



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



**ANÁLISE COMPARATIVA DE NORMAS DE
DIMENSIONAMENTO DE TORRES DE ALTA TENSÃO FACE À
ACÇÃO DE CICLONES**

Autor: **Hamilton Abel dos Santos Massinga**

Supervisor: **Engº. Rafael Mabunda**

Trabalho de Licenciatura apresentado ao Departamento de Engenharia Civil para
obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Civil

Maputo, 23 de Julho de 2025



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



**ANÁLISE COMPARATIVA DE NORMAS DE
DIMENSIONAMENTO DE TORRES DE ALTA TENSÃO FACE À
ACÇÃO DE CICLONES**

Autor: **Hamilton Abel dos Santos Massinga**

Supervisor: **Engº. Rafael Mabunda**

Trabalho de Licenciatura apresentado ao Departamento de Engenharia Civil para
obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Civil

Maputo, 23 de Julho de 2025

Trabalho de Licenciatura, Apresentado ao
Departamento de Engenharia Civil da
Faculdade de Engenharia da Universidade
Eduardo Mondlane para a Obtenção do Grau
de Licenciatura em Engenharia Civil

Autor: Hamilton Abel dos Santos Massinga

Assinatura:

___/___/___

Supervisor: Eng^o Rafael Mabunda

Assinatura:

___/___/___



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante _____
entregou no dia ___/___/20___ as ___ cópias do relatório do seu Trabalho de
Licenciatura com a referência: _____
Intitulado: _____

Maputo, ___ de _____ de 20___

Chefe da Secretaria

DECLARAÇÃO DE HONRA

Declaro que este trabalho é resultado da minha própria investigação, esforço e dedicação, que não foi em nenhum momento submetido para outro grau que não tenha sido o de Licenciatura em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane.

Maputo, Julho de 2025

O autor:

(Hamilton Abel dos Santos Massinga)

____/____/____

*“Acredito em intuições e inspirações. Às vezes sinto que estou certo. Não sei se estou.”*Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradecer à Deus pelo dom da vida e aos meus pais pela educação, amor e carinho.

Agradecer ao meu irmão Idelfonso, à minha irmã Deyna, minhas primas Érica, Yara, Omayra Djamília e Júlia, pelo apoio e por sempre estarem ao meu lado nos momentos difíceis.

Agradecer aos colegas da Faculdade que, para além de ajudarem na compreensão da matéria, muitas vezes ajudaram com palavras de motivação e encorajamento, com especial atenção ao Jorge Chipipure, Inocêncio Mandlate, Juventino Tovele, Ilacinho Amade, João Pinto, António Jopela, Manuel Matusse, Ambasse Mussa e José Manuel

Agradecer ao meu professor de Matemática da décima classe, Evaristo, que foi um dos meus principais mentores na vida académica.

Por fim, mas não menos importante, agradecer aos docentes por transmitirem devidamente os ensinamentos académicos, com especial atenção ao Dr. Américo Dimande e Eng. Alexandra Neves e Carlos Fernando Caupers e Eng. Rafael Mabunda pela paciência e compreensão.

Sem o apoio dessas partes, esta jornada académica teria sido muito mais complicada.

Muito obrigado pela atenção e oportunidade.

RESUMO

As recentes ocorrências de ciclones em Moçambique, mais precisamente nas zonas Centro e Norte do País, têm afectado infra-estructuras diversas, de carácter público e privado, comprometendo sistemas de saúde, educação, transporte e comunicação. Esta realidade faz com que seja acrescida a necessidade de estudos, revisão e aplicação de tecnologias e normas de construção mais resilientes e sustentáveis.

Das infra-estructuras afectadas pela incidência de ciclones (ventos de alta intensidade) podem ser destacadas, as torres de transmissão de corrente eléctrica, torres de telecomunicações e torres de energia eólica, como obras que exigem uma abordagem mais aprofundada e especializada na avaliação do desempenho estrutural face à ocorrência de ciclones.

Os ciclones tropicais, caracterizados por ventos intensos, chuvas abundantes e picos de pressão barométrica, podem exercer forças significativas sobre torres, representando riscos substanciais à sua integridade estrutural. Em virtude disso, é fundamental que as Normas e regulamentos de dimensionamento sejam capazes de proporcionar uma base sólida para o projecto de torres resilientes, capazes de resistir aos impactos desses eventos climáticos extremos.

Este estudo se propõe a realizar uma análise comparativa abalizada das Normas de dimensionamento de torres de transmissão de energia eléctrica de alta tensão, com particular ênfase na avaliação da resposta estrutural face a acção de ciclones. Para tal, serão examinados os padrões e códigos de construção adoptados a nível internacional, com uma ênfase particular nas orientações e requisitos de projecto que dizem respeito às cargas de vento.

A compreensão das variações e semelhanças entre as normas têm um papel fundamental na progressão das melhores práticas de dimensionamento, visando a concepção de estruturas intrinsecamente seguras e capazes de enfrentar as adversidades impostas pelo aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos.

Palavras-Chave: Linhas de Transmissão, Acção do Vento, norma, IEC 60826, NBR 5422-1985, ASCE 74

ABSTRACT

The recent occurrences of cyclones in Mozambique, more precisely in the Central and Northern areas of the country, have affected various infrastructures, both public and private, compromising health, education, transport and communication systems. This reality increases the need for studies, review and application of more resilient and sustainable construction technologies and standards.

Of the infrastructures affected by the incidence of cyclones (high-intensity winds), electrical current transmission towers, telecommunications towers and wind energy towers can be highlighted as works that require a more in-depth and specialized approach in the assessment of structural performance in the face of cyclones.

Tropical cyclones, characterized by intense winds, abundant rain and peaks in barometric pressure, can exert significant forces on towers, posing substantial risks to their structural integrity. As a result, it is essential that design standards and regulations are able to provide a solid basis for the design of resilient towers, capable of withstanding the impacts of these extreme weather events.

This study aims to carry out an authoritative comparative analysis of the standards for sizing high voltage electrical energy transmission towers, with particular emphasis on evaluating the structural response to the action of cyclones. To this end, internationally adopted building standards and codes will be examined, with a particular emphasis on design guidelines and requirements that relate to wind loads.

Understanding the variations and similarities between standards plays a fundamental role in the progression of best design practices, aiming to design intrinsically safe structures capable of facing the diversities imposed by the increase in the frequency and intensity of climatic events.

Key-words: Transmission Line, Wind Action, Norm, IEC 60826, NBR 5422-1985, ASCE

ÍNDICE

1	Introdução	1
1.1	Objectivos	3
1.1.1	Objectivo Geral.....	3
1.1.2	Objectivos Específicos.....	3
1.2	Organização do Trabalho.....	4
2	Revisão Bibliográfica.....	5
2.1	Linhas de Transmissão	5
2.1.1	Generalidades	5
2.1.2	Estructuras de Suportes	6
2.2	Forças Actuantes em LT's.....	9
2.2.1	Forças de Vento	10
2.2.2	Peso Próprio	14
2.2.3	Outras Forças.....	14
2.3	Análise Estructural	16
2.3.1	Metodologias de cálculo estrutural.....	16
2.3.2	Normas Utilizadas em projectos de Linhas de Transmissão	17
2.3.3	Normas usadas no Presente Trabalho	19
2.4	Quantificação das Acções.....	19
2.4.1	Peso próprio	20
2.4.2	Forças devidas ao vento na estrutura.....	20
2.4.3	Força devido ao vento nos cabos	21
2.5	Hipóteses de Carregamento	24
2.6	Critérios de Projecto de Acordo Com o Guia ASCE-74.....	25
2.6.1	Aspectos Gerais	25
2.6.2	Acções de vento conforme a ASCE-74	26
2.7	Critérios de projecto conforme a IEC 60826:2017.....	33

2.7.1	Aspectos gerais	33
2.7.2	Acções de vento conforme a IEC 60826 (2017)	33
2.8	Critérios de Projecto conforme a NBR 5422-1985	39
2.9	Critérios de Segurança Conforme o Eurocódigo 3	45
2.9.1	Combinação de acções	45
2.9.2	Verificação em relação à Tracção	45
2.9.3	Verificação em relação à Compressão	47
2.9.4	Verificação da Segurança das Barras à flexão composta	49
2.9.5	Verificação da Segurança das Ligações Metálicas.....	49
2.9.6	Efeitos de Segunda ordem	51
3	Caso De Estudo	54
3.1	Descrição Geral da Torre	54
3.2	Modelo Numérico da Torre.....	55
3.2.1	Características dos Elementos Estruturais da Torre	56
3.3	Acção do Vento	58
3.3.1	Velocidade Básica do vento	58
3.3.2	Velocidade de Projecto	59
3.3.3	Factor de resposta à Rajada e Coeficiente de Arrasto	60
3.4	Forças Devido a Acção do Vento para Diferentes Hipóteses.....	61
3.5	Avaliação da Segurança Estrutural da Torre	74
3.5.1	Combinação de acções	74
3.5.2	Resultados de cálculos numéricos	75
3.5.3	Análise e verificação da segurança	77
4	Conclusões e Recomendações	83
4.1	Sobre as forças do vento	83
4.2	Sobre a segurança da estrutura	84
4.3	Sobre o Contexto Nacional	85

4.4	Sobre Trabalhos Futuros.....	85
-----	------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS

A400NR - Aço de armadura ordinária de classe 400, laminado a quente e rugoso.

ASCE - American Society for Civil Engineering

B30 - Classe 30 de betão ensaiado por provete cúbico.

Fe430 - Aço de classe 430.

Fe510 - Aço de classe 510

Gr 6.8 - Aço de classe 6.8 para os parafusos

IEC - International Electrotechnical Commission

LNP - Designações dos tipos e das classes de perfis metálicos de cantoneiras

LT - Linhas de Transmissão

NBR - Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

Maiúsculas latinas

A_{eff} - Área efectiva

A - Área Bruta

C_{xT} - Coeficiente de arrasto

E - Módulo de Elasticidade.

$E_{c,28}$ - Módulo de Elasticidade do betão aos 28 dias de idade.

G_k -Carga Permanente característica

H_{ED} - Esforço Horizontal de cálculo

N_{ED} - Esforço axial de cálculo

N_{RD} - Esforço axial Resistente

W_k - Acção do vento característica

V_{ED} - Esforço Vertical de cálculo

Minúsculas Latinas

f_{cd} - Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão.

f_{ck} - Valor característico da tensão de rotura do betão à compressão.

f_{syd} - Valor de cálculo da tensão de cedência ou da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% à tracção do aço das armaduras ordinárias.

f_{syk} - Valor característico da tensão de cedência à tracção do aço das armaduras ordinárias.

f_{yd} - Valor característico de cálculo da tensão resistente.

