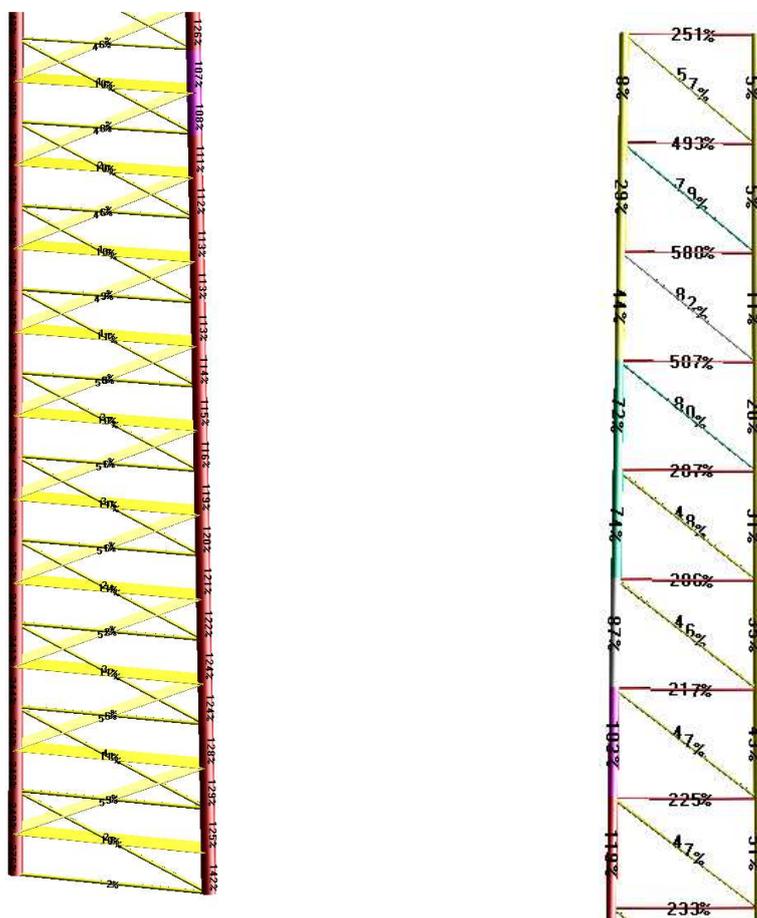


Figura 34 - Resultados das solicitações da base e topo da estrutura.
 Fonte – STRAP-V12

CALCULO	EQUAÇÃO	FATORES	VALORES	RESULT
Cortante V2 5.4.3.2.1a	$1.1Vsd/Vrk < 1$ $Vrk=0.6*Fy*Aw$	Aw= 9.69	Vrd = 1510.17 Vrk = 13215.9	0.11
Momento M3 (D.2.2a) sem FLT	$\frac{Msd}{0.91Mrd} < 1.00$	Z = 48.35	Msd = 368.87 Mrd = 1098.89	0.34
Cortante V3 5.4.3.2.1a	$1.1Vsd/Vrk < 1$ $Vrk=0.6*Fy*Aw$	Aw= 9.69	Vrd = 556.51 Vrk = 13215.9	0.04
Momento M2 (D.2.2a) sem FLT	$\frac{Msd}{0.91Mrd} < 1.00$	Z = 48.35	Msd = 238.58 Mrd = 1098.89	0.22
Deformacao	$\frac{def.}{L/360} < 1.00$		def. = 0.00005	0.07
Forca Axial 5.3.2	$\frac{Nsd}{Nrk/1.1} < 1.00$	(kL/r) _x = 9 (kL/r) _y = 9 Nrk = X*Q*Ag*Fy X = 1.00	Nsd = 104144 Ag = 19.38 Nrk = 43868.8 Fy = 250.00	2.37

Figura 35 - Resultados detalhados do montante da base.
Fonte – STRAP-V12

O calculista deve inserir os padrões que serão seguidos para análise da estrutura. Dentro dos padrões, os itens mais importantes para análise e dimensionamento de estruturas metálicas são:

- Deformação admissível: conforme ABNT NBR8850:2003 a deformação transversal ou longitudinal de um suporte submetido a carregamento permanente, definido como estado limite de utilização, não deve ser superior a H/100, onde H é a altura total do suporte.
- Tipo de aço: em função de não ter acesso ao memorial de cálculo ou projeto da estrutura foi utilizado aço A36 (MR250) para análise;
- Esbeltez limite: conforme NBR8850:2003 foi adotado 200 para compressão e 240 para tração.

3.7.5 Conclusão da Estrutura Existente

Das análises feitas e dos procedimentos adotados ao estudo, verificou-se que a estrutura vertical, encontra-se em condições inseguras de utilização, necessitando de reforço estrutural para os carregamentos existentes, carregamentos de ampliação (antenas a instalar) e carregamentos de capacidade de reserva (reserva de carga). A seguir será dimensionada uma proposta de reforço para que a estrutura existente suporte tais carregamentos.

4. DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO

4.1 Proposta de Reforço

Pelos resultados obtidos anteriormente e após análise da estrutura com base nas fotos e levantamento técnico, como proposta de reforço, será dimensionado o encamisamento da estrutura existente com outra estrutura autoportante, ou seja, projetar uma nova estrutura por fora da existente, ligadas pelos montantes das estruturas, isto faz com que a estrutura nova e a existente trabalhem conectadas por cliques de ligação.

O modelo de estrutura que se encontra pode ser verificado na Figura 36.



Figura 36 - Silhueta da estrutura.
Fonte – Levantamento técnico

4.2 Definição da Geometria

Para a definição da estrutura de reforço o engenheiro calculista deve levar em consideração alguns itens muito importantes para que o dimensionamento, projeto e execução sejam facilitados e simplificados, são eles:

- Distância entre a torre existente e o reforço: deve-se tomar cuidado para que a distância não seja muito grande para que a ligação entre elas, pelos cliques, não seja prejudicada, e não pode também ser muito curta para que a execução do reforço não seja dificultada.

- Peças: as peças de escolha do projetista devem ser usuais de mercado, assim os fabricantes não terão dificuldades para produção das peças do reforço.

- Tipo de aço: também devem ser preferencialmente usuais de mercado, quando forem utilizados montantes em cantoneiras deve-se tomar cuidado com o tipo de aço a ser utilizado, pois em torres de base triangulares os montantes são dobrados e a dobra pode prejudicar a resistência das peças.

Portanto, para o caso de estudo, a proposta de reforço é apresentada na figura Figura 37 e Figura 38.

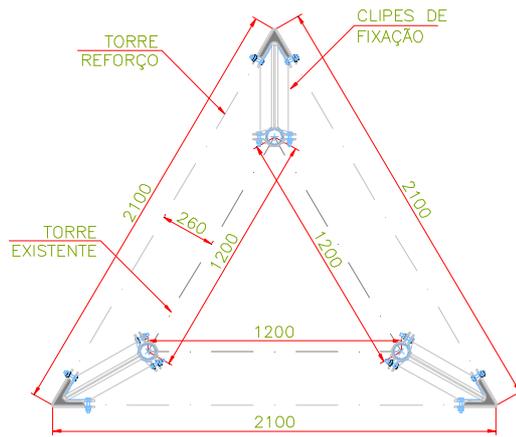


Figura 37 – Reforço da estrutura.
 Fonte – AutoCAD 2012

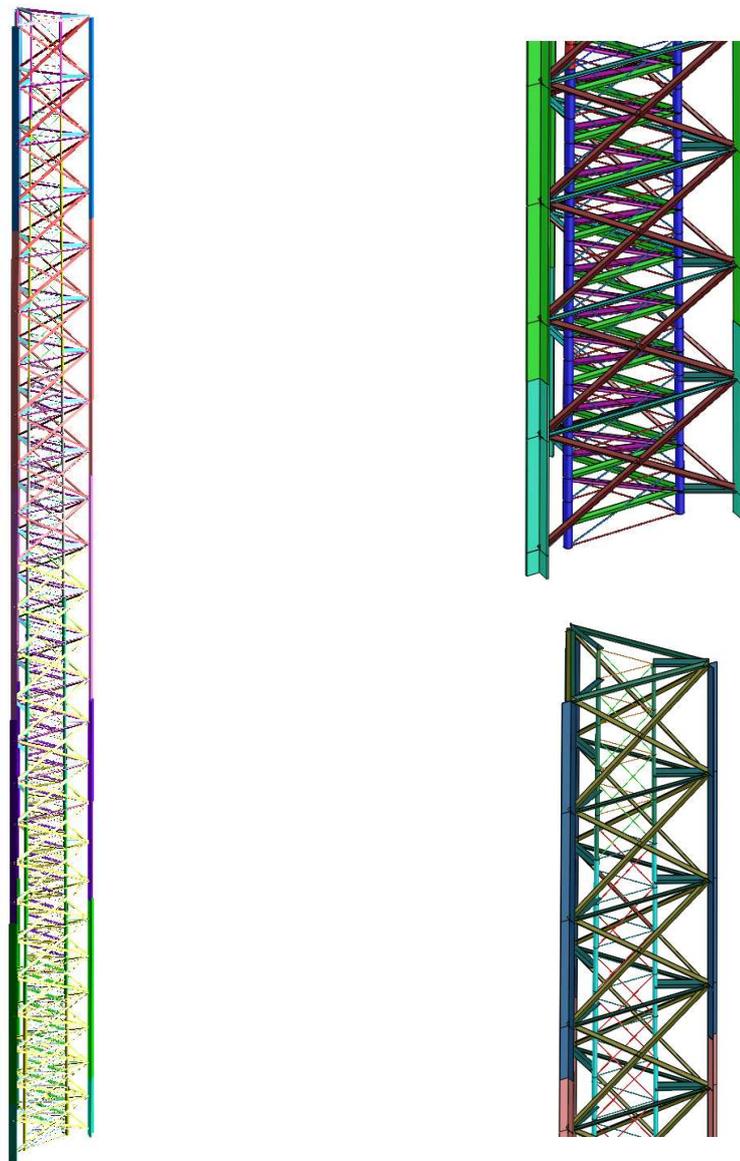


Figura 38 – Reforço da estrutura – Silhueta / Base / Topo da estrutura.
 Fonte – STRAP-V12

4.3 Silhueta da Estrutura

As propriedades das peças da estrutura de reforço podem ser vistas na Figura 39.

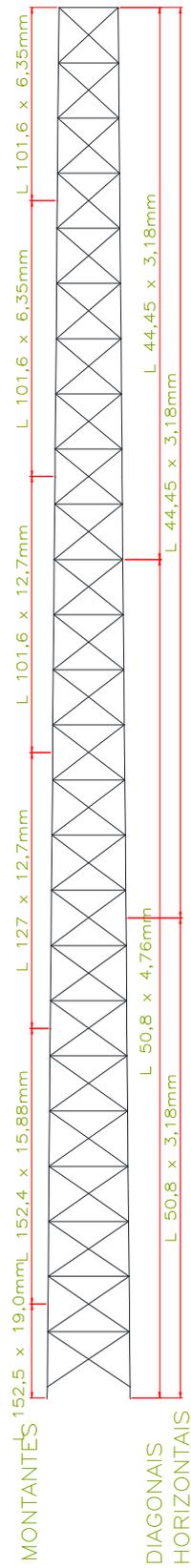


Figura 39 – Propriedades da estrutura de reforço.
Fonte – AutoCAD 2012/ Levantamento Técnico

4.4 Materiais da Estrutura de Reforço

As propriedades das peças da estrutura foram definidas da seguinte maneira:

- Chapas: Aço ASTM A36 (MR250).
- Montantes: Aço A572 g-50.
- Horizontais e Diagonais: Aço ASTM A36 (MR250).
- Solda: E80-XX.
- Chumbadores: SAE 1045
- Galvanização: aço carbono e $\geq 90\mu\text{m}$ ASTM A123

4.5 Carregamento

Após ser adicionada a silhueta o reforço da estrutura, deve ser adicionado nas peças de reforço os ventos incidentes. As demais cargas continuam as mesmas, lembrando que as antenas, equipamentos e demais acessórios continuam instalados na estrutura existente. Os carregamentos das peças da estrutura de reforço são apresentados no apêndice 3.

4.6 Resultados

Assim como feito na análise da estrutura existente, podem ser verificados os esforços máximos na estrutura de reforço na Tabela 4.

- Esforços máximos no montante mais solicitado do reforço:

Esforços na barra: 1472							
Comb.	Nó	Axial	V2	V3	MT	M2	M3
1	570	105040.211	-25.618	5.190	-0.004	-82.624	136.975
1	569	-105094.289	61.889	15.751	0.004	89.013	-189.920
2	570	97395.984	-30.509	17.551	-0.909	-129.627	96.347
2	569	-97452.188	56.217	12.726	0.909	126.708	-148.821
3	570	76052.195	-0.023	-33.998	-0.854	-139.084	50.977
3	569	-76106.195	11.576	86.267	0.854	211.849	-57.995
Máx.		105094.289	-0.023	17.551	-0.004	-82.624	189.920
Comb		1	3	2	1	1	1
Mín.		76052.195	-61.889	-86.267	-0.909	-211.849	50.977
Comb		3	1	3	2	3	3

Exibir resultados somente nas extremidades
 Exibir resultados a 1/10 do vão

OK

Tabela 4 – Solicitações máximas do montante da base (kgf / kgf.m).