Maiúsculas Gregas

Φ - Factor à considerar no cálculo da esbelteza local

Minúsculas Gregas

α - Coeficiente do cálculo da Força de esmagamento

α_m - Factor de redução no cálculo da esbelteza

β - Coeficiente de redução da secção bruta

γ - Factor parcial de Segurança

ε - Factor a considerar no cálculo da esbelteza local $\varepsilon = \sqrt{\frac{275}{f_y}}$

θ - Ângulo de incidência do vento

λ - Esbelteza

ν - Coeficiente de Poisson

ρ - Massa específica do ar (1,225Kg/m³)

τ - Factor de correcção da massa específica do ar

χ - Índice de cheios

ψ - Coeficiente de redução

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de um sistema de transmissão. (Fonte: Norma IEC 60826-2017)	5
Figura 2 Configurações de torres para linhas de 500 kV (a e b) e 750 kV (b e c).	8
Figura 3 Configurações comuns de torres para linhas de alta tensão e extra-alta tensão.	9
Figura 4 Exemplos de configurações de torres de extra-alta tensão.....	9
Figura 5 Vista em Planta do Ciclone IDAI	12
Figura 6 Pessoas se abrigam no tecto de uma casa em área completamente alagada após a passagem do ciclone Idai na cidade de Beira, em Moçambique — Foto: Rick Emenaket/Mission Aviation Fellowship via AFP	12
Figura 7 Ciclone Kenneth na intensidade máxima chegando a Moçambique em 25 de abril, Fonte: Wikipedia	13
Figura 8 Deslizamentos de terra são temidos no bairro de Mahate, em Pemba, depois que o ciclone Kenneth varreu Moçambique, Fonte: ONU NEWS	13
Figura 9 Torre de Energia Derrubada em Rondônia no Brasil — Foto: Aneel/Divulgação	14
Figura 10 Torre derrubada pela base em Vilhena, RO — Foto: Aneel/Divulgação ..	14
Figura 11 Vão gravante em sistemas de LT's.	25
Figura 12 Factor de Resposta à Rajada para a Estructura da Torre (Fonte: ASCE 74, Página 31).....	28
Figura 13 Factor de Resposta à Rajada para os cabos (Fonte: ASCE 74, Página 31)	28
Figura 14 Representação dos valores a considerar na determinação do coeficiente Topográfico K_{zt} (Fonte:ASCE-74)	30
Figura 15 Demonstração do ângulo de incidência do vento na Torre	31
Figura 16 Factor combinado do vento GC para conductores em várias categorias de terreno e altura sobre o solo.....	36
Figura 17 Factor do vão G_L	36
Figura 18 Factor G_t aplicável às estruturas de suportes e isoladores	37
Figura 19 Definição do ângulo de incidência do vento (Fonte: IEC 60826:2017)	38
Figura 20 Coeficiente C_{xt} aplicável às torres reticuladas compostas por elementos com lados planos.	39
Figura 21 Valores de K_d para a velocidade do vento a uma altura de 10 metros ...	42
Figura 22 Coeficiente $1/n$ em Função do coeficiente de Rugosidade.....	42

Figura 23 Factor de efectividade α	43
Figura 24 Acção do Vento Sobre a Torre (Fonte: NBR5422-1985).....	44
Figura 25 Coeficiente C_{xt} aplicável às torres compostas por elementos com lados planos.	44
Figura 26 Cantoneiras ligadas por uma aba (Fonte: EC3-1-1).....	47
Figura 27 Curvas de Cedência	48
Figura 28 Distâncias entre parafusos e entre os parafusos e as bordas.....	51
Figura 29 Imperfeição global ϕ da estrutura e forças laterais equivalentes.....	52
Figura 30 Imperfeição local e_0 da barra e forças transversais equivalentes.	53
Figura 31 Ilustração da torre (a) vista geral da torre implantada (b) vista geral no projecto e (c) localização da torre de Malhazine	54
Figura 32 Dimensões das Faces Frontal da Torre de Suspensão de Malhazine	55
Figura 33 Dimensões das Faces Lateral da Torre de Suspensão de Malhazine	55
Figura 34 – Vista frontal em 2D da parte superior do modelo numérico da Torre. ...	56
Figura 35 Vista lateral em 2D da parte superior do modelo da Torre.	56
Figura 36 Vista superior do modelo numérico.	56
Figura 37 Vista geral do modelo numérico com forças aplicadas.....	56
Figura 38 - Zoneamento de Ciclones em Moçambique (a Direita) e detalhe das velocidades (a esquerda)	59
Figura 39 - Factor de Resposta a rajada Segundo a IEC 60826 e ASCE-74	61
Figura 40 Comportamento do Factor de rajada em função da Altura para os 3 Documentos	61
Figura 41 Força do vento actuando em diferentes níveis na estrutura da torre devido a incidência do vento a 0° na Hipótese 1 obtido pelas diferentes normas.....	67
Figura 42 – Deformada da estrutura devido ao peso próprio: (a) vista frontal-XZ; (b) vista lateral YZ e (c) vista isométrica	75
Figura 43 – Deformada da estrutura devido às forças do vento incidindo a 0° na Hipóteses 1 para diferentes normas: (a) IEC62826; (b) ASCE-74 e (c) NBR5482....	76
Figura 44 – Tensões nas barras devido às forças do vento incidindo a 0° na Hipóteses 1 para diferentes normas: (a) IEC62826; (b) ASCE-74 e (c) NBR5482.....	76
Figura 45 – Tensões máximas e mínimas nas barras devido às combinações fundamentais na Hipóteses 1 para diferentes normas: (a) IEC62826; (b) ASCE-74 e (c) NBR5482.....	77

Figura 46 – Tensões máximas e mínimas nas 08 barras mais solicitadas devido às várias combinações na Hipótese 1 para as diferentes normas.	79
Figura 47 – Tensões máximas e mínimas nas 08 barras mais solicitadas devido às várias combinações na Hipótese 2 para as diferentes normas.	80
Figura 48 – Tensões máximas e mínimas nas 08 barras mais solicitadas devido às várias combinações na Hipótese 3 para as diferentes normas.	80
Figura 49 – Descrição da ligação, PL190x20, entre as barras inferiores de extremidade nas mísulas	80
Figura 50 – Descrição da ligação, PL284x10, entre as barras inferiores de extremidade nas mísulas	81
Figura 51 – Esforços axiais máximos resistentes e actuantes em chapas de ligação nas diferentes normas.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Valores do expoente α e do valor Z_g (Fonte: ASCE 74).....	26
Tabela 2 Coeficiente de Exposição de Pressão da Velocidade (K_z)	26
Tabela 3 Valores de K_1 K_2 e K_3 (Fonte: ASCE-74).....	30
Tabela 4 Tabela auxiliar para determinar o valor de K_{zt}	30
Tabela 5 Coeficientes de Força, C_f , para Vento Normal em Treliças.....	31
Tabela 6 Níveis de confiabilidade para linhas de transmissão.	33
Tabela 7 Classificação das categorias de terrenos	35
Tabela 8 Classificação das categorias de terrenos	41
Tabela 9 Valores n de correcção da velocidade do vento em Função da Altura	41
Tabela 10 Coeficientes de β_1 e β_2 redução e (Fonte: EC3-1-1)	47
Tabela 11 Coeficientes parciais de segurança (Adaptação - Fonte: EC3-1-1).....	47
Tabela 12 Factor de Imperfeição pra curvas de cedência	48
Tabela 13 Perfis na torre e suas funções	56
Tabela 14 Perfil das chapas de Ligação.....	57
Tabela 15 Propriedades do Aço	57
Tabela 16 Propriedades do betão	58
Tabela 17 Propriedade das armaduras ordinárias.....	58
Tabela 18 Propriedades mecânicas dos cabos	58

Tabela 19 Coeficientes de rugosidade e Coeficientes de correcção da velocidade do vento.....	59
Tabela 20 Valores de Velocidade considerados para IEC 60826, NBR 5422-1985 e ASCE 74	60
Tabela 21 Factor de Resposta à Rajada das Torres IEC 60826, NBR 5422-1985 e ASCE 74	60
Tabela 22 Coeficiente de arrasto para Para IEC 60826, NBR 5422-1985 e ASCE-7461	
Tabela 23 Tabela com os resultados dos esforços actuantes nas torres e nos cabos segundo a Norma IEC 60826	63
Tabela 24 Tabela com os resultados dos esforços actuantes nas torres e nos cabos segundo a Norma NBR 5422-1985	64
Tabela 25 Tabela com os resultados dos esforços actuantes nas torres e nos cabos segundo a ASCE-74.....	65
Tabela 26 Tabela Comparativa das forças devido a acção do vento na Face 01 para cada um dos 3 Documentos normativos na Hipótese 1	67
Tabela 27 - Gráficos Comparativos de Força do vento nos nós da Estructura devido a incidência do vento actuando nas direcções de 0°, 30°,45°, 60° e 90° nas Faces 1 e 2 para a Hipótese 1.	68
Tabela 28 Força de Vento incidente nas faces nos cabos de acordo com as diferentes Normas Para Hipótese 1	69
Tabela 29 Acção de Vento nos cabos, tendo em conta o cabo Pára-raios Rompido	70
Tabela 30 Força do vento nos cabos, tendo em conta o cabo conductor rompido a 16,3 metros	72
Tabela 31 Acção de Vento nos cabos, tendo em conta o cabo Conductor Rompido a 13,5 metros	73
Tabela 32 Verificação da Estabilidade Global	77
Tabela 33 – Verificação da segurança aos ELU das 8 barras mais solicitadas pela IEC 60826	78
Tabela 34 Verificação da Segurança das ligações mais solicitadas.....	81

Capítulo 1

Introdução

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o aumento da frequência e intensidade dos eventos climáticos extremos tem trazido à tona a importância de garantir que as infra-estruturas essenciais sejam projectadas para resistir às condições adversas. Em particular, as torres de transmissão de energia eléctrica, que são componentes críticos da rede de distribuição de energia, estão constantemente expostas às forças da natureza. Dentre os eventos climáticos que mais ameaçam essas estruturas, os ciclones se destacam devido à sua capacidade de gerar ventos intensos, chuvas torrenciais e mudanças bruscas nas condições atmosféricas. Em regiões onde esses eventos são comuns, o dimensionamento adequado das torres de transmissão é crucial para garantir a continuidade do fornecimento de energia e a segurança das populações.

O dimensionamento de torres de transmissão de energia é regido por normas técnicas que variam de acordo com o país ou a região. Essas normas especificam os critérios de projecto, os métodos de cálculo e os parâmetros de segurança que devem ser considerados para garantir que as torres possam suportar as cargas impostas por ventos fortes e outras acções climáticas. No entanto, devido às diferenças climáticas, geográficas e tecnológicas, essas normas podem apresentar abordagens variadas, o que levanta questões sobre a eficácia comparativa dessas directrizes em garantir a resiliência das torres de transmissão em face de ciclones.