Fonte – STRAP-V12

- Deslocamentos: considerando a ação das forças de vento para um valor operacional que corresponde a 55% do vento característico, conforme especificações das operadoras.

Os valores máximos dos deslocamentos e rotações estão apresentados na Tabela 5, em seu valor máximo, para os nós numerados na Figura 40.

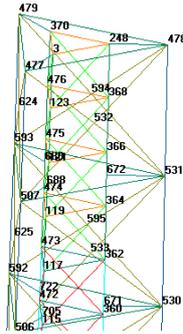


Figura 40 – Nós com deslocamentos máximos.
Fonte – STRAP

MÁX. DESLOCAMENTOS (Unids: cm)						
Nó	X1	X2	X3	X4	X5	X6
Máx.	6.72595	-0.48065	-14.04335	0.0252643	-0.0026360	-0.0213608
Comb	3	1	1	2	1	1
Nó	mb111	592	358	368	344	370

Tabela 5– Máximo deslocamento dos nós.

Fonte – STRAP-V12

A deflexão máxima (α) para estado de utilização da torre é de $0^\circ 30' 00''$:

$$\alpha = \text{ArcTg}(14,04/3000) = 0^\circ 16' 5,31''$$

O valor calculado é inferior ao valor determinado em especificação e, dessa forma, a nova estrutura se encontra em conformidade.

- Reações de apoio podem ser verificadas na Tabela 6 e os nós na Figura 41:

REAÇÕES (Unids: kg, kg*metro)							
nó	cmb	X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	Máx	-136.805	-4183.150	1307.673	349.503	5.100	170.782
	Comb	10	10	7	7	9	9
	Mín	-1811.428	-40463.246	261.410	59.664	-3.884	3.660
	Comb	9	9	11	12	2	10
2	Máx	891.245	12890.622	1308.873	203.559	15.693	138.740
	Comb	7	3	7	8	7	3
	Mín	-636.357	-24298.918	80.397	20.756	2.382	-59.012
	Comb	3	7	12	12	11	7
369	Máx	235.058	49736.699	1865.502	298.093	7.017	150.246
	Comb	1	7	7	7	7	9
	Mín	-321.214	7316.798	260.036	38.825	-3.561	-1.615
	Comb	9	12	12	12	2	1
480	Máx	-500.401	-9869.261	2682.897	797.881	-0.735	939.990
	Comb	10	10	9	7	12	9
	Mín	-4314.157	-80366.812	488.880	144.118	-8.236	84.402
	Comb	9	9	11	11	7	10
481	Máx	2021.845	13980.302	2081.066	738.341	8.559	466.044
	Comb	7	3	7	7	8	3
	Mín	-1441.421	-50432.262	11.746	57.217	1.198	-327.081
	Comb	3	7	12	12	12	7
568	Máx	128.152	108481.211	5958.473	1342.089	-1.367	401.348
	Comb	8	7	7	7	10	9
	Mín	-665.644	18096.609	872.675	193.105	-11.075	20.506
	Comb	3	12	12	12	9	10

Tabela 6– Reações de apoio.

Fonte – STRAP-V12

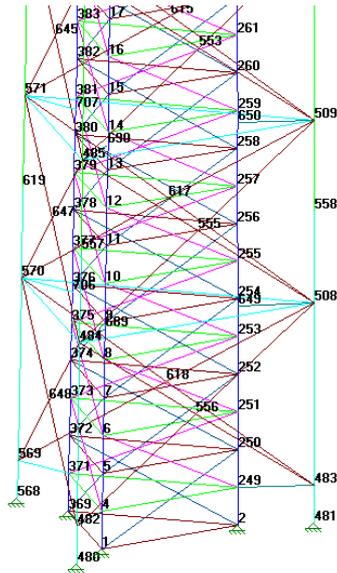


Figura 41– Nós das reações de apoio.
 Fonte – STRAP-V12

4.7 Metálicas

Assim como na verificação da estrutura existente, obtemos uma taxa de utilização que é a razão entre a resistência devido às solicitações e a resistência de cálculo das peças que estão apresentadas na Figura 42, Figura 43 e Figura 44. Os resultados detalhados do montante mais solicitado podem ser analisados na Figura 45.

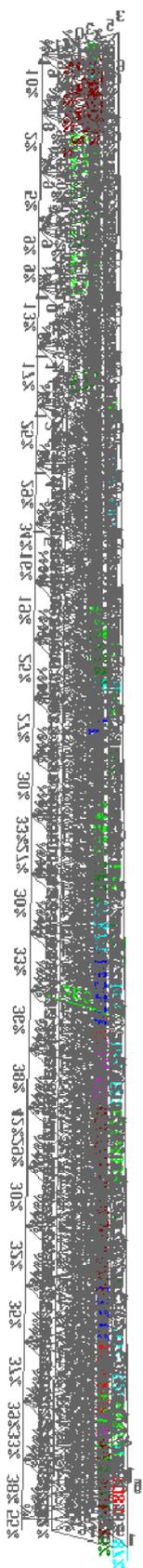


Figura 42– Resultados das barras da estrutura.
 Fonte – STRAP-V12

Cores pela capacidade Exibir % da capacidade

Tipo de resultado : Máximo dos resultados

Não considerar a verificação de esbeltez

Cor	Capacidade	Cor	Capacidade
	0 % to 60 %		90 % to 102 %
	60 % to 70 %		102 % to 110 %
	70 % to 80 %		110 % to 125 %
	80 % to 90 %		125 % to 999 %

OK Cancelar

Figura 43– Legenda com os resultados de acordo com as cores.
 Fonte – STRAP-V12

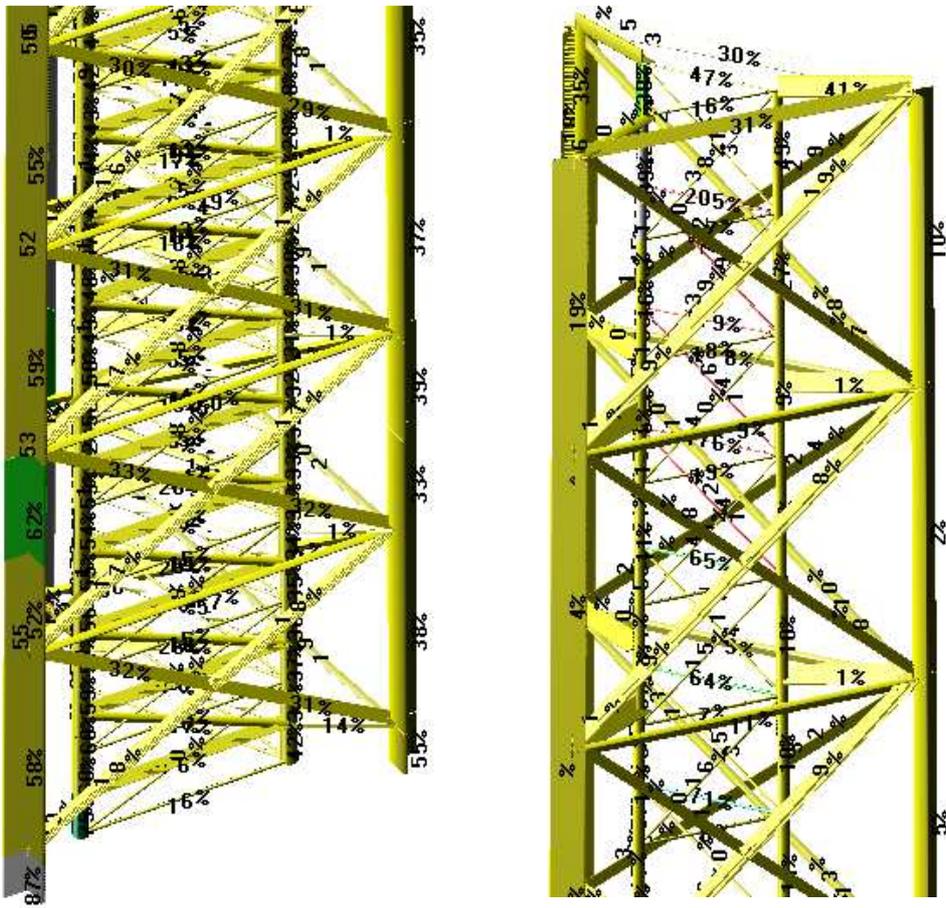


Figura 44– Taxa de utilização das peças da base e topo da estrutura.
 Fonte – STRAP-V12

CALCULO	EQUAÇÃO	FATORES	VALORES	RESULT
Momento M3 (D.2.2a) sem FLT	$\frac{Msd}{0.91Mrd} < 1.00$	Z = 109.20	Msd = 244.98 Mrd = 5137.41	0.05
Momento M2 (D.2.2a) sem FLT	$\frac{Msd}{0.91Mrd} < 1.00$	Z = 109.20	Msd = 121.84 Mrd = 5137.41	0.02
Força Axial 5.3.2	$\frac{Nsd}{Nrk/1.1} < 1.00$	(kL/r) _x = 26 (kL/r) _y = 41 Nrk = X*Q*Ag*Fy X = 0.89	Nsd = 105304 Ag = 54.44 Nrk = 151427 Fy = 345.00	0.70
Flambagem Lateral com Torção (5-6)(AISC)	$\frac{Msd}{Mrk/1.1} < 1.00$ Segmento Crítico de 0.00 a 1.21 na mesa -z Momentos na extr. do segmento: 136.58 e 244.98	Lb = 1.21 Cb = 1.24	Msd = 244.98 Mrk = 4670.37 My = 3767.43 Mob = -1.00	0.05

Figura 45 - Resultados detalhados do montante da base.
Fonte – STRAP-V12

Serão elaborados os cálculos dos montantes com as maiores reações solicitantes de tração e de compressão, que são respectivamente:

$$N_{sdt} = 63,43 \text{ tf e } N_{sdc} = 82,87 \text{ tf}$$

- Dimensionamento à tração:

Para o dimensionamento deve sempre ser atendida a seguinte condição:

$$N_{sdt} \leq N_{Rdt}$$

A resistência de cálculo pode ser expressa da seguinte maneira:

$$N_{Rdt} = \Phi_R \cdot F_t \cdot A_n$$

Onde:

$$\Phi_R = 0,9;$$

$$A_n = 54,44 \text{ cm}^2;$$

$F_t = F_y = 3450 \text{ daN/cm}^2 = 3,45 \text{ tf/cm}^2$ ($F_y = 345 \text{ MPa}$, pois o aço adotado para os montante foi o A572 g 50).

Com isso:

$$N_{Rdt} = 0,9 \cdot 3,45 \cdot 54,44 = 169,04 \text{ tf} > 63,43 \text{ tf} \rightarrow \text{OK}$$

- Dimensionamento à compressão:

Para o dimensionamento deve sempre ser atendida a seguinte condição:

$$N_{sdc} \leq N_{Rdc}$$

A resistência de cálculo pode ser expressa da seguinte maneira:

$$N_{Rdc} = \Phi_R \cdot F_c \cdot A_n$$

Onde:

$$\Phi_R = 0,9;$$

$$A_n = 54,44 \text{ cm}^2;$$

$$F_c = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{kL/r}{C_c} \right)^2 \right] F_y \quad \text{Se } kL/r \leq C_c$$

$$F_c = \frac{\pi^2 E}{(kL/r)^2} \quad \text{Se } kL/r > C_c$$

$$\text{Com } C_c = \pi (2E / F_y)^{1/2}$$

$$kL/r = 121/4,64 = 26,07$$

$$C_c = \pi(2.2100/3,45) = 109,6$$

$$\text{Portanto: } kL/r \leq C_c$$

$$F_c = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{kL/r}{C_c} \right)^2 \right] F_y = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{26,07}{109,6} \right)^2 \right] \cdot 3,45 = 3,35 \text{ tf}$$

Com isso:

$$N_{Rdt} = 0,9 \cdot 3,35 \cdot 54,44 = 164,25 \text{ tf} > 82,9 \text{ tf} \rightarrow \text{OK}$$

4.8 Dimensionamento das Ligações

Neste item, será exemplificada a verificação de uma ligação, sendo que o restante das análises foram planilhadas e podem ser verificadas no apêndice 4, seguindo as mesmas prescrições demonstradas nos cálculos.

- Dados dos montantes: na Tabela 7, são apresentados os dados dos montantes, com os esforços máximos, dimensões e propriedades.

ESFORÇOS			MONTANTE						
LIGAÇÃO	Comp. (N _{c,sd})	Tração (N _{t,sd})	Peça	Larg. Montante	Esp. Mont.	Área	Aço	fy	fu
L1	715KN	480KN	L 6"x3/4"	15,24	1,91cm	54,4cm ²	A-572 gr50	345	450
L2	517KN	363KN	L 6"x5/8"	15,24	1,59cm	45,9cm ²	A-572 gr50	345	450
L3	340KN	227KN	L 5"x1/2"	12,7	1,27cm	30,6cm ²	A-572 gr50	345	450
L4	188KN	114KN	L 4"x1/2"	10,16	1,27cm	24,2cm ²	A-572 gr50	345	450
L5	63KN	29KN	L 4"x1/4"	10,16	0,64cm	12,5cm ²	A-572 gr50	345	450

Tabela 7– Dados dos montantes.