Os ciclones representam um desafio particular para o projecto de torres de transmissão devido à natureza complexa das forças de vento associadas a esses fenómenos. Diferentemente de ventos constantes, os ventos ciclónicos são altamente turbulentos, com variações significativas na velocidade e direcção, o que aumenta a complexidade das cargas aplicadas às estruturas. Além disso, a interacção dos ventos com a

topografia local, vegetação e edificações pode comprometer as pressões exercidas sobre as torres. Dado o potencial destrutivo dos ciclones, a falha de uma única torre de transmissão pode causar quedas de energia em larga escala, com impactos socioeconómicos significativos.

A necessidade de avaliar a adequação das normas de dimensionamento frente a essas condições extremas se torna, portanto, imperativa. É neste contexto que o presente trabalho visa realizar uma análise comparativa de algumas normas de dimensionamento de torres de transmissão de energia, com foco especial no comportamento de estruturas em situações de ciclones. A comparação abrange normas internacionalmente reconhecidas, como as europeias, americanas e outras relevantes, considerando suas abordagens quanto às cargas de vento, coeficientes de segurança, e os métodos de análise estrutural aplicados.

Ao final deste estudo, espera-se identificar as principais diferenças e semelhanças entre as normas analisadas, no que se refere a estrutura da torre (superestrutura), dispensando-se o enfoque às Fundações e sua interacção com o solo.

No geral, este trabalho pretende contribuir para o fortalecimento das infra-estruturas de transmissão de energia, garantindo que as torres sejam capazes de resistir à ciclones e, assim, minimizar os riscos de interrupções no fornecimento de energia eléctrica em momentos críticos.

Em suma, a análise comparativa das normas de dimensionamento de torres em relação ao comportamento em caso de ciclones é um passo fundamental para a melhoria contínua dos processos de engenharia envolvidos no projecto dessas estruturas. Ao entender melhor como as diferentes normas abordam os desafios impostos pelos ciclones, será possível avançar na direcção de um padrão global mais unificado e eficaz, capaz de proteger as infra-estruturas críticas de energia contra os efeitos devastadores dos fenómenos climáticos extremos.

1.1 OBJECTIVOS

1.1.1 Objectivo Geral

O presente trabalho tem como objectivo geral, avaliar e comparar as metodologias de análise de comportamento estrutural de Torres de Alta Tensão sujeitas a acção de ciclones, apresentadas por três das diferentes normas de dimensionamento.

1.1.2 Objectivos Específicos

De forma específica, nortearam o trabalho os seguintes objectivos:

- Identificar e caracterizar as principais normas de dimensionamento e análise estrutural de torres de alta tensão, destacando para as devidas análises, pelo menos três normas;
- Quantificar as acções do vento sobre uma torre metálica e apresentar as hipóteses de combinação de acções a partir de cada uma das três normas escolhidas;
- Analisar e comparar o comportamento estrutural da torre em causa, a partir da aplicação de cada uma das normas.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em quatro capítulos, sendo, este primeiro, introdutório, no qual, são abordados temas referentes ao projecto estrutural de torres de linhas de transmissão.

No Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os assuntos gerais. Descreve-se de forma breve as filosofias de projecto para dimensionamento de estruturas e são introduzidos aspectos básicos acerca de torres de linhas de transmissão e as acções consideradas no projecto.

No Capítulo 3, discorre-se sobre o estudo de caso constituída pela análise de uma torre de aço treliçada pertencente a uma linha de transmissão de uma empresa nacional distribuidora de corrente eléctrica. Apresentam-se também os resultados obtidos face às acções do vento sobre a estrutura da torre de suspensão, assim como devido às combinações necessárias para a verificação do comportamento das mesmas e da segurança aos estados limites.

No Capítulo 4, são feitas as conclusões do presente trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LINHAS DE TRANSMISSÃO

2.1.1 Generalidades

As normas mais recentes de projecto, como a IEC 60826 (2017), trata as Linhas de Transmissão (LT's) como um sistema composto por quatro componentes principais, nomeadamente, cabos conductores e aterramento, isoladores (interfaces), suporte (estructuras de torres) e as fundações, conforme ilustrado na Figura 1.

Os componentes, por sua vez, são subdivididos em elementos, nomeadamente, perfis de aço, madeira ou de materiais diversos, parafusos, cabos estais, conexões, conectores, isoladores e acessórios diversos. Para além desta categorização refira-se que os suportes podem ser constituídos por elementos de betão, e as fundações por sapatas isoladas, tubulões ou fundações profundas (em estacas de betão ou aço) com maciços de encabeçamento, cuja conexão com a estrutura é feita por *stubs* (elemento de ligação metálica entre a estrutura de suporte e a fundação).

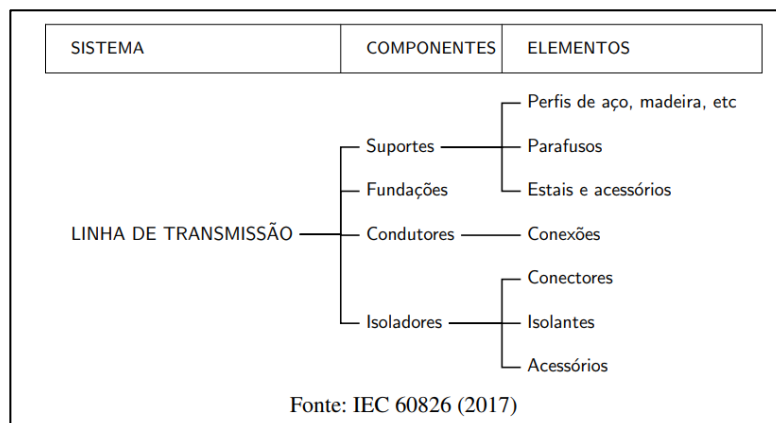


Figura 1 Diagrama de um sistema de transmissão. (Fonte: Norma IEC 60826-2017)

2.1.2 Estructuras de Suportes

De acordo com LABEGALINI et al. (1992), as estruturas de suporte podem ser classificadas em diferentes tipologias integram uma família de estruturas duma determinada LT constituída por diferentes torres dimensionadas para superarem diferentes desafios geográficos ao longo da linha. Frequentemente, as linhas atravessam regiões montanhosas, complexas travessias de rios e áreas alagadas, até que chegue devidamente aos pontos de consumo de energia.

A seguir são descritas seis tipologias de torres (suportes) de configuração comum:

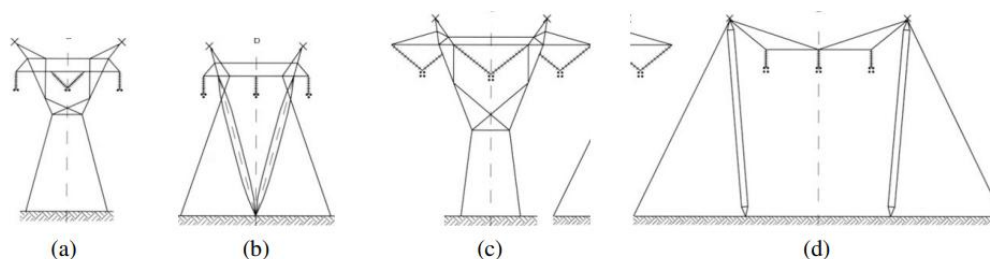
- (i) **Torre de suspensão** – constitui a tipologia estrutural mais utilizada ao longo de uma LT, na maioria dos casos. Em condições normais de operação, deve resistir aos esforços verticais devido ao peso dos cabos, isoladores e ferragens, bem como as forças horizontais transversais decorrentes da acção do vento sobre cabos, isoladores e sobre seus próprios elementos estruturais. As tracções longitudinais são equilibradas e as cadeias de isoladores empregadas são de suspensão. Excepcionalmente são solicitados por forças verticais adicionais, como aquelas decorrentes da montagem e de manutenção, como também por forças horizontais longitudinais decorrentes da ruptura de um ou mais cabos;
- (ii) **Torre terminal ou ancoragem total**– constituem os suportes utilizados no início e no fim das LT's, cabendo-lhes a responsabilidade de manter os cabos esticados e, conseqüentemente, as cadeias de isoladores empregadas são de tensão devido à necessidade de resistirem as tracções longitudinais transmitidas dos cabos. São solicitadas unilateralmente pelas mesmas forças que actuam nos suportes de suspensão e, adicionalmente, pelas forças axiais longitudinais na condição de maior intensidade de vento. Por esse motivo, são os suportes mais solicitados e, portanto, apresentam estruturas mais robustas e pesadas;
- (iii) **Torre de ancoragem intermediária** – semelhantes ao tipo anterior, porém empregados no meio das linhas, com tracções longitudinais equilibradas à frente e à trás. São menos reforçados que os tipos anteriores, pois devem resistir unilateralmente apenas aos esforços decorrentes do tensionamento dos cabos

durante a montagem, ou após a ruptura de alguns deles, supondo-se ausência de ventos de máxima intensidade. São igualmente empregados em pontos de ângulo relativamente elevados. O uso desse tipo de suporte é feito em intervalos regulares ao longo das linhas, a fim de facilitar a manutenção e trabalhos de retensionamento de cabos quando necessário;

- (iv) **Torre de ângulo ou desvio** – estruturas dimensionadas para suportar, além dos esforços verticais e transversais, também o desequilíbrio de tensões longitudinais nos alinhamentos que se cruzam. Para cruzamentos em ângulos pequenos, empregam cadeias de isoladores de suspensão e, com ângulos elevados, isoladores de tensão.
- (v) **Para transposição ou rotação de fases** – utilizadas para efectuar a transposição das fases, assegurando o equilíbrio electromagnéticos das linhas, e, com isso, a igualdade das quedas de tensão nas três fases;
- (vi) **Torre para derivação** – utilizadas para seccionamento das linhas e alimentação de ramais.

Os suportes também podem ser classificados quanto à forma de resistirem aos esforços e transmiti-los ao solo. Essa transmissão pode-se dar por meio dos próprios elementos estruturais de suporte, ou por estes auxiliados por tirantes ou estais ancorados no solo. De acordo com esse critério, as estruturas podem ser classificadas em autoportantes ou estruturas estaiadas (LABEGALINI et al.,1992).

- a) **Estructuras autoportantes** – são dimensionadas para transmitir os esforços da estrutura ao solo através de suas próprias fundações (vide Figura 2 a) e c));
- b) **Estructuras estaiadas** – nestes tipos de suportes são empregues tirantes ou estais ancorados ao solo para absorção das forças horizontais transversais e longitudinais, como apresentado na Figura 2 b) e d).



Fonte: Kiessling et al. (2014)

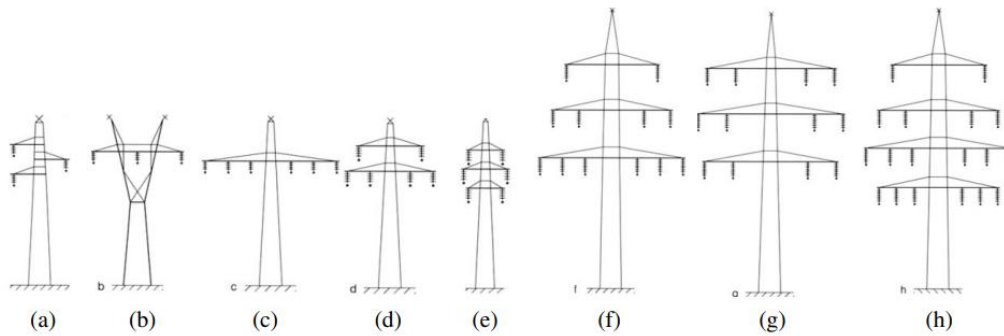
Figura 2 Configurações de torres para linhas de 500 kV (a e b) e 750 kV (b e c).

A norma IEC 60071-1 (2006) estabelece ainda que as LT's com tensão variando entre 45 kV e 300 kV são classificadas como “Alta Tensão” (AT ou HV), entre 300 kV e 750 kV “Extra-Alta Tensão” (EAT ou EHV), e acima de 800 kV “Ultra-Alta Tensão” (UAT ou UHV). Cada uma destas classes de torres apresentam configurações variadas em termos de número de circuitos por torre (circuito simples, duplos e múltiplos), altura de segurança, incluindo o tipo de conductores ou feixes a serem utilizados.

Para as linhas de alta e extra-alta tensão, uma ampla variedade de configurações de torres se encontra disponível na Figura 3 que ilustra algumas configurações adoptadas na Europa Central. Segundo Kiessling et al. (2014).

A configuração na Figura 3 a) é preferível para linhas de circuito único devido aos requisitos de passagem serem relativamente estreitos. Para circuitos duplos de 110, 220 e 380 kV, as configurações na Figura 3 d) e e) são mais utilizadas. Os circuitos de 110 kV em combinação com circuitos de 220 ou 380 kV, arranjados horizontalmente abaixo dos circuitos com maiores voltagens, tem a configuração da Figura 3 f) como as mais adequadas. E no caso de quatro circuitos de mesmo nível de voltagem podem ser arranjados conforme a configuração g) da Figura 3, formando um circuito com três fases posicionadas verticalmente ou duas fases na mísula¹ superior e uma na intermediária. Por fim um arranjo de seis circuitos é apresentado na Figura 3 h), sendo dois circuitos de 380 kV, dois de 220 kV e dois de 110 kV.

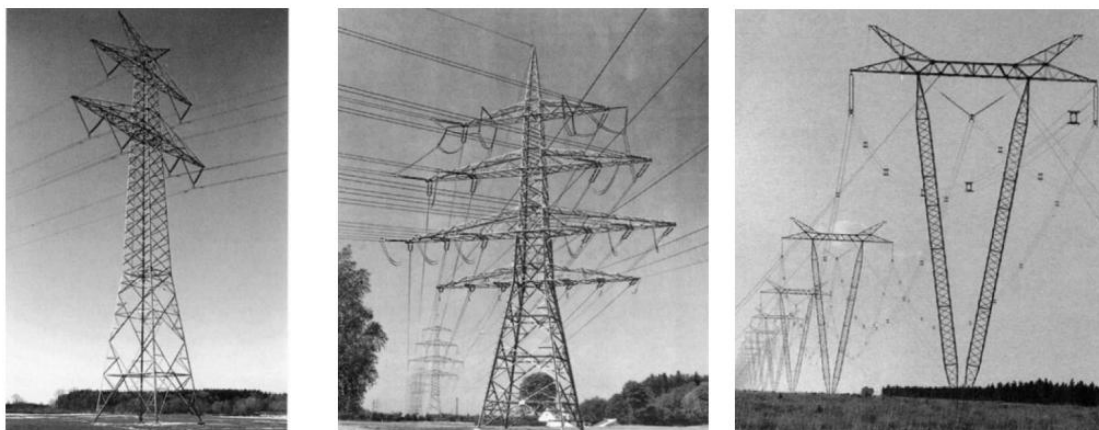
¹ Crossarm em Inglês, refere-se as saliências nas LT's responsáveis por suportar os isoladores



Fonte: Kiessling et al. (2014)

Figura 3 Configurações comuns de torres para linhas de alta tensão e extra-alta tensão.

A Figura 4 ilustra exemplos de configurações de torres de extra-alta tensão construídas na Alemanha e no Brasil, onde a Figura 4 a), apresenta uma configuração em duplo circuito, Figura 4 b) multi-circuito e a Figura 4 c) uma estrutura estaiada de suporte convencional de circuito simples.



(a) Torre de suspensão de circuito duplo, 380kV, na Alemanha
(b) Torre de ancoragem de seis circuitos, 380/220/110 kV, na Alemanha
(c) Torre de suspensão estaiada "V", 500 kV, no Brasil.

Fonte: Kiessling et al. (2014)

Figura 4 Exemplos de configurações de torres de extra-alta tensão.

2.2 FORÇAS ACTUANTES EM LT'S

As forças que interagem com as Linhas de Transmissão são de duas naturezas, nomeadamente, normais, as que ocorrem com maior frequência, e excepcionais, as que apresentam pequena probabilidade de ocorrência durante o período de vida útil da linha de transmissão (GONTIJO, 1994).

Ao longo da vida útil de sistemas de LT's, as principais variáveis responsáveis por solicitarem os componentes do sistema são decorrentes de fenómenos atmosféricos,

que ocorrem naturalmente nas regiões atravessadas pelas LT's. Essas variáveis produzem solicitações mecânicas nos cabos das linhas aéreas e nas estruturas que se encontram vinculadas, que por sua vez recebem os esforços e os transmitem para as estruturas de fundações.

Nas estruturas de suporte de LT's, as forças utilizadas no projecto são associadas a esforços frequentes preponderantemente produzidas por factores meteorológicos, os quais causam nos componentes mecânicos, pressões dinâmicas devido ao vento, variações de temperatura, podendo também produzir o acúmulo de neve em função da região geográfica de instalação da LT. Para além destas forças são consideradas também as que actuam ao longo de toda a vida da estrutura, como o peso próprio da estrutura, dos cabos conductores e de protecção, cadeias de isoladores e equipamentos de fixação e montagem da estrutura.

No caso de acções de projecto excepcionais ou acidentais, cuja probabilidade de ocorrência é remota, é recomendável que o projectista considere, esforços unilaterais de grande intensidade, podendo submeter as estruturas à forças longitudinais ou transversais, decorrentes da ocasião da ruptura de um ou mais cabos, ou pelo derrubamento de estruturas adjacentes. Segundo Kiessling et al. (2014)

Em Moçambique, no projecto de cabos e estruturas em sistemas de linhas de transmissão, a acção predominante é devida a actuação do vento. Como será visto adiante, existem diferentes fenómenos meteorológicos como a neve por exemplo, mas esta não será considerada por não ser um fenómeno típico no nosso País.

2.2.1 Forças de Vento

O vento é uma das acções mais significativas sobre as torres de alta tensão. Sua força exerce pressões consideráveis sobre as estruturas, especialmente em áreas expostas ou em regiões onde eventos meteorológicos extremos, como ciclones, são frequentes. Com efeito, as torres devem ser projectadas para resistir tanto a ventos constantes de menor intensidade quanto a rajadas intensas e súbitas. A análise do impacto do vento envolve a consideração de diversas variáveis, como a velocidade do vento, a topografia do terreno e a altura da torre, que afectam directamente às cargas aplicadas à estrutura. Pelo que, o conhecimento do comportamento dos ventos extremos, como os ciclones, e as respectivas velocidades associadas, é imprescindível para a avaliação da segurança

de torres de alta tensão. Desta feita, descrevem-se a seguir de forma genérica algumas das principais características de ciclones que ocorrem em regiões similares ao caso do presente estudo.

2.2.1.1 *Ciclones tropicais*

Os ciclones tropicais têm uma forma semelhante aos ciclones extratropicais, porém podem chegar a ter maiores dimensões (BLESSMAN, 2005, p. 27). Em geral, desenvolvem-se na região tropical em latitudes que variam entre 5° e 20°. São classificados como ciclones tropicais quando os ventos que ocorrem dentro da circulação do sistema sustentam velocidades com valor igual ou superior a 33 m/s (118,8 km/h), sobre um período de integração de 1 minuto, observados ou estimado na altura meteorológica padrão de 10 m em uma exposição desobstruída (AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, 2012). A fonte de energia que alimenta a tormenta é obtida da água aquecida da superfície do oceano, dessa forma, quando a tormenta alcança o continente e avança caminho adentro, sua fonte de energia cessa e as velocidades dos ventos gradualmente diminuem (SIMIU; YEO, 2019).

Um ciclone tropical plenamente desenvolvido possui diferentes nomenclaturas conforme a região de formação (BLESSMAN, 2005, p. 27), nomeadamente:

- a) **Furacão** – para os que ocorrem nos Estados Unidos da América, no golfo do México e no Brasil;
- b) **Tufão** - no extremo oriente ou no Pacífico oeste, oceano Atlântico e mares da China;
- c) **Willy-willy** ou simplesmente ciclone na Austrália;
- d) **Ciclone** em Austrália, Bangladesh, Paquistão, Índia e regiões da Africa Austral.
- e) **Baguio** - nas Filipinas

2.2.1.2 *Ciclones Tropicais em Moçambique*

a) Ciclone IDAI

Moçambique registou, entre os dias 14 e 15 de Março de 2019, um dos maiores desastres naturais após as cheias do ano 2000. O Ciclone “IDAI” abateu-se na zona centro do País e na parte norte da província de Inhambane. De acordo com o Instituto Nacional de Gestão de Calamidades (INGC) trata-se de um ciclone de categoria 4

caracterizado por ventos fortes (160 a 200 quilómetros por hora) acompanhados por chuvas muito fortes com mais de 150 milímetros em 24 horas e trovoadas fortes e rajadas. A Cidade da Beira é apontada como a zona mais afectada pelo ciclone, onde, de acordo com as informações avançadas pelo INGC, houve destruição massiva das infra-estruturas de acesso, nomeadamente, estradas, pontes, etc., bem assim a rede de electricidade e comunicação. (Fonte: Moçambique Ciclone Idai PDNA avaliação de necessidades pós desastre, disponível em: [PDNA Mozambique Cyclone Idai - Post-Disaster Needs Assessment Full Report Portuguese.pdf](#), acessado a 26 de Outubro de 2024)



Figura 5 Vista em Planta do Ciclone IDAI



Figura 6 Pessoas se abrigam no tecto de uma casa em área completamente alagada após a passagem do ciclone Idai na cidade de Beira, em Moçambique — Foto: Rick Emenaket/Mission Aviation Fellowship via AFP

b) Ciclone KENNETH

Kenneth atingiu Moçambique cerca de um mês depois que o ciclone IDAI devastou a parte norte do país, levantando temores de que a crise humanitária em curso pudesse ser agravada pela tempestade. As autoridades locais no norte de Moçambique evacuaram mais de 30.000 pessoas antes da tempestade, devido aos impactos esperados.