Fonte – Excel

- Esforços nos parafusos:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,4 \times A_b \times f_{ub}}{\gamma_{a2}}$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,4 \cdot 1,98 \cdot 82,5}{1,35} = 48,4 \text{ KN/parafuso}$$

Como a ligação será composta por duas chapas contendo 4 parafusos por chapa em cada montante e com dois planos de corte, teremos uma resistência de cálculo dos parafusos igual:

$$F_{v,Rd} = 774,4 \text{ KN}$$

E como o esforço máximo na ligação é de $F_{v,Sd} = 715 \text{ KN}$, a condição é atendida.

- Estado limite dos perfis:

Seção líquida, sendo o montante e as chapas de ligação demonstradas na Figura 46:

$$A_n = b_n \cdot t$$

Onde:

- A_n = área líquida

- b_n : largura líquida da seção

- t : espessura da chapa

$$b_n = b - \sum d_f + \sum \frac{s^2}{4g}$$

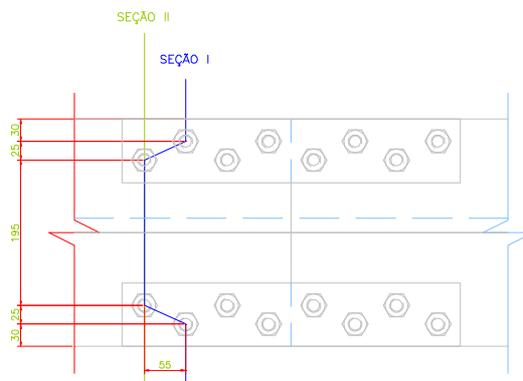


Figura 46 – Montante e chapas de ligação.
Fonte – AutoCAD 2012

- Seção I

$$b_n = 27,37 \text{ cm}$$

$$A_e = 52,0 \text{ cm}^2$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}}$$

$$N_{t,Rd} = 1.733,3 \text{ KN}$$

- Seção II

$$b_n = 24,79 \text{ cm}$$

$$A_e = 47,1 \text{ cm}^2$$

$$N_{t,Rd} = 1.570 \text{ KN}$$

- Seção bruta

$$A_g = 54,4 \text{ cm}^2$$

$$f_y = 345 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{a1} = 1,1$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$N_{t,Rd} = 1.706,18 \text{ KN}$$

- Verificação dos Furos:

Dimensionamento de pressão de contato.

$$\text{Resistência de contato} = R_n \cdot \Phi$$

Onde:

$$R_n = \alpha \cdot A_b \cdot f_u$$

$$A_b = t \cdot d$$

$$\Phi = 0,75$$

Esmagamento sem rasgamento:

$$\alpha = 3,0$$

Com isso:

$$R_n = 3,0 \cdot 1,59 \cdot 1,91 \cdot 45,8 = 3.279,85$$

$$\text{Resistência de contato} = 3.279,85 \cdot 0,75 = 2.459,0 \text{ KN}$$

Para rasgamento entre furos consecutivos:

$$\alpha_s = \frac{s}{d} - \eta_1 \leq 3,0$$

$$\text{Para furos padrão } \eta_1 = 0,5 \rightarrow \alpha = 2,65$$

Com isso:

$$R_n = 2,65 \cdot 1,59 \cdot 1,91 \cdot 45,8 = 2.897,20$$

$$\text{Resistência de contato} = 2.897,20 \cdot 0,75 = 2.172,9 \text{ KN}$$

Para rasgamento entre furo e borda:

$$\alpha_e = \frac{s}{d} - \eta \leq 3,0$$

Para furos padrão $\eta = 0,0 \rightarrow \alpha = 1,89$

Com isso:

$$R_n = 1,89 \cdot 1,59 \cdot 1,91 \cdot 45,8 = 2.066,31$$

$$\text{Resistência de contato} = 2.066,31 \cdot 0,75 = 1.549,73 \text{ KN}$$

Sendo assim, foram verificadas que as resistências de contato na primeira ligação em todas as situações são maiores que as solicitações.

- Dados das chapas de ligação: na Tabela 8, são apresentados os dados das chapas de ligação entre montantes com dimensões, distancias entre furos, furo e borda e propriedades das chapas.

DADOS DA CHAPA DE LIGAÇÃO														
Larg	Esp.	Unidades	Ø		Furos / chapa	Aço	Fy	Fu	Linhas / chapa	Furos	Dist. Furo a borda (e)	Dist. centro /centro	s	g
8,5cm	0,63cm	4	5/8"	1,59cm	4	A36	250	400	2	Deslocada	3,0cm	5,0cm	5,5cm	2,5cm
8,2cm	0,63cm	4	5/8"	1,59cm	4	A36	250	400	2	Deslocada	3,0cm	5,0cm	5,5cm	3,0cm
6,0cm	0,63cm	4	5/8"	1,59cm	3	A36	250	400	1	Linha	3,0cm	5,0cm	5,5cm	-
6,0cm	0,63cm	4	5/8"	1,59cm	3	A36	250	400	1	Linha	3,0cm	5,0cm	5,5cm	-
6,0cm	0,63cm	4	5/8"	1,59cm	3	A36	250	400	1	Linha	3,0cm	5,0cm	5,5cm	-

Tabela 8–Chapas de ligação.

Fonte – Excel

- Estados limites das chapas de ligação:

- Estado limite de escoamento da seção Bruta:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}}$$

Onde:

- A_g : área bruta da seção

- f_y : tensão de escoamento (250 MPa)

- γ_{a1} : coeficiente de minoração (1,1).

$$A_g = 8,5 \cdot 0,63 = 5,35 \text{ cm}^2$$

$N_{t,Rd} = 121,6 \text{ KN}$ de resistência por chapa, como serão utilizados 4 chapas por ligação, a resistência à tração da ligação será de:

$$N_{t,Rd} = 486,4 \text{ KN}$$

Como a solicitação de cálculo desta ligação é de $N_{t,Ed}=480$ KN é verificada que a ligação é atendida.

- Estado limite de escoamento da seção líquida:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}}$$

Onde:

- A_e : área líquida efetiva
- f_u : tensão de ruptura do aço (400 MPa)
- γ_{a2} : coeficiente de minoração – 1,35.

$$A_e = 4,82 \text{ cm}^2$$

$N_{t,Rd} = 142,81$ KN de resistência por chapa, como serão utilizados 4 chapas por ligação, a resistência à tração da ligação será de:

$$N_{t,Rd} = 571,2 \text{ KN}$$

Como a solicitação de cálculo desta ligação é de $N_{t,Ed}=424$ KN é verificada que a ligação é atendida.

4.9 Dimensionamento dos Chumbadores

O dimensionamento dos chumbadores é feito com base nas reações de apoio da estrutura de reforço, conforme Tabela 9.

Cond. de Carga	Compressão (tf)	Tração(tf)	Reação horizontal (tf)
MÁXIMO	108,48	80,37	5,96

Tabela 9– Máximos esforços para o carregamento (7,27 m²).

Fonte – STRAP-V12

- Verificação a tração:

Dados dos chumbadores:

Aço: SAE 1045

$$F_{ub} = 560 \text{ MPa} = 56 \frac{\text{KN}}{\text{cm}^2}$$

Barra $\varnothing 1,1/4'' = \varnothing 3,175 \text{ cm}$

$$A_b = 7,92 \text{ cm}^2$$

$$A_e = 0,75 A_b = 5,94 \text{ cm}^2$$

$$\gamma_{a2} = 1,35$$

- Resistência à tração:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}}$$

Com isso:

$$N_{t,Rd} = 246,4 \text{ KN} = 24,64 \text{ tf}$$

Como a reação de tração do reforço é de 80,37 tf serão utilizados 4 chumbadores para fixação do montante na fundação.

- Verificação ao cisalhamento:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,4 A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}}$$

$$A_b = 7,92 \text{ cm}^2$$

$$F_{ub} = 560 \text{ MPa} = 56 \frac{\text{KN}}{\text{cm}^2}$$

$$\gamma_{a2} = 1,35$$

Com isso:

$$F_{v,Rd} = 131,41 \text{ KN} = 13,14 \text{ tf}$$

Como pode ser verificada, a resistência de um parafuso já basta para combater a reação máxima horizontal no apoio da base, com isso, está barra atende as solicitações a ela imposta.

4.10 Dimensionamento da Chapa de Base

A chapa de base (Figura 47) tem como objetivo simples:

- Distribuir a pressão concentrada do montante para uma determinada área da fundação;
- Garantir a vinculação entre o montante da estrutura e a fundação.

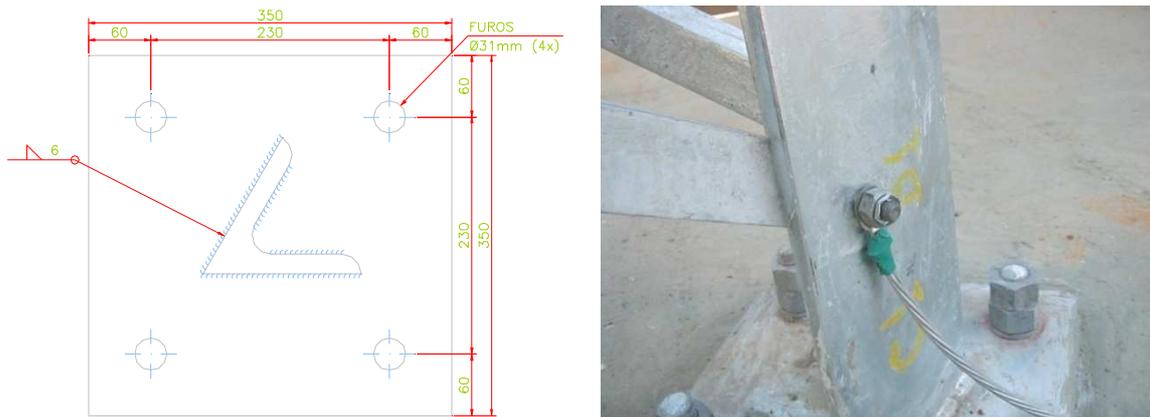


Figura 47 – Chapa de base.
Fonte – AutoCAD 2012/ Levantamento técnico

A chapa de base tem como objetivo distribuir a pressão de compressão na fundação, já que a reação de tração deve ser suportada pelos chumbadores da estrutura. Com isso devemos analisar a pressão que a estrutura está solicitando no bloco de fundação, e deve-se atender ao seguinte critério:

$$f_{c\max} = \frac{N_k}{B.L} + \frac{6M_k}{B.L^2} \quad \text{e} \quad F_c = 0,35 f_{ck}$$

Onde:

$$f_{c\max} > F_c$$

$$f_{c,\text{Max}} = \frac{108.500}{35 \times 35} = 88,57 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_c = 0,35 \cdot 200 = 70 \text{ kg/cm}^2$$

Com essa verificação vimos que as dimensões da chapa de base atende ao critério de segurança.

- Verificação da solda do montante na chapa de base:

A verificação da solda do montante na chapa de base será levada em consideração apenas o cisalhamento paralelo ao eixo da solda, na seção efetiva.

A verificação da solda se dará seguindo a relação:

$$F_{w,Rd} = 0,6 \cdot A_w \cdot f_w / \gamma_{a1}$$

Para E80 $f_w = 550 \text{ Mpa}$

$$\gamma_{a1} = 1,25$$

A_w = Área efetiva das soldas

$$A_w = t_w \cdot \ell$$

$$A_w = 0,644,3 = 26,58 \text{ cm}^2$$

$$F_{w,Rd}=0,6.26,58.5500/1,05$$

$$F_{w,Rd}= 83.537,14 \text{ kgf}$$

Como pode ser verificada, a resistência de cálculo da solda no montante é maior que a solicitação de cálculo a tração que é de 80.370 kgf, com isso, atende aos esforços solicitados.

4.11 Detalhamento do Clipe de Ligação

Neste item será apresentado o clipe de ligação (Figura 48), que faz a transferência de esforços entre os montantes da estrutura de reforço e existente.

O clipe é composto de uma peça a ser instalada entre as abas do montante existente e do reforço. Para a fixação do reforço ao montante existente, em cada aba externa de cada uma das duas peças é fixada uma chapa, de modo que cada perfil seja abraçado por esta chapa. A fixação é feita por parafusos, num total de quatro para cada chapa. Esta configuração de fixação foi idealizada de modo que, após o reforço, os dois elementos atuem como elemento único, estando aptos a receberem um acréscimo de carregamento.

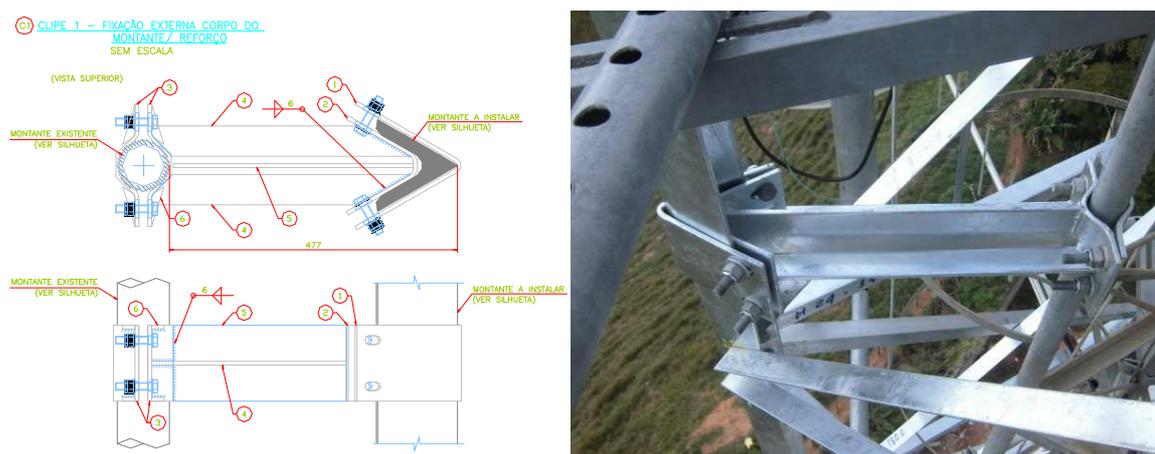


Figura 48 – Clipes de ligação.
Fonte – AutoCAD 2012/Levantamento técnico

O dimensionamento destes clipes não será abordado neste documento, sendo que este dimensionamento se deu por meio de análises por elementos finitos e posteriormente analisados através de ensaio.

Do ponto de vista prático, observado a partir dos resultados dos ensaios, os valores de espaçamento provenientes da instalação de até seis clipes para cada montante (o que corresponde a aproximadamente 1 clipe para cada metro) é suficiente para atender a situações de reforço da estrutura. Valores de espaçamento entre clipes superiores aos observados para ensaios com seis clipes não são recomendados. A utilização de espaçamentos menores (que implica em maior número de clipes instalados no montante) poderá acontecer, caso seja necessária a adição de grandes valores de carregamento.

4.12 Conclusão das Estruturas

As máximas deformações globais para o estado de utilização encontram-se dentro das prescrições normativas e especificações vigentes.

A Tabela 10 apresenta um resumo das resistências das estruturas.

Resistências	AEV (m²)	Estrutura
Situação (antes reforço)	7,27m ²	Não Atende
Situação Futura (após reforço)	7,27m ²	Atende

Tabela 10– Resistências da estrutura.

Fonte: STRAP-V12

Conforme resultados apresentados anteriormente, pode-se verificar que a estrutura existente estará em condições seguras após execução do reforço estrutural e suportará os esforços das antenas existentes, antenas a instalar e reserva de carga.

Assim como a estrutura existente, o reforço estrutural foi dimensionado para que, além de reforçar a estrutura existente, suporte as solicitações devidas às ações de vento e peso das peças, acessórios e manutenção.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo de caso de uma torre metálica autoportante para telecomunicações, instalada na cidade de Urucânia/MG. Foram elaboradas as análises necessárias para verificação da estabilidade e, na sequência, foi elaborado o dimensionamento de uma proposta de reforço, para que a mesma suporte todas as solicitações a ela impostas.

Após elaboração deste trabalho, pode-se verificar a complexidade da análise estrutural e dimensionamento de uma torre metálica, já que na graduação este assunto é pouco abordado e é rara a bibliografia nesta área. Com isso, o engenheiro calculista, além de trabalhar com as poucas bibliografias existentes, deve procurar em profissionais mais experientes o embasamento para métodos de dimensionamento e verificação de estabilidade de estruturas. Além disso, deve analisar a viabilidade de projeto, a fabricação e execução da estrutura.

Exclui-se deste documento a análise da fundação das estruturas. Além disso, não é abordado o dimensionamento dos cliques de ligação entre montantes, realizado por ferramentas computacionais que utilizam elementos finitos. Recomenda-se que o mesmo seja desenvolvido em um novo estudo de caso.

O reforço dimensionado neste trabalho é apenas uma proposta, sendo que não necessariamente a estrutura deverá ser reforçada desta maneira. O reforço vai depender da metodologia adotada por cada engenheiro estrutural.

Para as análises deste trabalho foi utilizado como auxílio o programa estrutural STRAP-V12 (structural analysis programs), ressaltando que o engenheiro calculista deve ter a sensibilidade de analisar os resultados que o programa está disponibilizando. O profissional deve ter em mente que os programas de cálculo são apenas auxiliares, parâmetros de cálculo, vetores de cargas, formas de análises, forma de interpretação dos resultados, tudo isso depende e deve ser feito pelo engenheiro.

6. RECOMENDAÇÕES

A análise da fundação e um possível dimensionamento do reforço da mesma ficam como oportunidade de estudo, sendo este um tema importante na área de engenharia. Com isso, fica como recomendação de trabalhos futuros.

Assim como na fundação, o dimensionamento dos cliques de ligação entre montantes é interessante como tema para estudos e apresentação de resultados através de trabalhos acadêmicos.

7. BIBLIOGRAFIA

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

ABNT NBR 8850:2003. *NBR 8850 - Execução de suportes metálicos treliçados para linhas de transmissão – Procedimento, 2003.*

ABNT NBR 8681:2003. *NBR 8681- Ações e segurança nas estruturas – procedimento, 2003.*

ABNT NBR 7007:2002. *NBR 7007 - Aço carbono e microligados para uso estrutural em geral, 2002;*

ABNT NBR 8855:1991. *NBR8855 - Propriedades mecânicas de elementos de fixação - Parafusos e prisioneiros – Especificação, 1991.*

ABNT NBR 9983:2010. *NBR 9983 - Arruela lisa de uso em parafuso sextavado estrutural de alta resistência - Dimensões e material, 2010.*

ABNT NBR 6118:2007. *NBR6118 - Projetos de estrutura de concreto – procedimento, 2007;*

Sistema de Análise Estrutural. http://www.sae.eng.br/software/strap/info_strap.html

Antonio Carlos Da Fonseca Bragança Pinheiro. *Estruturas metálicas - cálculos, detalhes, exercícios e projetos – segunda edição revista e ampliada.*

Cleomar Engenharia. *Relatório de ensaio de clipe para fixação de reforço em estruturas metálicas verticais.*

Prof. Leandro F. Fadel Miguel e Prof. Moacir H. Andrade Carqueja. *Apostila da disciplina – ECV5255 - Estruturas Metálicas;*

UNIOESTE. *Cálculo de bases de colunas - Apostila do curso de engenharia civil.*

APÊNDICE 1 – RELATÓRIO FOTOGRÁFICO.



Fig. 1 – Vista da estrutura antes do reforço



Fig. 2 – Vista da estrutura antes do reforço



Fig. 3 – Vista da estrutura antes do reforço



Fig. 4 – Vista da estrutura antes do reforço



Fig. 5 – Pré-montagem na fabrica



Fig. 6 – Pré-montagem na fabrica



Fig. 7 – Vista da estrutura pós-reforço



Fig. 8 – Vista da estrutura pós-reforço



Fig. 9 – Vista da estrutura pós-reforço



Fig. 10 – Vista da estrutura pós-reforço



Fig. 11 – Vista da estrutura pós-reforço



Fig. 12 – Vista da estrutura pós-reforço

APÊNDICE 2 – PLANILHAS DE CARREGAMENTO (ESTRUTURA EXISTENTE).

- VENTO NAS ANTENAS

Antenas	Tipo de Antenas	Descrição das Antenas	Quantid.	Altura (m)	Compr. (m)	Largura (m)	Diâmetro (m)	CA	Área (m²) sem CA	Área (m²) com CA	F _v (kgf)	F _v (x1)	F _v (x3)	F _v (x1)	F _v (x3)			
Antenas Instaladas	Antenas de RF	HBX - 6516DS - VTM (OI)	5	32,00	1,31	0,17	-	1,2	1,10	1,32	182,1	91,0	157,7	157,7	91,0			
		KATHREIN (OI)	1	32,00	1,30	0,16	-	1,2	0,20	0,24	33,5	16,7	29,0	29,0	16,7			
		KATHREIN (OI)	2	32,00	1,29	0,26	-	1,2	0,67	0,80	111,3	55,7	96,4	96,4	55,7			
		YAGI (OI)	1	28,00	1,50	0,04	-	-	0,06	0,07	9,7	4,8	8,4	8,4	4,8			
	AEV TOTAL DAS ANTENAS DE RF											2,03	2,44	336,6	168,3	291,5	291,5	168,3
	Antenas de MW	MW (OI)	1	31,50	-	-	-	1,20	1,6	-	1,13	1,81	250,3	125,1	216,8	216,8	125,1	
		AEV TOTAL DAS ANTENAS DE MW											1,13	1,81	250,3	125,1	216,8	216,8
	RRU	RRU (OI)	1	32,0	0,380	0,580	-	-	1,2	0,22	0,26	36,6	18,3	31,7	31,7	18,3		
		AEV TOTAL DOS RRU											0,22	0,26	36,6	18,3	31,7	31,7
	AEV TOTAL DAS ANTENAS EXISTENTES DE RF, MW E RRU											3,38	4,51	623,5	311,7	539,9	539,9	311,7
Antenas	Tipo de Antenas	Descrição das Antenas	Quantid.	Altura (m)	Compr. (m)	Largura (m)	Diâmetro (m)	CA	Área (m²) sem CA	Área (m²) com CA	F _v (kgf)	F _v (x1)	F _v (x3)	F _v (x1)	F _v (x3)			
Antenas à Instalar	Antenas de RF	HBX - 6516DS - VTM (OI)	3	32,00	1,306	0,166	-	1,2	0,65	0,78	107,9	54,0	93,5	93,5	54,0			
		RRU (OI)	1	32,00	0,560	0,447	-	1,2	0,25	0,30	41,5	20,8	36,0	36,0	20,8			
	AEV TOTAL DAS ANTENAS DE RF											0,90	1,08	149,5	74,7	129,5	129,5	74,7
AEV TOTAL DAS ANTENAS À ADICIONAR DE RF E MW											0,90	1,08	149,5	74,7	129,5	129,5	74,7	
Descrição da Reserva Solicitada			Quantid.	Altura (m)	Compr. (m)	Largura (m)	Diâmetro (m)	CA	Área (m²) sem CA	Área (m²) com CA	F _v (kgf)	F _v (x1)	F _v (x3)	F _v (x1)	F _v (x3)			
Reserva de carga			1	32,0	-	-	-	-	1,68	1,68	232,0	116,0	200,9	200,9	116,0			
AEV TOTAL DE RESERVA											0,00	1,68	232,0	116,0	200,9	200,9	116,0	

- VENTO NOS CABOS

Cálculo da Força de Arrasto nos cabos de 1/2" (1,27cm)																	
Número de cabos alinhados	Número TOTAL de cabos	Alt. (m)	V0 (m/s)	S1	S2	8	S3	Vk (M/s)	q (kgf/m²)	D (m)	Re	ID	Ca	Fa - Vento (kgf/m)	Peso dos Cabos (kgf/m)	Área de Exposição dos cabos c/ CA (m²)	
2	6	5,1	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	0,0127	3,47E+04	400,26	1,2	2,9	0,2	0,03048	
2	6	10,2	32,0	1,29	III-B	0,920	1,10	41,8	109,1	0,0127	3,71E+04	400,26	1,2	3,3	0,2	0,03048	
2	6	15,3	32,0	1,29	III-B	0,960	1,10	43,6	118,8	0,0127	3,88E+04	400,26	1,2	3,6	0,2	0,03048	
2	6	20,3	32,0	1,29	III-B	0,990	1,10	45,0	126,3	0,0127	4,00E+04	400,26	1,2	3,8	0,2	0,03048	
2	6	25,4	32,0	1,29	III-B	1,010	1,10	45,9	131,5	0,0127	4,08E+04	400,26	1,2	4,0	0,2	0,03048	
2	6	30,5	32,0	1,29	III-B	1,033	1,10	46,9	137,5	0,0127	4,17E+04	400,26	1,2	4,2	0,2	0,03048	
														Médias =	3,65	0,21	0,03048
Cálculo da Força de Arrasto nos cabos de 7/8" (2,22cm)																	
Número de cabos alinhados	Número TOTAL de cabos	Alt. (m)	V0 (m/s)	S1	S2	8	S3	Vk (M/s)	q (kgf/m²)	D (m)	Re	ID	Ca	Fa - Vento (kgf/m)	Peso dos Cabos (kgf/m)	Área de Exposição dos cabos c/ CA (m²)	
6	12	5,1	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	0,0222	6,08E+04	228,72	1,2	15,3	0,2	0,16002	
6	12	10,2	32,0	1,29	III-B	0,920	1,10	41,8	109,1	0,0222	6,50E+04	228,72	1,2	17,5	0,2	0,16002	
6	12	15,3	32,0	1,29	III-B	0,960	1,10	43,6	118,8	0,0222	6,78E+04	228,72	1,2	19,0	0,2	0,16002	
6	12	20,3	32,0	1,29	III-B	0,990	1,10	45,0	126,3	0,0222	6,99E+04	228,72	1,2	20,2	0,2	0,16002	
6	12	25,4	32,0	1,29	III-B	1,010	1,10	45,9	131,5	0,0222	7,13E+04	228,72	1,2	21,0	0,2	0,16002	
6	12	30,5	32,0	1,29	III-B	1,033	1,10	46,9	137,5	0,0222	7,30E+04	228,72	1,2	22,0	0,2	0,16002	
														Médias =	19,16	0,24	0,16002
Cálculo da Força de Arrasto nos cabos de 5/8"																	
Número de cabos alinhados	Número TOTAL de cabos	Alt. (m)	V0 (m/s)	S1	S2	8	S3	Vk (M/s)	q (kgf/m²)	D (m)	Re	ID	Ca	Fa - Vento (kgf/m)	Peso dos Cabos (kgf/m)	Área de Exposição dos cabos c/ CA (m²)	
1	1	5,1	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	0,0159	4,35E+04	319,71	1,2	1,8	0,4	0,01908	
1	1	10,2	32,0	1,29	III-B	0,920	1,10	41,8	109,1	0,0159	4,65E+04	319,71	1,2	2,1	0,4	0,01908	
1	1	15,3	32,0	1,29	III-B	0,960	1,10	43,6	118,8	0,0159	4,85E+04	319,71	1,2	2,3	0,4	0,01908	
1	1	20,3	32,0	1,29	III-B	0,990	1,10	45,0	126,3	0,0159	5,00E+04	319,71	1,2	2,4	0,4	0,01908	
1	1	25,4	32,0	1,29	III-B	1,010	1,10	45,9	131,5	0,0159	5,10E+04	319,71	1,2	2,5	0,4	0,01908	
1	1	30,5	32,0	1,29	III-B	1,033	1,10	46,9	137,5	0,0159	5,22E+04	319,71	1,2	2,6	0,4	0,01908	
														Médias =	2,28	0,43	0,01908