Na noite de quinta-feira, 25 de abril, hora local (12:15), o ciclone KENNETH atingiu a costa ao norte de Pemba, Moçambique, com ventos sustentados de 1 minuto de 220

km/h. A IFRC² relatou danos generalizados na cidade, com cortes de energia registados em toda a cidade e várias árvores derrubadas, o que causou ainda mais danos. Em Moçambique, um total de 45 pessoas foram mortas, incluindo uma mulher que foi morta pela queda de um coqueiro perto de Pemba. Além disso, quatro navios naufragaram na costa da cidade de Palma. Na Ilha do Ibo, foi relatado que 90% das casas foram destruídas. Na Província de Cabo Delgado, 2.500 casas foram destruídas e várias escolas e hospitais também sofreram danos. (Fonte: *Ciclone Kenneth – Wikipédia, a enciclopédia livre*, acessado a 28 de Outubro de 2024)



Figura 7 Ciclone Kenneth na intensidade máxima chegando a Moçambique em 25 de abril, Fonte: Wikipedia



Figura 8 Deslizamentos de terra são temidos no bairro de Mahate, em Pemba, depois que o ciclone Kenneth assolou Moçambique, Fonte: ONU NEWS

2.2.1.3 Efeitos de Ciclones ao redor do Mundo

São vários os países assolados por ciclones, e os danos causados não se restringem apenas a infra-estruturas de transmissão, contudo podem ser observadas nas Figuras 9 e 10 imagens de Torres desabadas devido à acções de ventos fortes.

² IFRC- International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (Traduzido: Federação Internacional da Cruz vermelha e Sociedades crescentes vermelhas)



Figura 9 Torre de Energia Derrubada em Rondônia no Brasil —
Foto: Aneel/Divulgação



Figura 10 Torre derrubada pela base em Vilhena, RO — Foto:
Aneel/Divulgação

2.2.2 Peso Próprio

O peso próprio de uma torre de alta tensão é uma consideração fundamental no projecto dessas estruturas. Esse peso refere-se à carga que a própria estrutura exerce sobre suas fundações e inclui todos os elementos que compõem a torre, como as colunas principais, diagonais, barras transversais, e outros componentes estruturais de aço.

Além do peso da estrutura, é importante considerar o peso dos isoladores, que são componentes críticos usados para manter os cabos conductores suspensos e isolados electricamente da torre. Os isoladores, geralmente feitos de materiais como porcelana ou vidro temperado, são pesados e contribuem significativamente para a carga total que a torre precisa suportar.

Os cabos conductores, por sua vez, também adicionam uma carga significativa à torre. Esses cabos, que transportam a energia eléctrica, são geralmente feitos de alumínio ou cobre, materiais que, apesar de serem bons conductores, têm um peso considerável. Quando instalados, esses cabos são tensionados para garantir uma linha segura entre as torres, aumentando ainda mais a carga que a estrutura precisa suportar.

2.2.3 Outras Forças

Conforme já referenciado, para além do peso próprio e o vento existem outras forças oriundas das condições meteorológicas e de funcionamento da torre a serem considerados na análise e dimensionamento de uma torre, embora para o fim pretendido

neste trabalho não serão considerados nos cálculos, contudo são a seguir resumidamente descritos.

2.2.3.1 Carga de Neve e Gelo

Em regiões frias, as torres de alta tensão estão igualmente sujeitas à cargas de neve e gelo, que podem acumular-se sobre os cabos e elementos estruturais. O peso adicional proveniente da acumulação de neve ou gelo aumenta significativamente as cargas actuantes na estrutura, podendo levar à deformações ou, em casos extremos, ao colapso se não forem adequadamente projectadas para suportar tais condições. Além disso, a formação de gelo pode alterar a aerodinâmica da torre, aumentando sua vulnerabilidade ao vento.

2.2.3.2 Acções de Temperatura

As variações de temperatura afectam os materiais que compõem a torre, causando dilatações e contracções. Essas mudanças dimensionais podem induzir tensões internas nos materiais, que, se não forem adequadamente acomodadas pelo projecto, podem resultar em fadiga ou falhas estruturais ao longo do tempo. A análise das acções térmicas é essencial, principalmente em regiões com grandes variações de temperatura entre o dia e a noite, ou entre as estações do ano.

2.2.3.3 Acções Sísmicas

Em regiões susceptíveis a terremotos, as torres de alta tensão devem ser projectadas para resistir a forças sísmicas. Durante um evento sísmico, a estrutura da torre pode ser submetida a movimentos de base que geram forças inerciais consideráveis, exigindo que a estrutura tenha flexibilidade e resistência suficientes para dissipar a energia do terremoto sem sofrer danos irreparáveis. A acção sísmica requer uma análise detalhada para garantir que a torre permaneça funcional e segura mesmo após um tremor de terra.

2.2.3.4 Acções de Carga Eléctrica

Além das acções físicas, as torres de alta tensão também enfrentam cargas eléctricas que podem influenciar seu comportamento. As descargas atmosféricas, como raios, representam uma das principais ameaças eléctricas, podendo causar danos directos à estrutura ou aos sistemas de transmissão. Para mitigar esses efeitos, as torres são geralmente equipadas com sistemas de aterramento e protecção contra raios, que desviam as correntes eléctricas para o solo, minimizando os riscos de danos.

2.2.3.5 Acções de Manutenção e Operação

Durante a vida útil da torre, as operações de manutenção e o carregamento devido ao peso dos cabos e equipamentos também geram acções sobre a estrutura. As cargas de manutenção incluem o peso de trabalhadores, equipamentos e ferramentas que actuam temporariamente sobre a torre. É essencial que a estrutura seja projectada para suportar essas cargas adicionais sem comprometer sua integridade.

2.3 ANÁLISE ESTRUCTURAL

2.3.1 Metodologias de cálculo estructural

Como o presente Trabalho não trata de dimensionamento de uma nova estrutura, mas sim de avaliação e análise do comportamento de uma Torre existente tendo em conta três diferentes normas, que serão posteriormente listadas de acordo com os Países/regiões onde são aplicadas. Destas normas serão escolhidas e usadas no presente estudo aquelas comumente adoptadas internacionalmente.

Tendo as normas devidamente seleccionadas, foram usados como recurso de base para cálculos numéricos e computacionais com vista a análise da torre em causa. as seguintes ferramentas:

- Planilhas de cálculo em *Microsoft Excel* – Usado para proceder com a introdução de fórmulas apresentadas pelas normas e realização de cálculos automatizados e proceder com a visualização gráfica de dados para melhor comparação e identificação das diferenças nos resultados obtidos.
- Software de modelação e análise estructural *Autodesk Robot Structural Analysis* – usado para a modelação numérica da estrutura da torre, introdução das cargas, hipóteses de carregamento e combinação de acções bem como na análise estructural pelo método de elementos finitos e avaliação das tensões nas barras que constituem as estruturas
- Tabelas Técnicas de *Dos Reis, A. Correia, et.al* – usado para a caracterização dos materiais, obtenção de propriedades dos elementos e diversos parâmetros padronizados.

2.3.2 Normas Utilizadas em projectos de Linhas de Transmissão

2.3.2.1 Normas Brasileiras

No Brasil, o dimensionamento de torres em relação ao comportamento em caso de ciclones é regulamentado principalmente pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). As normas técnicas específicas que devem ser consideradas para o dimensionamento de torres incluem:

a) ABNT NBR 14712 – Torres de telecomunicações

Esta norma é específica para o dimensionamento de torres de telecomunicações e estabelece directrizes detalhadas para o projecto e cálculo dessas estruturas. Ela considera as cargas de vento, entre outras cargas, e é fundamental para garantir a segurança e a estabilidade dessas torres.

b) NBR 5422-1985 – Projecto de Construção de Linhas de Transmissão em Corrente Alternada

A Norma NBR 5422-1985 fornece directrizes específicas para o projecto e a construção de linhas de transmissão de energia eléctrica em corrente alternada (CA) no Brasil. Esta norma é estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e é fundamental para garantir a segurança, confiabilidade e eficiência das linhas de transmissão de energia.

2.3.2.2 Normas Europeias

Na Europa, o dimensionamento de torres em relação ao comportamento em caso de ciclones e ventos fortes é regulamentado principalmente por normas técnicas e regulamentos específicos. As normas e códigos a serem considerados incluem:

EN 1993-1-1(2005) – Eurocódigo 3: Dimensionamento de estruturas de aço

O Eurocódigo 3 é uma norma europeia que fornece directrizes para o projecto de estruturas de aço. Ele aborda questões de resistência, estabilidade, durabilidade e segurança, oferecendo métodos de cálculo e recomendações para a execução e verificação das estruturas. O objectivo é assegurar que as construções em aço sejam seguras e eficientes, promovendo a harmonização das práticas de engenharia em toda a Europa.

2.3.2.3 Normas Internacionais

Norma IEC 60826- Design Criteria of Overhead Transmission Lines

Ela é desenvolvida pela International Electrotechnical Commission (IEC) e fornece directrizes abrangentes para garantir a segurança, confiabilidade e eficiência das linhas de transmissão de energia eléctrica.

2.3.2.4 Normas Norte Americanas

A American Society of Civil Engineers (ASCE) é conhecida por suas normas relacionadas à engenharia civil e estrutural. Aqui estão algumas normas da ASCE que podem ser relevantes para o dimensionamento de torres em relação ao comportamento em caso de ciclones:

a) ASCE 10 - Design of Latticed Steel Transmission Structures:

Esta norma aborda especificamente o projecto de estruturas de aço em treliça, como torres de transmissão eléctrica. Embora seja mais específica para esse tipo de estrutura, alguns princípios de projecto e análise podem ser aplicados a outras torres, incluindo aquelas relacionadas a telecomunicações.

b) ASCE/SEI 48 - Design of Steel Transmission Pole Structures:

Esta norma se concentra no projecto de postes de aço para transmissão, mas muitos dos princípios de engenharia e abordagens para lidar com cargas de vento podem ser relevantes para torres.

c) ASCE Manual 52 - Guide for Design of Steel Transmission Towers

É um recurso da American Society of Civil Engineers (ASCE) que fornece orientações detalhadas para o projecto de torres de transmissão eléctrica, que são estruturas de aço usadas para suportar linhas de transmissão de energia. Embora a norma não trate especificamente de ciclones, ela pode ser útil para o dimensionamento de torres em relação ao comportamento em caso de ciclones e é o documento que foi usado para o Dimensionamento da Torre do Projecto.

d) ASCE Manual 74 – Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading

Estabelece critérios para o cálculo de carregamentos estruturais em linhas de transmissão eléctrica. Ele aborda factores como cargas climáticas (vento, gelo e

temperatura), cargas permanentes e contingenciais, fornecendo métodos para análise e projecto de estruturas de torres e suportes. O guia também detalha procedimentos para avaliar o desempenho estrutural frente à condições extremas e fornecer segurança, confiabilidade e eficiência no projecto e manutenção de linhas de transmissão eléctrica.