- VENTO NA ESCADA

ESCADA													
Alt. (m)	c (m)	Comp.	A _{efetiva}	V ₀ (m/s)	S ₁	S ₂	8	S ₃	V _k (m/s)	q (kgf/m²)	Ca	F _a - Vento (kgf/m)	
5,0	0,400	5,0	2,0	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,21	46,15	
10,0	0,400	5,0	2,0	32,0	1,29	III-B	0,920	1,10	41,8	109,1	1,21	52,82	
15,0	0,400	5,0	2,0	32,0	1,29	III-B	0,960	1,10	43,6	118,8	1,21	57,51	
20,0	0,400	5,0	2,0	32,0	1,29	III-B	0,990	1,10	45,0	126,3	1,21	61,16	
25,0	0,400	5,0	2,0	32,0	1,29	III-B	1,010	1,10	45,9	131,5	1,21	63,66	
30,0	0,400	5,0	2,0	32,0	1,29	III-B	1,030	1,10	46,8	136,7	1,21	66,20	
32,0	0,400	2,0	2,0	32,0	1,29	III-B	1,036	1,10	47,0	138,3	1,21	66,98	

- VENTO NAS PEÇAS

MONTANTES															Cálculo da Força de Arrasto														
Alt. (m)	Diam.	Comp.	Re	Aestiva	V ₀ (m/s)	S ₁	S ₂	8	S ₃	V _k (m/s)	q (kgf/m ²)	Ca	F _w -Vento (kgf/m)	VENTO 0° (kgf/m)			VENTO 30° (kgf/m)			VENTO 60° (kgf/m)									
														Face I	Face II	Face III	Face I		Face III		Face I		Face II		Face III				
														-X3	-X3	-X3	-X3	X1	-X3	X1	-X3	-X1	X1	-X3	X1	-X3			
2,5	0,0860	5,0	2,35E+05	8,60E-01	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	0,92	7,54	4,30	1,66	1,66	3,77	2,19	2,79	1,58	1,06	1,89	1,89	1,06	2,79	1,58			
8,1	0,0860	6,0	2,45E+05	1,03E+00	32,0	1,29	III-B	0,896	1,10	40,7	103,5	0,87	7,74	4,41	1,70	1,70	3,87	2,24	2,86	1,63	1,06	1,94	1,94	1,06	2,86	1,63			
14,0	0,0760	6,0	2,30E+05	9,12E-01	32,0	1,29	III-B	0,952	1,10	43,2	116,8	0,95	8,43	4,81	1,86	1,86	4,22	2,45	3,12	1,77	1,18	2,11	2,11	1,18	3,12	1,77			
19,8	0,0640	5,5	2,01E+05	7,05E-01	32,0	1,29	III-B	0,990	1,10	45,0	126,3	1,15	9,30	5,30	2,05	2,05	4,65	2,70	3,44	1,95	1,30	2,32	2,32	1,30	3,44	1,95			
25,5	0,0480	5,5	1,55E+05	5,29E-01	32,0	1,29	III-B	1,014	1,10	46,0	132,5	1,22	7,76	4,42	1,71	1,71	3,88	2,25	2,87	1,63	1,09	1,94	1,94	1,09	2,87	1,63			
29,5	0,0420	5,5	1,38E+05	4,63E-01	32,0	1,29	III-B	1,030	1,10	46,8	136,7	1,35	7,75	4,42	1,71	1,71	3,88	2,25	2,87	1,63	1,09	1,94	1,94	1,09	2,87	1,63			
TOTAL														4,50m ²															
														Médias =			4,61	1,78	1,78	4,04	2,35	2,99	1,70	1,13	2,02	2,02	1,13	2,99	1,70
Comp. X Médias														309,0	119,3	119,3	271,1	157,2	200,6	113,8	75,9	135,5	135,5	75,9	200,6	113,8			

DIAGONAIS BARRAS															Cálculo da Força de Arrasto											
Alt. (m)	Diam.	Comp.	Re	Aestiva	V ₀ (m/s)	S ₁	S ₂	8	S ₃	V _k (m/s)	q (kgf/m ²)	Ca	F _w -Vento (kgf/m)	VENTO 0° (kgf/m)			VENTO 30° (kgf/m)			VENTO 60° (kgf/m)						
														Face I	Face II	Face III	Face I		Face III		Face I		Face II		Face III	
														-X3	-X3	-X3	-X3	X1	-X3	X1	-X3	-X1	X1	-X3	X1	-X3
0,5	0,0190	1,3	5,19E+04	4,92E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
1,0	0,0190	1,3	5,19E+04	4,89E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
1,5	0,0190	1,3	5,19E+04	4,85E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
2,0	0,0190	1,3	5,19E+04	4,82E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
2,5	0,0190	1,3	5,19E+04	4,78E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
3,0	0,0190	1,2	5,19E+04	4,75E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
3,5	0,0190	1,2	5,19E+04	4,72E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
4,0	0,0190	1,2	5,19E+04	4,69E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
4,5	0,0190	1,2	5,19E+04	4,65E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
5,0	0,0190	1,2	5,19E+04	4,61E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
5,5	0,0159	1,2	4,41E+04	3,83E-02	32,0	1,29	III-B	0,872	1,10	39,6	98,0	1,50	2,34	1,33	0,51	0,51	1,17	0,68	0,86	0,49	0,33	0,58	0,58	0,33	0,86	0,49
6,0	0,0159	1,2	4,41E+04	3,80E-02	32,0	1,29	III-B	0,872	1,10	39,6	98,0	1,50	2,34	1,33	0,51	0,51	1,17	0,68	0,86	0,49	0,33	0,58	0,58	0,33	0,86	0,49
6,5	0,0159	1,2	4,41E+04	3,78E-02	32,0	1,29	III-B	0,884	1,10	40,1	100,7	1,50	2,40	1,37	0,53	0,53	1,20	0,70	0,89	0,50	0,34	0,60	0,60	0,34	0,89	0,50
7,0	0,0159	1,2	4,41E+04	3,75E-02	32,0	1,29	III-B	0,884	1,10	40,1	100,7	1,50	2,40	1,37	0,53	0,53	1,20	0,70	0,89	0,50	0,34	0,60	0,60	0,34	0,89	0,50
7,5	0,0159	1,2	4,53E+04	3,72E-02	32,0	1,29	III-B	0,896	1,10	40,7	103,5	1,50	2,47	1,41	0,54	0,54	1,23	0,72	0,91	0,52	0,35	0,62	0,62	0,35	0,91	0,52
8,0	0,0159	1,2	4,53E+04	3,69E-02	32,0	1,29	III-B	0,896	1,10	40,7	103,5	1,50	2,47	1,41	0,54	0,54	1,23	0,72	0,91	0,52	0,35	0,62	0,62	0,35	0,91	0,52
8,5	0,0159	1,2	4,59E+04	3,66E-02	32,0	1,29	III-B	0,908	1,10	41,2	106,2	1,50	2,53	1,44	0,56	0,56	1,27	0,73	0,94	0,53	0,35	0,63	0,63	0,35	0,94	0,53
9,0	0,0159	1,1	4,59E+04	3,63E-02	32,0	1,29	III-B	0,908	1,10	41,2	106,2	1,50	2,53	1,44	0,56	0,56	1,27	0,73	0,94	0,53	0,35	0,63	0,63	0,35	0,94	0,53
9,5	0,0159	1,1	4,65E+04	3,60E-02	32,0	1,29	III-B	0,920	1,10	41,8	109,1	1,50	2,60	1,48	0,57	0,57	1,30	0,75	0,96	0,55	0,36	0,65	0,65	0,36	0,96	0,55
10,0	0,0159	1,1	4,65E+04	3,58E-02	32,0	1,29	III-B	0,920	1,10	41,8	109,1	1,50	2,60	1,48	0,57	0,57	1,30	0,75	0,96	0,55	0,36	0,65	0,65	0,36	0,96	0,55
10,5	0,0159	1,1	4,69E+04	3,55E-02	32,0	1,29	III-B	0,928	1,10	42,1	111,0	1,50	2,65	1,51	0,58	0,58	1,32	0,77	0,98	0,56	0,37	0,66	0,66	0,37	0,98	0,56
11,0	0,0159	1,1	4,69E+04	3,52E-02	32,0	1,29	III-B	0,928	1,10	42,1	111,0	1,50	2,65	1,51	0,58	0,58	1,32	0,77	0,98	0,56	0,37	0,66	0,66	0,37	0,98	0,56
11,5	0,0159	1,1	4,73E+04	3,49E-02	32,0	1,29	III-B	0,936	1,10	42,5	112,9	1,50	2,69	1,53	0,59	0,59	1,35	0,78	1,00	0,57	0,38	0,67	0,67	0,38	1,00	0,57
12,0	0,0159	1,1	4,73E+04	3,47E-02	32,0	1,29	III-B	0,936	1,10	42,5	112,9	1,50	2,69	1,53	0,59	0,59	1,35	0,78	1,00	0,57	0,38	0,67	0,67	0,38	1,00	0,57
12,5	0,0159	1,1	4,77E+04	3,44E-02	32,0	1,29	III-B	0,944	1,10	42,9	114,8	1,50	2,74	1,56	0,60	0,60	1,37	0,79	1,01	0,58	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,58
13,0	0,0159	1,1	4,77E+04	3,41E-02	32,0	1,29	III-B	0,944	1,10	42,9	114,8	1,50	2,74	1,56	0,60	0,60	1,37	0,79	1,01	0,58	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,58
13,5	0,0159	1,1	4,81E+04	3,38E-02	32,0	1,29	III-B	0,952	1,10	43,2	116,8	1,50	2,79	1,59	0,61	0,61	1,39	0,81	1,03	0,58	0,39	0,70	0,70	0,39	1,03	0,58
14,0	0,0159	1,1	4,81E+04	3,35E-02	32,0	1,29	III-B	0,952	1,10	43,2	116,8	1,50	2,79	1,59	0,61	0,61	1,39	0,81	1,03	0,58	0,39	0,70	0,70	0,39	1,03	0,58
14,5	0,0159	1,0	4,85E+04	3,33E-02	32,0	1,29	III-B	0,960	1,10	43,6	118,8	1,50	2,83	1,61	0,62	0,62	1,42	0,82	1,05	0,59	0,40	0,71	0,71	0,40	1,05	0,59
15,0	0,0159	1,0	4,85E+04	3,30E-02	32,0	1,29	III-B	0,960	1,10	43,6	118,8	1,50	2,83	1,61	0,62	0,62	1,42	0,82	1,05	0,59	0,40	0,71	0,71	0,40	1,05	0,59
15,5	0,0159	1,0	4,88E+04	3,27E-02	32,0	1,29	III-B	0,966	1,10	43,9	120,3	1,50	2,87	1,63	0,63	0,63	1,43	0,83	1,06	0,60	0,40	0,72	0,72	0,40	1,06	0,60
16,0	0,0159	1,0	4,88E+04	3,25E-02	32,0	1,29	III-B	0,966	1,10	43,9	120,3	1,50	2,87	1,63	0,63	0,63	1,4									

Cálculo da Força de Arrasto																										
HORIZONTALIS BARRAS										VENTO 0° (kgf/m)			VENTO 30° (kgf/m)			VENTO 60° (kgf/m)										
Alt. (m)	Diam.	Comp.	Re	A _{estiva}	V ₀ (m/s)	S ₁	S ₂	8	S ₃	V _e (m/s)	q (kgf/m ²)	Ca	F _v -Vento (kgf/m)	Face I			Face II			Face III						
														-X3	-X3	-X3	-X3	X1	-X3	X1	-X3	X1	-X3	X1	-X3	X1
0,5	0,0190	1,2	5,19E+04	4,66E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
1,0	0,0190	1,2	5,19E+04	4,62E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
1,5	0,0190	1,2	5,19E+04	4,49E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
2,0	0,0190	1,2	5,19E+04	4,45E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
2,5	0,0190	1,2	5,19E+04	4,41E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
3,0	0,0190	1,2	5,19E+04	4,37E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
3,5	0,0190	1,1	5,19E+04	4,33E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
4,0	0,0190	1,1	5,19E+04	4,30E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
4,5	0,0190	1,1	5,19E+04	4,26E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
5,0	0,0190	1,1	5,19E+04	4,22E-02	32,0	1,29	III-B	0,860	1,10	39,1	95,3	1,50	2,72	1,55	0,60	0,60	1,36	0,79	1,01	0,57	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,57
5,5	0,0190	1,1	4,41E+04	3,66E-02	32,0	1,29	III-B	0,872	1,10	39,6	98,0	1,50	2,34	1,33	0,51	0,51	1,17	0,68	0,86	0,49	0,33	0,58	0,58	0,33	0,86	0,49
6,0	0,0190	1,1	4,41E+04	3,47E-02	32,0	1,29	III-B	0,872	1,10	39,6	98,0	1,50	2,34	1,33	0,51	0,51	1,17	0,68	0,86	0,49	0,33	0,58	0,58	0,33	0,86	0,49
6,5	0,0190	1,1	4,47E+04	3,44E-02	32,0	1,29	III-B	0,884	1,10	40,1	100,7	1,50	2,40	1,37	0,53	0,53	1,20	0,70	0,89	0,50	0,34	0,60	0,60	0,34	0,89	0,50
7,0	0,0190	1,1	4,47E+04	3,41E-02	32,0	1,29	III-B	0,884	1,10	40,1	100,7	1,50	2,40	1,37	0,53	0,53	1,20	0,70	0,89	0,50	0,34	0,60	0,60	0,34	0,89	0,50
7,5	0,0190	1,1	4,53E+04	3,38E-02	32,0	1,29	III-B	0,896	1,10	40,7	103,5	1,50	2,47	1,41	0,54	0,54	1,23	0,72	0,91	0,52	0,35	0,62	0,62	0,35	0,91	0,52
8,0	0,0190	1,1	4,53E+04	3,35E-02	32,0	1,29	III-B	0,896	1,10	40,7	103,5	1,50	2,47	1,41	0,54	0,54	1,23	0,72	0,91	0,52	0,35	0,62	0,62	0,35	0,91	0,52
8,5	0,0190	1,0	4,59E+04	3,31E-02	32,0	1,29	III-B	0,908	1,10	41,2	106,2	1,50	2,53	1,44	0,56	0,56	1,27	0,73	0,94	0,53	0,35	0,63	0,63	0,35	0,94	0,53
9,0	0,0190	1,0	4,59E+04	3,28E-02	32,0	1,29	III-B	0,908	1,10	41,2	106,2	1,50	2,53	1,44	0,56	0,56	1,27	0,73	0,94	0,53	0,35	0,63	0,63	0,35	0,94	0,53
9,5	0,0190	1,0	4,65E+04	3,25E-02	32,0	1,29	III-B	0,920	1,10	41,8	109,1	1,50	2,60	1,48	0,57	0,57	1,30	0,75	0,96	0,55	0,36	0,65	0,65	0,36	0,96	0,55
10,0	0,0190	1,0	4,65E+04	3,22E-02	32,0	1,29	III-B	0,920	1,10	41,8	109,1	1,50	2,60	1,48	0,57	0,57	1,30	0,75	0,96	0,55	0,36	0,65	0,65	0,36	0,96	0,55
10,5	0,0190	1,0	4,69E+04	3,19E-02	32,0	1,29	III-B	0,928	1,10	42,1	111,0	1,50	2,65	1,51	0,58	0,58	1,32	0,77	0,98	0,56	0,37	0,66	0,66	0,37	0,98	0,56
11,0	0,0190	1,0	4,69E+04	3,16E-02	32,0	1,29	III-B	0,928	1,10	42,1	111,0	1,50	2,65	1,51	0,58	0,58	1,32	0,77	0,98	0,56	0,37	0,66	0,66	0,37	0,98	0,56
11,5	0,0190	1,0	4,73E+04	3,13E-02	32,0	1,29	III-B	0,936	1,10	42,5	112,9	1,50	2,69	1,53	0,59	0,59	1,35	0,78	1,00	0,57	0,38	0,67	0,67	0,38	1,00	0,57
12,0	0,0190	1,0	4,73E+04	3,10E-02	32,0	1,29	III-B	0,936	1,10	42,5	112,9	1,50	2,69	1,53	0,59	0,59	1,35	0,78	1,00	0,57	0,38	0,67	0,67	0,38	1,00	0,57
12,5	0,0190	1,0	4,77E+04	3,07E-02	32,0	1,29	III-B	0,944	1,10	42,9	114,8	1,50	2,74	1,56	0,60	0,60	1,37	0,79	1,01	0,58	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,58
13,0	0,0190	1,0	4,77E+04	3,03E-02	32,0	1,29	III-B	0,944	1,10	42,9	114,8	1,50	2,74	1,56	0,60	0,60	1,37	0,79	1,01	0,58	0,38	0,68	0,68	0,38	1,01	0,58
13,5	0,0190	0,9	4,81E+04	3,00E-02	32,0	1,29	III-B	0,952	1,10	43,2	116,8	1,50	2,79	1,59	0,61	0,61	1,39	0,81	1,03	0,58	0,39	0,70	0,70	0,39	1,03	0,58
14,0	0,0190	0,9	4,81E+04	2,97E-02	32,0	1,29	III-B	0,952	1,10	43,2	116,8	1,50	2,79	1,59	0,61	0,61	1,39	0,81	1,03	0,58	0,39	0,70	0,70	0,39	1,03	0,58
14,5	0,0190	0,9	4,85E+04	2,94E-02	32,0	1,29	III-B	0,960	1,10	43,6	118,8	1,50	2,83	1,61	0,62	0,62	1,42	0,82	1,05	0,59	0,40	0,71	0,71	0,40	1,05	0,59
15,0	0,0190	0,9	4,85E+04	2,91E-02	32,0	1,29	III-B	0,960	1,10	43,6	118,8	1,50	2,83	1,61	0,62	0,62	1,42	0,82	1,05	0,59	0,40	0,71	0,71	0,40	1,05	0,59
15,5	0,0190	0,9	4,89E+04	2,88E-02	32,0	1,29	III-B	0,968	1,10	43,9	120,3	1,50	2,87	1,63	0,63	0,63	1,43	0,83	1,06	0,60	0,40	0,72	0,72	0,40	1,06	0,60
16,0	0,0190	0,9	4,89E+04	2,85E-02	32,0	1,29	III-B	0,968	1,10	43,9	120,3	1,50	2,87	1,63	0,63	0,63	1,43	0,83	1,06	0,60	0,40	0,72	0,72	0,40	1,06	0,60
16,5	0,0190	0,9	4,92E+04	2,82E-02	32,0	1,29	III-B	0,972	1,10	44,1	121,8	1,50	2,92	1,65	0,64	0,64	1,45	0,84	1,07	0,61	0,41	0,73	0,73	0,41	1,07	0,61
17,0	0,0190	0,9	4,92E+04	2,79E-02	32,0	1,29	III-B	0,972	1,10	44,1	121,8	1,50	2,92	1,65	0,64	0,64	1,45	0,84	1,07	0,61	0,41	0,73	0,73	0,41	1,07	0,61
17,5	0,0190	0,9	4,95E+04	2,76E-02	32,0	1,29	III-B	0,978	1,10	44,4	123,3	1,50	2,95	1,66	0,64	0,64	1,46	0,84	1,07	0,61	0,41	0,73	0,73	0,41	1,07	0,61
18,0	0,0190	0,9	4,95E+04	2,73E-02	32,0	1,29	III-B	0,978	1,10	44,4	123,3	1,50	2,95	1,66	0,64	0,64	1,46	0,84	1,07	0,61	0,41	0,73	0,73	0,41	1,07	0,61
18,5	0,0190	0,8	4,97E+04	2,70E-02	32,0	1,29	III-B	0,984	1,10	44,7	124,8	1,50	2,98	1,67	0,65	0,65	1,47	0,85	1,08	0,62	0,42	0,74	0,74	0,42	1,08	0,62
19,0	0,0190	0,8	4,97E+04	2,67E-02	32,0	1,29	III-B	0,984	1,10	44,7	124,8	1,50	2,98	1,67	0,65	0,65	1,47	0,85	1,08	0,62	0,42	0,74	0,74	0,42	1,08	0,62
19,5	0,0190	0,8	4,00E+04	2,64E-02	32,0	1,29	III-B	0,990	1,10	45,0	126,3	1,50	2,41	1,37	0,53	0,53	1,20	0,70	0,89	0,51	0,34	0,60	0,60	0,34	0,89	0,51
20,0	0,0190	0,8	4,00E+04	2,61E-02	32,0	1,29	III-B	0,990	1,10	45,0	126,3	1,50	2,41	1,37	0,53	0,53	1,20	0,70	0,89	0,51	0,34	0,60	0,60	0,34	0,89	0,51
20,5	0,0190	0,8	4,01E+04	2,58E-02	32,0	1,29	III-B	0,994	1,10	45,1	127,3	1,50	2,43	1,38	0,53	0,53	1,21	0,70	0,90	0,51	0,34	0,61	0,61	0,34	0,90	0,51
21,0	0,0190	0,8	4,01E+04	2,55E-02	32,0	1,29	III-B	0,994	1,10	45,1	127,3	1,50	2,43	1,38	0,53	0,53	1,21	0,70	0,90	0,51	0,34	0,61	0,61	0,34	0,90	0,51
21,5	0,0190	0,8	4,03E+04	2,52E-02	32,0	1,29	III-B	0,998	1,10	45,3	128,4	1,50	2,45	1,39	0,54	0,54	1,22	0,71	0,90	0,51	0,34	0,61	0,61	0,34	0,90	0,51
22,0	0,0190	0,8	4,03E+04	2,49E-02	32,0	1,29	III-B	0,998	1,10	45,3	128,4	1,50	2,45	1,39	0,54	0,54	1,22	0,71	0,90	0,51	0,34	0,61	0,61	0,34	0,90	0,51
22,5	0,0190	0,7	4,04E+04	2,46E-02	32,0	1,29	III-B	1,002	1,10	45,5	129,4	1,50	2,46	1,40	0,54	0,54	1,23	0,71	0,91	0,52	0,35	0,62	0,62	0,35	0,91	0,52
23,0	0,0190	0,7	4,04E+04	2,43E-02	32,0	1,29	III-B	1,002	1,10	45,5	129,4	1,50	2,46	1,40	0,54	0,54	1,23	0,71	0,91	0,52	0,35	0,62	0,62	0,35	0,91	0,52
23,5	0,0190	0,7	4,06E+04	2,40E-02	32,0	1,29	III-B	1,																		

APÊNDICE 3 – PLANILHAS DE CARREGAMENTO (REFORÇO)

- VENTO NAS PEÇAS

Cálculo da Força de Arrasto																																									
MONTANTES													VENTO 0° (kgf/m)			VENTO 30° (kgf/m)			VENTO 60° (kgf/m)																						
Alt. (m)	c (m)	Comp.	A efetiva	V ₀ (m/s)	S ₁	S ₂	8	S ₃	V _w (m/s)	q (kgf/m²)	Ca	F _s -Vento (kgf/m)	Face I			Face III		Face I		Face II		Face III																			
													-X3	-X3	-X3	-X3	X1	-X3	X1	-X3	+X1	X1	-X3	X1																	
1.0	0.2	2.0	6.10E-01	32.0	1.29	III-B	0.860	1.10	39.1	95.3	2.39	34.70	19.78	7.63	7.63	17.35	10.06	12.84	7.29	4.86	8.68	8.68	4.86	12.84	7.29																
5.0	0.2	6.0	1.83E+00	32.0	1.29	III-B	0.860	1.10	39.1	95.3	2.39	34.70	19.78	7.63	7.63	17.35	10.06	12.84	7.29	4.86	8.68	8.68	4.86	12.84	7.29																
11.0	0.1	6.0	1.52E+00	32.0	1.29	III-B	0.928	1.10	42.1	111.0	2.39	33.67	19.17	7.41	7.41	16.84	9.76	12.46	4.71	8.42	8.42	4.71	12.46	7.07																	
17.0	0.1	6.0	1.22E+00	32.0	1.29	III-B	0.972	1.10	44.1	121.8	2.39	29.55	16.84	6.50	6.50	14.78	8.57	10.93	6.21	4.14	7.39	7.39	4.14	10.93	6.21																
23.0	0.1	6.0	1.22E+00	32.0	1.29	III-B	1.002	1.10	45.5	129.4	2.39	31.40	17.90	6.91	6.91	15.70	9.11	11.62	6.59	4.40	7.85	7.85	4.40	11.62	6.59																
28.3	0.1	4.5	6.86E-01	32.0	1.29	III-B	1.022	1.10	46.4	134.6	2.39	24.50	13.97	5.39	5.39	12.25	7.11	9.07	5.15	3.43	6.13	6.13	3.43	9.07	5.15																
TOTAL													7.09m²																												
													Médias =			17.91		6.91		6.91		15.71		9.11		11.63		6.60		4.40		7.86		7.86		4.40		11.63		6.60	
													Comp. X Médias			1092,5		421,7		421,7		958,4		555,9		709,2		402,5		268,3		479,2		479,2		268,3		709,2		402,5	