2.3.3 Normas usadas no Presente Trabalho

Tendo apresentado as diferentes Normas existentes para a análise e dimensionamento de estruturas Metálicas, foram escolhidas quatro (4), por serem de fácil acesso e por serem comumente adoptados em diversas partes do mundo, nomeadamente:

- *IEC (International Electrotechnical Commission) 60826-2017;*
- *NBR 5422-1985 Projecto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia;*
- *ASCE 74 Guidelines for Electrical Line Structural Loading*
- *EN 1993-1-1(2005)– Eurocódigo 3: Dimensionamento de estruturas de aço*

Destes quatro documentos ou normas, três (3) serão usadas para o cálculo dos esforços aos quais a estrutura está sujeita e o Eurocódigo 3 será usado apenas para a componente de verificação da Segurança aos estados limites.

2.4 QUANTIFICAÇÃO DAS ACÇÕES

Neste estudo, o foco está na análise do comportamento das torres de alta tensão sob a influência de ciclones, fenómenos naturais caracterizados por ventos extremamente fortes. E do peso próprio da torre, que inclui o peso da estrutura, dos isoladores e dos cabos conductores, que representa uma carga constante e bem definida que a estrutura deve suportar ao longo de sua vida útil.

A seguir serão apresentadas algumas acções, como o peso dos cabos e da própria Estrutura, bem como as hipóteses de carregamentos propostos por LABEGALINI et al.,1992. E na sequência, serão apresentadas as particularidades da Norma NBR5422-1985, ASCE 74 e da própria Norma IEC 60826(2017) para a quantificação da acção do vento na estrutura e nos cabos.

2.4.1 Peso próprio

2.4.1.1 Estructura de suporte

Antigamente, este carregamento era obtido com a subdivisão da estrutura em painéis (GONTIJO, 1994). O peso de cada painel (P_p) deve ser calculado e este valor multiplicado por um coeficiente de ponderação (K_g), conforme a Equação 1. Com o advento das ferramentas computacionais, este procedimento foi automatizado nos programas de análise pelo método dos elementos finitos, sendo apenas necessário informar ao programa as propriedades geométricas e materiais dos elementos que compõem o modelo estrutural produzido.

$$P_g = K_g P_p \quad (1)$$

Gontijo (1994) recomenda adoptar K_g igual a 1,10 para as hipóteses de cargas verticais máximas ou com vão gravante máximo, e igual a 1,00 para as hipóteses de cargas verticais mínimas ou com vão gravante mínimo.

2.4.1.2 Cabos e acessórios

São devidos ao peso dos cabos, isoladores e equipamentos de fixação (GONTIJO, 1994), conforme a Equação 2.

$$P_g = (P_c N_{cf} V_g + P_{cf}) K_v \quad (2)$$

Sendo, P_c : Peso do cabo conductor ou pára-raios por unidade de comprimento;

N_{cf} : Número de cabos por fase;

V_g : Vão de gravante ou vão de peso da estrutura;

P_{cf} : Peso das cadeias de isoladores e ferragens de fixação dos cabos; (sendo que, um valor de 200 kg é indicado para o peso dos isoladores)

K_v : Coeficiente de ponderação para as cargas verticais.

2.4.2 Forças devidas ao vento na estrutura

Na prática de projecto, a obtenção das forças devidas à acção do vento envolve a simplificação de sua actuação por meio da aplicação de forças estaticamente equivalentes em superfícies de edifícios e estruturas. Diversas são as metodologias de cálculo das forças e, de modo geral, se baseiam na Equação 3, em que a força em um

elemento ou edificação é função de dois parâmetros, sendo um, meteorológico (q), e outro aerodinâmico (C).

$$\frac{F}{A} = qC \quad (3)$$

Onde, F : Força resultante sobre um elemento ou edificação;

A : Área;

q : Pressão dinâmica;

C : Coeficiente de ponderação para as cargas longitudinais.

O parâmetro meteorológico é caracterizado como a pressão dinâmica exercida pelo vento sobre elementos estruturais e edificações. As linhas de corrente, devido ao escoamento do vento, formam turbilhões, que, ao se encontrarem com uma determinada forma arquitectónica, moldam-se à sua forma geométrica, e geram campos de pressões no entorno desta. Os campos de pressões podem ser obtidos através da Equação 4, de Bernoulli.

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (4)$$

2.4.3 Força devido ao vento nos cabos

Em vãos contínuos e nivelados, a força resultante horizontal, F_v , transmitida à estrutura é calculada conforme a Equação 5.

$$F_v = \frac{a_i + a_j}{2} f_v \rightarrow F_v = a_m f_v \quad (5)$$

Sendo, a_i, a_j : Vãos adjacentes a uma estrutura intermediária

a_m : Vão de vento.

2.4.3.1 Comportamento de cabos

Um cabo suspenso entre dois pontos e sujeito ao peso próprio assume a forma de uma catenária. Se o cabo se apresentar desnivelado, a forma da catenária é descrita pela Equação 6. A catenária de um cabo pode ser caracterizada por um factor de forma, definido como a razão entre a tracção horizontal e uma força distribuída por unidade de comprimento (Equação 7). A distância horizontal, x_0 , de um vértice extremo da catenária ao ponto de tangência horizontal pode ser calculada conforme a Equação 8:

$$y(x) = C_1 \left[\cosh \frac{x - x_0}{C_1} - \cosh \frac{x_0}{C_1} \right] \quad (6)$$

$$C_1 = \frac{T_0}{p_c} \quad (7)$$

$$x_0 = \frac{A}{2} - C_1 \sinh^{-1} \left\{ \frac{B}{2C_1 \left[\operatorname{sech} \left(\frac{A}{2C_1} \right) \right]} \right\} \quad (8)$$

Sendo, p_c : Peso do cabo por unidade de comprimento;

T_0 : Componente horizontal da tracção actuante no cabo.

Considerando a pressão dinâmica do vento, q , actuando perpendicularmente à direcção de um cabo, a força estaticamente equivalente, distribuída pelo comprimento do cabo, é dada pela Equação 9.

$$F_v = qd \quad (9)$$

Onde, d : Diâmetro do cabo.

O efeito do peso dos cabos actuando verticalmente e simultaneamente à acção do vento, fará com que a catenária fique, na realidade, em um plano inclinado em um determinado ângulo em relação ao plano vertical que passa pelos suportes.

Sob acção simultânea do peso próprio, p_c , e acção do vento, F_v , o cabo sofre um aumento virtual em seu peso que passa a actuar no plano da catenária deslocada. O novo valor pode ser calculado pela Equação 10.

$$p_r = \sqrt{p_c^2 + F_v^2} \quad (10)$$

Uma consequência importante do aumento virtual no peso é o aumento na tracção do cabo, T_0 , e o aparecimento de uma força horizontal e transversal que contribui para um aumento de F_v , que a estrutura deve absorver nos pontos de suspensão.

Por meio da Equação 11 de mudança de estado, a variação de tracção no cabo pode ser calculada tendo-se em conta a influência da temperatura e o peso virtual. Uma vez conhecidos os parâmetros em um estado inicial, como temperatura, peso e tracção (t_1 ,

p_1 e T_{01}), a Equação 11 possibilita a obtenção das propriedades mecânicas resultantes decorrentes da variação de um dos parâmetros (t_2 , p_2 e T_{01}).

$$T_{02}^3 + T_{02}^2 \left[\frac{ESp_{r1}^2 A_r^2}{24T_{01}^2} + ES\alpha(t_2 - t_1) - T_{01} \right] = \frac{ESp_{r2}^2 A_r^2}{24} \quad (11)$$

Sendo, L_1 : Comprimento no estado 1; (m)
 L_2 : Comprimento no estado 2; (m)
 t_1 : Temperatura no estado 1; (°C)
 t_2 : Temperatura no estado 2; (°C)
 p_{r1} : Peso do cabo no estado 1; (kgf/m)
 p_{r2} : Peso do cabo no estado 2; (kgf/m)
 T_{01} : Tracção no estado 1 (kgf)
 T_{02} : Tracção no estado 2; (kgf)
 α : Coeficiente de dilatação térmica do cabo; (1/°C)
 E : Módulo de elasticidade longitudinal do cabo; (kgf/mm²)
 S : Área da secção transversal do cabo; (mm²)
 A_r : Vão regulador. (m)

O vão regulador é um vão fictício obtido para uma determinada secção de tensionamento de uma LT é calculado pela Equação 12 ou pela média dos vãos.

$$A_r = \sqrt{\frac{\sum_i^n a_i^3}{\sum_i^n a_i}} \quad (12)$$

Sendo, a_i : i-ésimo vão de uma secção de tensionamento com n vãos. (m)

2.4.3.2 Rompimento do cabo devido a acção do Vento

Segundo os autores Labegalini et al. (1992) e Gontijo (1994), a força longitudinal devida ao rompimento de cabos pode ser calculada pela Equação 13.

$$T_0 = ZT_{EDS}K_l \quad (13)$$

Sendo, Z : Coeficiente de carregamento residual estático;

T_{EDS} : Força de tracção EDS;

K_i : Coeficiente de ponderação para as cargas longitudinais (1).

O coeficiente Z representa a redução de tracção no cabo devido ao deslocamento da cadeia de suspensão na direcção do cabo intacto. Labegalini et al. (1992) recomenda o valor de 0,7, no caso de rompimento do cabo conductor em torres de suspensão, ou 1,0 nos casos de rompimento do cabo pára-raios e do cabo conductor em torres de ancoragem.

2.5 HIPÓTESES DE CARREGAMENTO

Labegalini et al. (1992) e Gontijo (1994) indicam as recomendações de hipóteses mínimas que normalmente devem ser adoptadas em projectos de estruturas de LT's. O primeiro autor apresenta as seguintes hipóteses básicas:

Hipótese 1 – Cabos intactos com actuação do vento máximo:

1. Peso próprio;
2. Todos os cabos intactos;
3. Alinhamento recto ou ângulo de desvio de até 3°;
4. Actuação do vento máximo.

Hipótese 2 – Cabo pára-raios rompido com actuação do vento reduzido:

1. Peso próprio;
2. Um cabo pára-raios rompido, Equação 13;
3. Alinhamento recto ou ângulo de desvio de até 3°;
4. Actuação do vento reduzido.

Hipótese 3 – Cabo conductor rompido com actuação do vento reduzido

1. Peso próprio;
2. Um cabo conductor rompido em qualquer posição, Equação 13;
3. Alinhamento recto ou ângulo de desvio de até 3°;
4. Actuação do vento reduzido.

Nas hipóteses envolvendo o rompimento de cabo de uma torre projectada para suportar dois cabos pára-raios, o autor exemplifica que haverá duas hipóteses: uma para o rompimento do cabo da esquerda e outra para o rompimento do cabo da direita. E, no caso dos conductores, essa condição produzirá um número de hipóteses igual ao

número de conductores. Nos casos de torres de circuito duplo, o autor recomenda que as hipóteses anteriores sejam verificadas considerando a condição de um único circuito montado.

Em geral, deve-se, também, levar em conta a possibilidade de existência de cargas verticais máximas e mínimas, pois normalmente o cálculo é desenvolvido para uma família de estruturas de torres, e para garantia da segurança do conjunto, verificam-se as situações de vão gravante máximo e mínimo. Define-se vão gravante máximo como “a maior distância observada entre os pontos de tangência horizontal das duas catenárias adjacentes a uma determinada torre” (GONTIJO, 1994), e, vão gravante mínimo, “a menor distância observada para a situação análoga à anterior” (GONTIJO, 1994), a Figura 11 ilustra a definição de vão gravante.

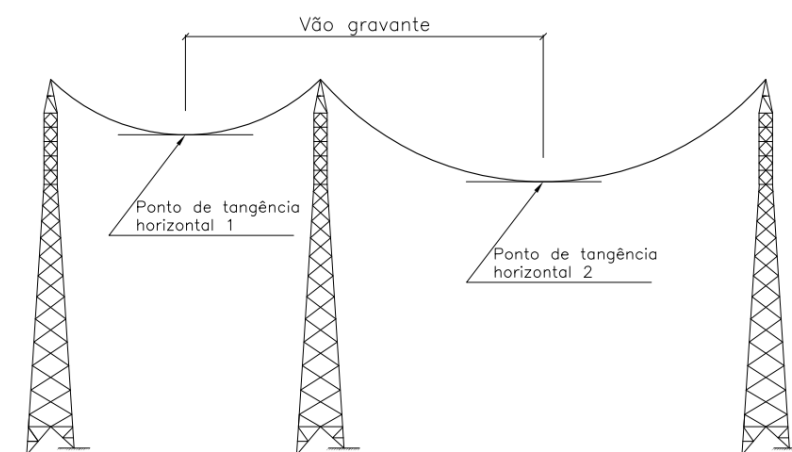


Figura 11 Vão gravante em sistemas de LT's.

Nos subcapítulos que se seguem, serão apresentados os critérios de Projectos de estruturas de Torres para 3 Documentos diferentes, sendo duas normas e uma Guia para Torres de Transmissão de Energia.

2.6 CRITÉRIOS DE PROJECTO DE ACORDO COM O GUIA ASCE-74

2.6.1 Aspectos Gerais

O guia prático ASCE 74 é um manual que fornece informações relevantes e relacionadas ao carregamento estrutural de linhas de transmissão. Não é um manual passo-a-passo ou um código para implementação directa por uma concessionária. É um recurso de fácil uso na política de definição de carregamento. Muitas das informações contidas neste documento podem ser simplificadas para uso de uma concessionária

específica, uma vez determinados os dados climáticos regionais ou locais e os níveis relativos de confiabilidade. (Fonte: ASCE 74)

2.6.2 Acções de vento conforme a ASCE-74

2.6.2.1 Altura média efectiva dos Cabos

A altura efectiva de um conductor e fio terra sujeito ao vento e ao vento mais gelo é influenciada pela oscilação do fio e dos isoladores. No entanto, para fins de projecto estrutural, as alturas efectivas de todos os fios podem ser aproximadas como a altura média acima do solo de todos os pontos de fixação dos fios à estrutura.

O coeficiente de pressão de velocidade varia ao longo da altura da estrutura. As estruturas devem ser divididas em secções, e a altura efectiva, Z_h , é a altura até o centro de cada secção. Para algumas estruturas, uma segunda alternativa ou mais simples para alturas de estrutura de 200 pés (60 m) ou menos é assumir uma secção e usar dois terços da altura total da estrutura para a altura efectiva. Esta alternativa proporcionará uma pressão uniforme do vento na estrutura.

Tabela 1 Valores do expoente α e do valor Z_g (Fonte: ASCE 74)

Exposure Category	α	z_g (ft)
B	7.0	1,200
C	9.5	900
D	11.5	700

Tabela 2 Coeficiente de Exposição de Pressão da Velocidade (K_z)

Effective Height z_h (ft) ^a	Exposure B	Exposure C	Exposure D
0-33	0.72	1.00	1.18
40	0.76	1.04	1.22
50	0.81	1.09	1.27
60	0.85	1.13	1.31
70	0.89	1.17	1.34
80	0.93	1.21	1.38
90	0.96	1.24	1.40
100	0.99	1.26	1.43
120	1.04	1.31	1.48
140	1.09	1.36	1.52
160	1.13	1.39	1.55
180	1.17	1.43	1.58
200	1.20	1.46	1.61

2.6.2.2 Factores de Resposta à Rajada

O factor de resposta às rajadas é responsável pelos efeitos dinâmicos e pela falta de correlação das rajadas na resposta ao vento dos componentes da LT. Foi reconhecido que as rajadas geralmente não envolvem todo o vão entre as estruturas de transmissão e que alguma redução que reflecta a extensão espacial das rajadas deve ser incluída no cálculo da carga do vento. O factor de resposta à rajada, é a razão entre o efeito da carga de pico na estrutura ou nos cabos e o efeito da carga média correspondente à velocidade do vento de projecto.

Portanto, o factor de resposta à rajada é um multiplicador da carga do vento de projecto para obter o efeito da carga de pico.

$$G_w = \frac{1 + 2.7E\sqrt{B_w}}{K_v^2} \quad (14)$$

$$G_t = \frac{1 + 2.7E\sqrt{B_t}}{K_v^2} \quad (15)$$

Onde:

$$E = 4.9\sqrt{k} \left(\frac{33}{z_h} \right)^{\frac{1}{\alpha_{FM}}} \quad (16)$$

$$B_w = \frac{1}{1 + \frac{0.8S}{L_s}} \quad (17)$$

$$B_t = \frac{1}{1 + \frac{0.56z_h}{L_s}} \quad (18)$$

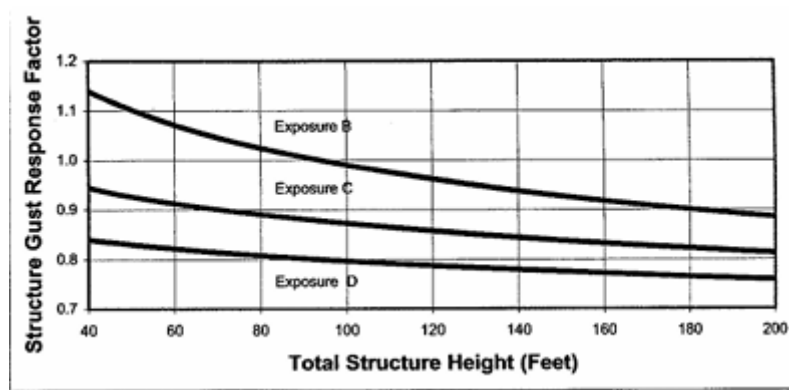


Figura 12 Factor de Resposta à Rajada para a Estrutura da Torre (Fonte: ASCE 74, Página 31)

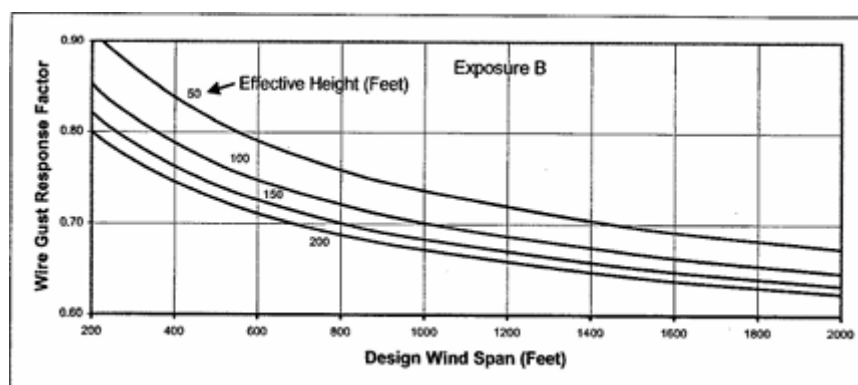


Figura 13 Factor de Resposta à Rajada para os cabos (Fonte: ASCE 74, Página 31)

Onde:

Z_h - Altura efectiva dos cabos para o cálculo de G_w e para o caso das estruturas de Torre, o valor é dado como $2/3$ da altura da Torre;

S - Vão existente entre Torres;

K_v - 1.43 e o valor para uma rajada com duração de 3 segundos para os 10 minutos padrão;

G_T e G_C - Factor de Resposta à Rajada para a Torre e cabos respectivamente;

B_t - Termo de resposta adimensional correspondente à carga de vento de fundo quase estática sobre a estrutura;

B_w - Termo de resposta adimensional correspondente à carga de vento de fundo quase estática no fio (conductor ou fio terra);

E - Factor de exposição avaliado na altura efectiva do fio ou da estrutura.