Cálculo da Força de Arrasto																																									
DIAGONAIS													VENTO 0° (kgf/m)			VENTO 30° (kgf/m)			VENTO 60° (kgf/m)																						
Alt. (m)	c (m)	Comp.	A efetiva	V ₀ (m/s)	S ₁	S ₂	8	S ₃	V _w (m/s)	q (kgf/m²)	Ca	F _s -Vento (kgf/m)	Face I			Face III		Face I		Face II		Face III																			
													-X3	-X3	-X3	-X3	X1	-X3	X1	-X3	+X1	X1	-X3	X1																	
0.9	0.1	2.4	2.45E-01	32.0	1.29	III-B	0.860	1.10	39.1	95.3	2.39	11.57	6.59	2.54	2.54	5.78	3.35	4.28	2.43	1.62	2.89	2.89	1.62	4.28	2.43																
2.1	0.1	2.4	2.43E-01	32.0	1.29	III-B	0.860	1.10	39.1	95.3	2.39	11.57	6.59	2.54	2.54	5.78	3.35	4.28	2.43	1.62	2.89	2.89	1.62	4.28	2.43																
3.3	0.1	2.4	2.41E-01	32.0	1.29	III-B	0.860	1.10	39.1	95.3	2.39	11.57	6.59	2.54	2.54	5.78	3.35	4.28	2.43	1.62	2.89	2.89	1.62	4.28	2.43																
4.5	0.1	2.2	2.19E-01	32.0	1.29	III-B	0.860	1.10	39.1	95.3	2.39	11.57	6.59	2.54	2.54	5.78	3.35	4.28	2.43	1.62	2.89	2.89	1.62	4.28	2.43																
5.7	0.1	2.3	2.36E-01	32.0	1.29	III-B	0.872	1.10	39.6	98.0	2.39	11.89	6.78	2.62	2.62	5.95	3.45	4.40	2.50	1.66	2.97	2.97	1.66	4.40	2.50																
6.9	0.1	2.3	2.34E-01	32.0	1.29	III-B	0.884	1.10	40.1	100.7	2.39	12.22	6.97	2.69	2.69	6.11	3.54	4.52	2.57	1.71	3.06	3.06	1.71	4.52	2.57																
8.1	0.1	2.3	2.32E-01	32.0	1.29	III-B	0.896	1.10	40.7	103.5	2.39	12.56	7.16	2.76	2.76	6.28	3.64	4.65	2.64	1.76	3.14	3.14	1.76	4.65	2.64																
9.3	0.1	2.3	2.30E-01	32.0	1.29	III-B	0.908	1.10	41.2	106.2	2.39	12.89	7.35	2.84	2.84	6.45	3.74	4.77	2.71	1.81	3.22	3.22	1.81	4.77	2.71																
10.5	0.1	2.2	2.28E-01	32.0	1.29	III-B	0.928	1.10	42.1	111.0	2.39	13.47	7.68	2.96	2.96	6.73	3.91	4.98	2.83	1.89	3.37	3.37	1.89	4.98	2.83																
11.7	0.1	2.2	2.26E-01	32.0	1.29	III-B	0.936	1.10	42.5	112.9	2.39	13.70	7.81	3.01	3.01	6.85	3.97	5.07	2.88	1.92	3.43	3.43	1.92	5.07	2.88																
12.9	0.1	2.2	2.23E-01	32.0	1.29	III-B	0.944	1.10	42.9	114.8	2.39	13.94	7.94	3.07	3.07	6.97	4.04	5.16	2.93	1.95	3.48	3.48	1.95	5.16	2.93																
14.3	0.1	2.2	2.22E-01	32.0	1.29	III-B	0.952	1.10	43.2	116.8	2.39	14.17	8.08	3.12	3.12	7.09	4.11	5.24	2.98	1.98	3.54	3.54	1.98	5.24	2.98																
15.4	0.1	2.2	2.20E-01	32.0	1.29	III-B	0.960	1.10	43.6	118.8	2.39	14.41	8.22	3.17	3.17	7.21	4.18	5.33	3.03	2.02	3.60	3.60	2.02	5.33	3.03																
16.6	0.1	2.1	2.18E-01	32.0	1.29	III-B	0.972	1.10	44.1	121.8	2.39	14.78	8.42	3.25	3.25	7.39	4.29	5.47	3.10	2.07	3.69	3.69	2.07	5.47	3.10																
17.8	0.1	2.1	2.15E-01	32.0	1.29	III-B	0.978	1.10	44.4	123.3	2.39	14.96	8.53	3.29	3.29	7.48	4.34	5.53	3.14	2.09	3.74	3.74	2.09	5.53	3.14																
19.0	0.1	2.1	2.14E-01	32.0	1.29	III-B	0.984	1.10	44.7	124.8	2.39	15.14	8.63	3.33	3.33	7.57	4.39	5.60	3.18	2.12	3.79	3.79	2.12	5.60	3.18																
20.2	0.1	2.1	2.11E-01	32.0	1.29	III-B	0.990	1.10	45.0	126.3	2.39	15.33	8.74	3.37	3.37	7.66	4.45	5.67	3.22	2.15	3.83	3.83	2.15	5.67	3.22																
21.4	0.1	2.1	2.10E-01	32.0	1.29	III-B	0.994	1.10	45.1	127.3	2.39	15.45	8.81	3.40	3.40	7.73	4.48	5.72	3.25	2.16	3.86	3.86	2.16	5.72	3.25																
22.6	0.1	2.1	2.08E-01	32.0	1.29	III-B	1.002	1.10	45.5	129.4	2.39	15.70	8.95	3.45	3.45	7.85	4.55	5.81	3.30	2.20	3.93	3.93	2.20	5.81	3.30																
23.8	0.1	2.0	2.06E-01	32.0	1.29	III-B	1.006	1.10	45.7	130.4	2.39	15.83	9.02	3.48	3.48	7.91	4.59	5.86	3.32	2.22	3.96	3.96	2.22	5.86	3.32																
25.1	0.1	2.0	2.03E-01	32.0	1.29	III-B	1.010	1.10	45.9	131.5	2.39	15.95	9.09	3.51	3.51	7.98	4.63	5.90	3.35	2.23	3.99	3.99	2.23	5.90	3.35																
26.3	0.1	2.0	2.02E-01	32.0	1.29	III-B	1.014	1.10	46.0	132.5	2.39	16.08	9.17	3.54	3.54	8.04	4.66	5.95	3.38	2.25	4.02	4.02	2.25	5.95	3.38																
27.5	0.1	2.0	2.01E-01	32.0	1.29	III-B	1.018	1.10	46.2	133.5	2.39	16.21	9.24	3.57	3.57	8.10	4.70	6.00	3.40	2.27	4.05	4.05	2.27	6.00	3.40																
28.7	0.1	2.0	1.99E-01	32.0	1.29	III-B	1.026	1.10	46.6	135.7	2.39	16.46	9.38	3.62	3.62	8.23	4.77	6.09	3.46	2.30	4.12	4.12	2.30	6.09	3.46																
29.9	0.1	1.9	1.97E-01	32.0	1.29	III-B	1.030	1.10	46.8	136.7	2.39	16.59	9.46	3.65	3.65	8.30	4.81	6.14	3.48	2.32	4.15	4.15	2.32	6.14	3.48																
TOTAL													5.49m²																												
													Médias =			8.07		3.12		3.12		7.08		4.11		5.24		2.97		1.98		3.54		3.54		1.98		5.24		3.54	
													Comp. X médias			871,8		336,5		336,5		764,7		443,6		565,9		321,2		214,1		382,4		382,4		214,1		565,9		321,2	

Cálculo da Força de Arrasto																									
HORIZONTAIS													VENTO 0° (kgf/m)			VENTO 30° (kgf/m)			VENTO 60° (kgf/m)						
Alt. (m)	c (m)	Comp.	A efetiva	V ₀ (m/s)	S ₁	S ₂	8	S ₃	V _w (m/s)	q (kgf/m²)	Ca	F _s -Vento (kgf/m)	Face I			Face III		Face I		Face II		Face III			
													-X3	-X3	-X3	-X3	X1	-X3	X1	-X3	+X1	X1	-X3	X1	
1.4	0.1	2.1	1.05E-01	32.0	1.29	III-B	0.860	1.10	39.1	95.3	2.39	11.57	6.59	2.54	2.54	5.78	3.35	4.28	2.43	1.62	2.89	2.89	1.62	4.28	2.43
2.7	0.1	2.0	1.04E-01	32.0	1.29	III-B	0.860	1.10	39.1	95.3	2.39	11.57	6.59	2.54	2.54	5.78	3.35	4.28	2.43	1.62	2.89	2.89	1.62	4.28	2.43
3.9	0.1	2.0	1.03E-01	32.0	1.29	III-B	0.860	1.10	39.1	95.3	2.39	11.57	6.59	2.54	2.54	5.78	3.35	4.28	2.43	1.62	2.89	2.89	1.62	4.28	2.43
5.1	0.1	2.0	1.02E-01	32.0	1.29	III-B	0.860	1.10	39.1	95.3	2.39	11.57	6.59	2.54	2.54	5.78	3.35	4.28	2.43	1.62	2.89	2.89	1.62	4.28	2.43
6.3	0.1	2.0	1.00E-01	32.0	1.29	III-B	0.872	1.10	39.6	98.0	2.39	11.89	6.78	2.62	2.62	5.95	3.45	4.40	2.50	1.66	2.97	2.97	1.66	4.40	2.50
7.5	0.1	2.0	9.92E-02	32.0	1.29	III-B	0.896	1.10	40.7	103.5	2.39	12.56	7.16	2.76	2.76	6.28	3.64	4.65	2.64	1.76	3.14	3.14	1.76	4.65	2.64
8.8	0.1	1.9	9.79E-02	32.0	1.29	III-B	0.908	1.10	41.2	106.2	2.39	12.89	7.35	2.84	2.84	6.45	3.74	4.77	2.71	1.81	3.22	3.22	1.81	4.77	2.71
9.9	0.1	1.9	9.68E-02	32.0	1.29	III-B	0.920	1.10	41.8	109.1	2.39	13.24	7.55	2.91	2.91	6.62	3.84	4.90	2.78	1.85	3.31	3.31	1.85	4.90	2.78
11.2	0.1	1.9	9.55E-02	32.0	1.29	III-B	0.928	1.10	42.1	111.0	2.39	13.47	7.68	2.96	2.96	6.73	3.91	4.98	2.83	1.89	3.37	3.37	1.89	4.98	2.83
12.4	0.1	1.9	9.43E-02	32.0	1.29	III-B	0.936	1.10	42.5	112.9	2.39	13.70	7.81	3.01	3.01	6.85	3.97	5.07	2.88	1.92					

APÊNDICE 4 – PLANILHAS DE DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES (REFORÇO)

- ESFORÇOS NOS PARAFUSOS:

LIGAÇÃO	VERIFICAÇÃO DOS PARAFUSOS							
	Aço	Ø	Ø _{paraf.}	n	P. corte / parafuso	F _{v,Rd} (KN)	Condição	C.S
L1	A325	5/8"	1,59cm	8	2	774,1KN	Ok	1,08
L2	A325	5/8"	1,59cm	8	2	774,1KN	Ok	1,50
L3	A325	5/8"	1,59cm	6	2	580,6KN	Ok	1,71
L4	A325	5/8"	1,59cm	6	2	580,6KN	Ok	3,09
L5	A325	5/8"	1,59cm	6	2	580,6KN	Ok	9,22

- ESTADO LIMITE DOS PERFIS:

ESTADO LIMITE DOS PERFIS													
Posição	Linhas de furo	Dados gerais								Ct	SEÇÃO LIQUIDA N _{t,Rd}	SEÇÃO BRUTA N _{t,Rd}	Condição
		Ø _{furo}	s ₁	g ₁	g ₂	Seção I	Seção II	parc. 2	An.				
Deslocada	4	1,94cm	5,5cm	2,5cm	18,9cm	47,1cm ²	52,0cm ²	12,288	47,1cm ²	1,00	1568,6KN	1707,4KN	Ok
Deslocada	4	1,94cm	2,5cm	6,0cm	12,5cm	39,7cm ²	34,6cm ²	1,026	34,6cm ²	1,00	1152,6KN	1438,3KN	Ok
Linha	2	1,94cm	5,0cm	12,7cm	-	25,7cm ²	-	-	25,7cm ²	1,00	857,3KN	961,0KN	Ok
Linha	2	1,94cm	5,0cm	10,2cm	-	19,3cm ²	-	-	19,3cm ²	1,00	642,3KN	758,7KN	Ok
Linha	2	1,94cm	5,0cm	10,2cm	-	10,0cm ²	-	-	10,0cm ²	2,00	670,0KN	392,4KN	Ok

- VERIFICAÇÃO DOS FUROS:

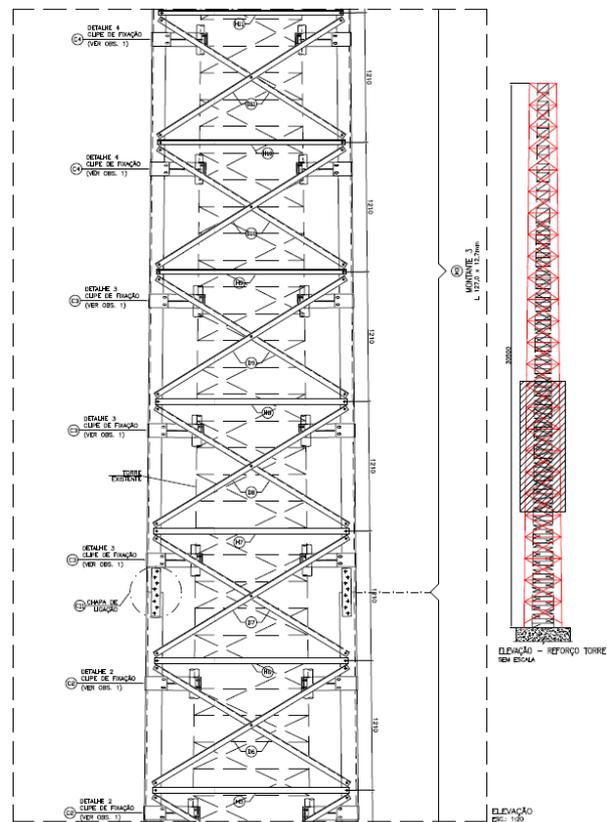
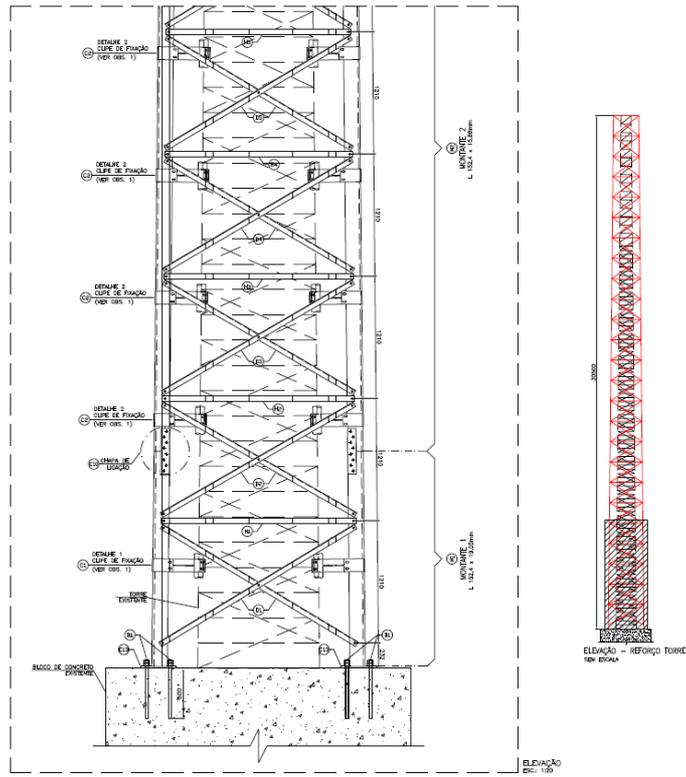
VERIFICAÇÃO DOS FUROS DO MONTANTE								
Esmag.		Rasg. furos consec.		Rasg. entre furo e borda		R _{d,efetivo}	Condição	C.S
α	R _{Rb}	α	R _{Rb}	α	R _{Rb}			
3,0	2450KN	2,6	2163KN	1,89	1543KN	1543KN	Ok	2,16
3,0	2042KN	2,6	1803KN	1,89	1286KN	1286KN	Ok	2,49
3,0	1225KN	2,6	1082KN	1,89	772KN	772KN	Ok	2,27
3,0	1225KN	2,6	1082KN	1,89	772KN	772KN	Ok	4,10
3,0	612KN	2,6	541KN	1,89	386KN	386KN	Ok	6,12

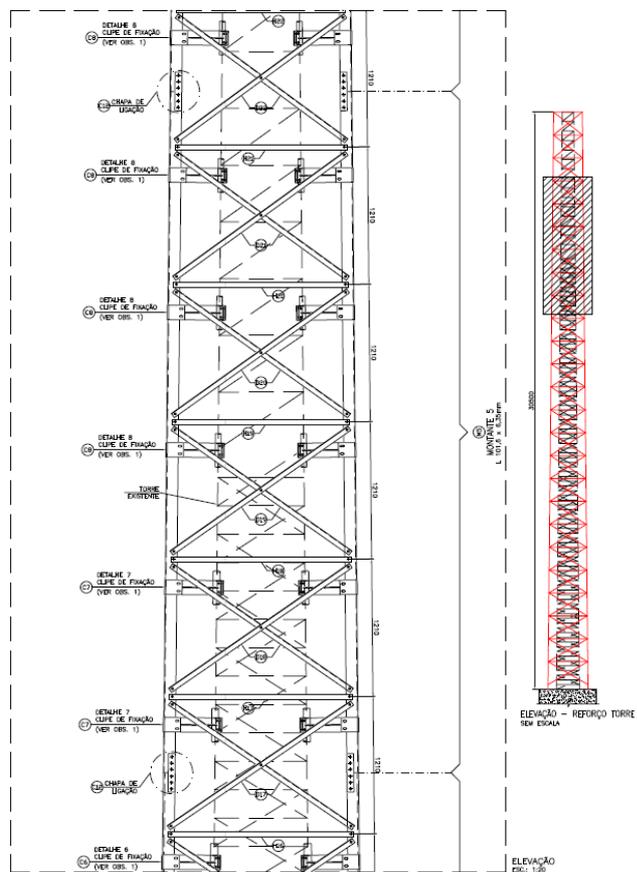
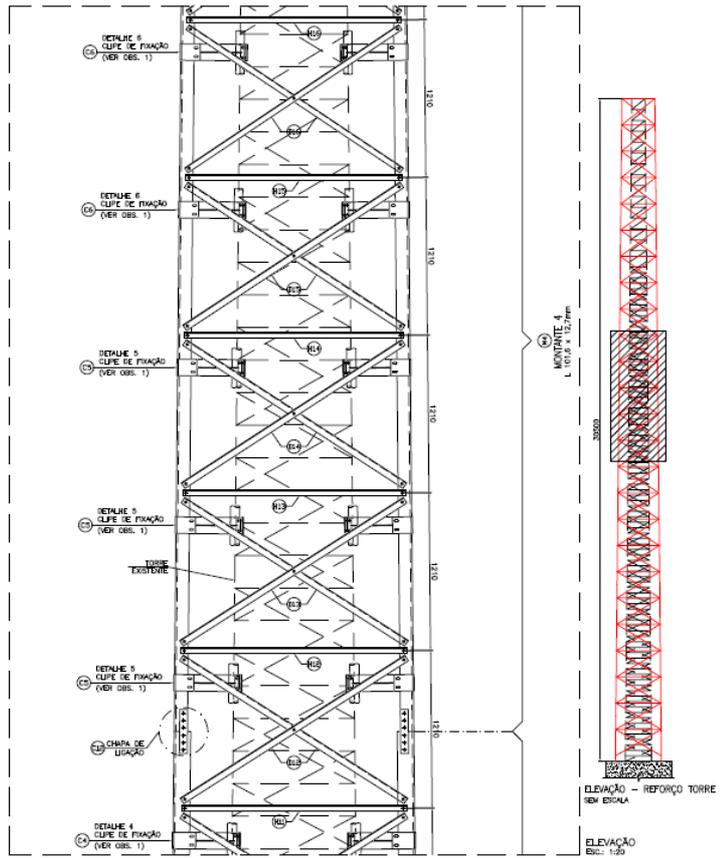
VERIFICAÇÃO DOS FUROS							
Esmag. chapas		Rasg. furos consec.		Rasg. entre furo e borda		Sol. de cálc. Pd / chapa	Condição
α	R _{Rb}	α	R _{Rb}	α	R _{Rb}		
3,0	360,0KN	2,6	318,0KN	1,9	226,8KN	178,8KN	Ok
3,0	360,0KN	2,6	318,0KN	1,9	226,8KN	129,3KN	Ok
3,0	270,0KN	2,6	238,5KN	1,9	170,1KN	85,0KN	Ok
3,0	270,0KN	2,6	238,5KN	1,9	170,1KN	47,0KN	Ok
3,0	270,0KN	2,6	238,5KN	1,9	170,1KN	15,8KN	Ok

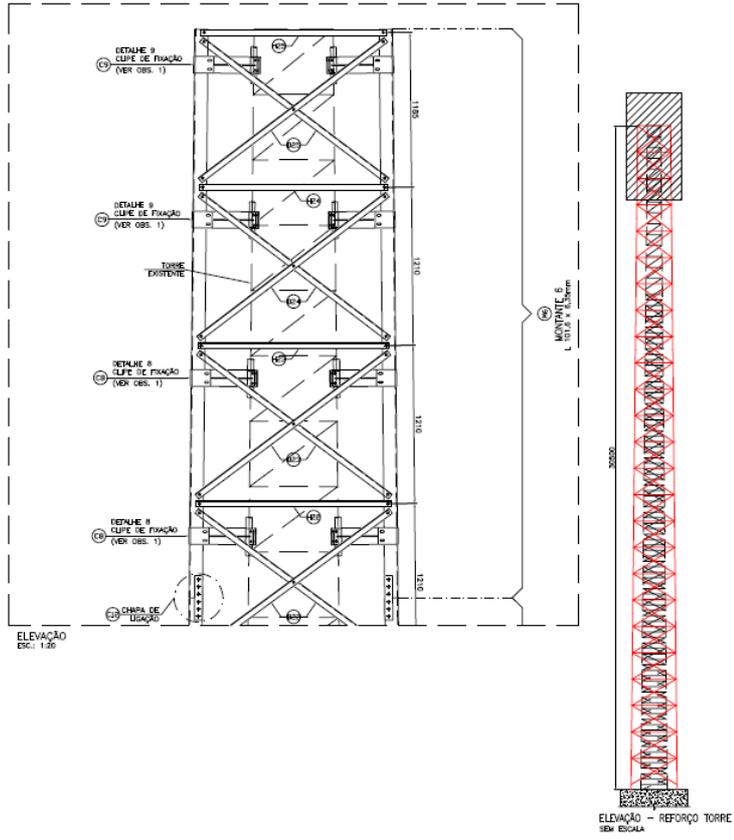
- ESTADOS LIMITES DAS CHAPAS DE LIGAÇÃO:

ESTADOS LIMITES				
A.n	Est. Lim. Esc. Seção liq. N _{t,Rd}	Est. Lim. Esc. Seção Bruta N _{t,Rd}	Situação	C.S
4,82cm ²	571,2KN	486,8KN	Ok	1,15
4,31cm ²	511,2KN	469,6KN	Ok	1,29
2,56cm ²	303,3KN	343,6KN	Ok	1,34
2,56cm ²	303,3KN	343,6KN	Ok	2,66
2,56cm ²	303,3KN	343,6KN	Ok	10,46

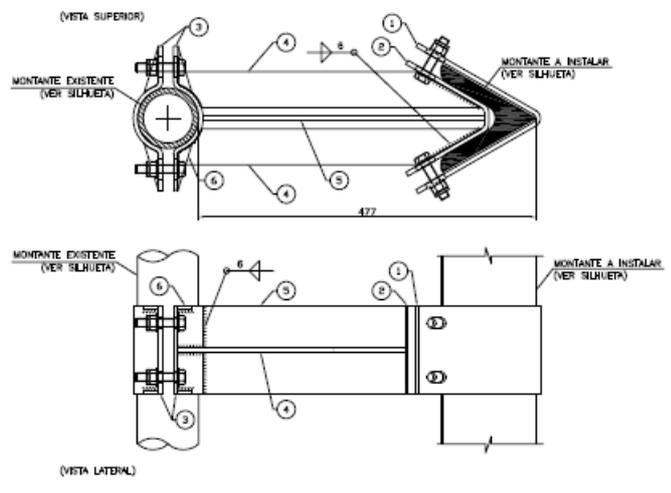
ANEXO – PROJETO EXECUTIVO



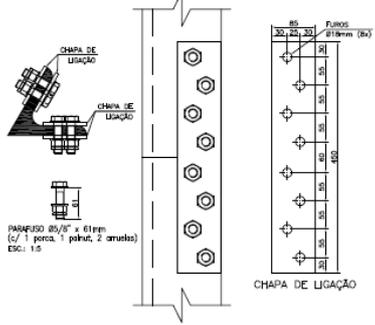




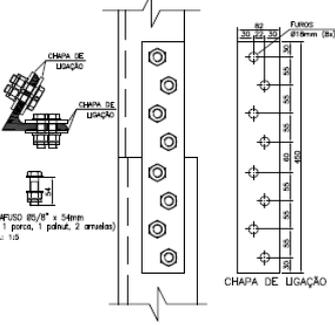
c) CLYPE 1 - FIXAÇÃO EXTERNA CORPO DO MONTANTE/ REFORÇO SEM ESCALA



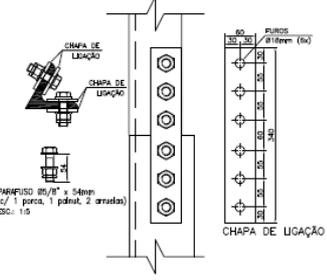
⑬ CHAPA DE LIGAÇÃO
ESC.: 1:5



⑭ CHAPA DE LIGAÇÃO
ESC.: 1:5



⑮ CHAPA DE LIGAÇÃO
ESC.: 1:5



⑯ CHAPA DE BASE
ESC.: 1:5