2.6.2.3 Força do Vento

$$F = \gamma_w \cdot Q \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot (v_{50})^2 \cdot G \cdot C_t \quad (19)$$

$$F = Q \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot (v_{RP})^2 \cdot G \cdot C_t \quad (20)$$

Onde:

F - Força do vento (lbs)

γ_M - Factor de carga, que pode ser visto nas tabelas, de acordo com o Período de Retorno especificado

V_{50} - Velocidade de Base para um período de Retorno de 50 anos em mph, para um período de 3 segundos de Rajada de vento, obtida a partir da figura

K_V - Coeficiente de Exposição da Pressão da Velocidade, que adapta a velocidade do vento em diferentes alturas acima da altura do solo e para diferentes categorias de exposição

V_{RP} - Velocidade para um período de retorno a definir

K_Z - Factor Topográfico obtido a partir da fórmula

Q - Valor constante, 0,613

G - Factor de Resposta a Rajada para conductores, Fio-Terra e Estructura da Torre

2.6.2.4 Coeficiente de exposição de Pressão de velocidade

$$K_z = 2,01 \cdot \left(\frac{Z_h}{Z_g}\right)^{\frac{2}{\alpha}} \text{ para } 33 \leq Z_h \leq Z_g \quad (21)$$

Onde: K_z - Coeficiente de Pressão da Velocidade

Z_h - Altura efectiva

Z_g - Gradiente de altura

2.6.2.5 Coeficiente Topográfico

$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3) \quad (22)$$

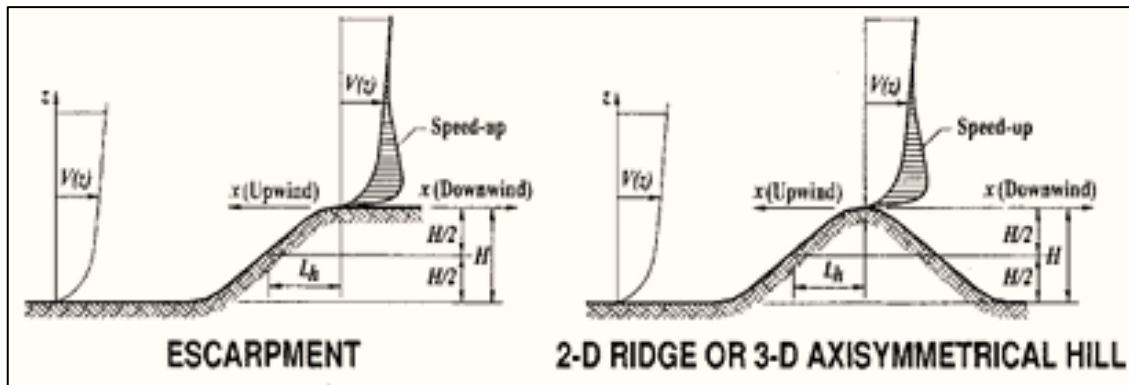


Figura 14 Representação dos valores a considerar na determinação do coeficiente Topográfico K_{zt} (Fonte:ASCE-74)

Tabela 3 Valores de K_1 K_2 e K_3 (Fonte: ASCE-74)

Topographic Multipliers for Exposure C											
H/L_h	K_1 Multiplier			x/L_h	K_2 Multiplier			z/L_h	K_3 Multiplier		
	2-D Ridge	2-D Escarp.	3-D Axisym. Hill		2-D Escarp.	All Other Cases	2-D Ridge		2-D Escarp.	3-D Axisym. Hill	
0.20	0.29	0.17	0.21	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	
0.25	0.36	0.21	0.26	0.50	0.88	0.67	0.10	0.74	0.78	0.67	
0.30	0.43	0.26	0.32	1.00	0.75	0.33	0.20	0.55	0.61	0.45	
0.35	0.51	0.30	0.37	1.50	0.63	0.00	0.30	0.41	0.47	0.30	
0.40	0.58	0.34	0.42	2.00	0.50	0.00	0.40	0.30	0.37	0.20	
0.45	0.65	0.38	0.47	2.50	0.38	0.00	0.50	0.22	0.29	0.14	
0.50	0.72	0.43	0.53	3.00	0.25	0.00	0.60	0.17	0.22	0.09	
				3.50	0.13	0.00	0.70	0.12	0.17	0.06	
				4.00	0.00	0.00	0.80	0.09	0.14	0.04	
							0.90	0.07	0.11	0.03	
							1.00	0.05	0.08	0.02	
							1.50	0.01	0.02	0.00	
							2.00	0.00	0.00	0.00	

Tabela 4 Tabela auxiliar para determinar o valor de K_{zt}

Parameters for Speed-Up Over Hills and Escarpments						
Hill Shape	$K_1/(H/L_h)$			γ	μ	
	Exposure				Upwind of Crest	Downwind of Crest
	B	C	D			
2-dimensional ridges (or valleys with negative H in $K_1/(H/L_h)$)	1.30	1.45	1.55	3	1.5	1.5
2-dimensional escarpments	0.75	0.85	0.95	2.5	1.5	4
3-dimensional axisym. hill	0.95	1.05	1.15	4	1.5	1.5

$$K_2 = \left(1 - \frac{|x|}{\mu L_h} \right) \quad (23)$$

$$K_3 = e^{-\gamma z/L_h} \quad (24)$$

Onde: K_{zt} - Coeficiente Topográfico

K_1 - Factor a ser considerado para o formato da Topografia Local e o efeito máximo da aceleração

K_2 - Factor a ser considerado para a redução da velocidade de subida com a distância de subida a sotavento ou barlavento

K_3 - Factor a ser considerado para redução na aceleração acima da serra local

μ - Factor de alternância Horizontal

γ - Factor de atenuação da altura

z - Altura acima do nível do solo

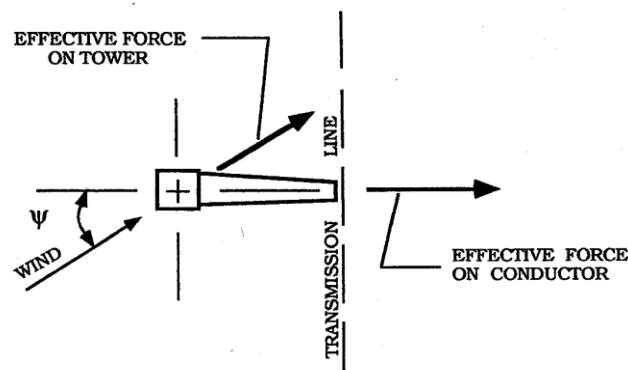


Figura 15 Demonstração do ângulo de incidência do vento na Torre

$$\Phi = \frac{A_m}{A_o} \quad (25)$$

Onde: Φ - Índice de cheios

A_m - Área efectiva dos membros no painel

A_o - Área que contorna todos os membros do painel

Tabela 5 Coeficientes de Força, C_f , para Vento Normal em Treliças

Solidity Ratio, Φ	Force Coefficient, C_f^a	
	Square-Section Structures	Triangular-Section Structures
<0.025	4.0	3.6
0.025–0.44	4.1 – 5.2 Φ	3.7 – 4.5 Φ
0.45–0.69	1.8	1.7
0.70–1.00	1.3 + 0.7 Φ	1.0 + Φ

2.6.2.6 Estructuras Treliçadas com vento incidindo em diferentes direcções

Para vento actuando em diferentes direcções, o método a seguir pode ser usado para determinar a carga de vento em uma torre treliçada. O método consiste em determinar as cargas nas direcções transversal e longitudinal da torre de forma independente, aplicando as seguintes equações:

a) *Força tendo em conta o ângulo de incidência do vento nos cabos*

$$F = \gamma_w \cdot Q \cdot K_Z \cdot K_{Zt} \cdot v^2 \cdot G_w \cdot \cos^2 \Psi \cdot C_f \cdot A \quad (26)$$

b) *Força tendo em conta o ângulo de incidência do vento na estrutura da Torre*

$$F_t = \gamma_w \cdot Q \cdot K_Z \cdot K_{Zt} \cdot v^2 \cdot G_t \cdot \cos \Psi \cdot C_{ft} \cdot A_{mt} \quad (27)$$

$$F_l = \gamma_w \cdot Q \cdot K_Z \cdot K_{Zt} \cdot v^2 \cdot G_t \cdot \sin \Psi \cdot C_{fl} \cdot A_{ml} \quad (28)$$

Onde: $F_{t,l}$ - Força Longitudinal e Transversal devido à acção do vento na estrutura

Ψ - Ângulo de incidência

A_{mt} - Área efectiva dos membros na direcção Transversal

A_{ml} - Área efectiva dos membros na direcção longitudinal

C_{fl} - Coeficiente de Forças na direcção longitudinal

C_{ft} - Coeficiente de Forças na direcção Transversal

c) *Carregamentos nos pontos de fixação de dos cabos nas torres*

$$L_V = \frac{\text{Peso}}{\text{comprimento}} \cdot \text{vão} + \text{peso dos acessórios do cabo} \quad (29)$$

$$L_T = \text{Força do vento} \cdot \text{vão} \quad (30)$$

Onde:

L_T - Esforço na direcção Transversal à Linha

L_V - Esforço Vertical

2.7 CRITÉRIOS DE PROJECTO CONFORME A IEC 60826:2017

2.7.1 Aspectos gerais

As LT's podem ser projectadas para diferentes níveis de confiabilidade (ou classes), dependendo dos requisitos locais e das funções desempenhadas pela linha dentro de uma rede de suprimentos. Os projectistas podem escolher seus níveis de confiabilidade por calibração de linhas existentes que tiveram um longo histórico de desempenho satisfatório ou por métodos de optimização encontrados na literatura técnica. De acordo com o nível de confiabilidade estipulado para a LT, os parâmetros meteorológicos são calculados utilizando a teoria de valores extremos. Para modelagem dos valores extremos, a norma IEC indica preferência pela distribuição acumulativa de Gumbel. Três níveis de confiabilidades são propostos pela IEC 60826 (2017):

Tabela 6 Níveis de confiabilidade para linhas de transmissão.

Nível de Confiabilidade	1	2	3
T (anos), período de retorno da variável meteorológica	50	150	500

Fonte: IEC 60826 (2017)

Para linhas com tensão igual ou maior que 230 kV, a norma sugere o nível 2 ou superior de confiabilidade. O mesmo é sugerido para linhas abaixo de 230 kV, quando constituírem a principal ou a única fonte de suprimento para uma determinada demanda. Para LT's com tensão superior a 230 kV, que constituam a principal ou a única fonte de suprimento, sugere-se um nível de confiabilidade com período de retorno de 500 anos. Nesse caso, considera-se que uma falha ocasionaria graves consequências para a transmissão de energia. A aplicação dos conceitos de confiabilidade para LT pode ser estabelecida de forma diferenciada, considerando as particularidades da localidade de implantação, a rede de distribuição e as consequências oriundas da falha da linha.

2.7.2 Acções de vento conforme a IEC 60826 (2017)

A IEC 60826 (2017) define uma equação geral de cálculo das forças devidas ao vento apresentada na Equação 31.

$$A = q_0 C_x G \quad (31)$$

Sendo, q_0 : Pressão dinâmica de referência do vento; (Pa ou N/m²)

C_X : Coeficiente de arrasto, função das propriedades geométricas do elemento considerado;

G : Factor combinado do vento, que leva em consideração as influências da altura do elemento em relação ao solo, categoria do terreno, efeito de rajada do vento e resposta dinâmica. No caso dos conductores esse factor é dividido em G_L e G_C ;

A pressão dinâmica de referência do vento é definida conforme a Equação 32.

$$q_0 = \frac{1}{2} \tau \mu (K_R V_{RB})^2 \quad (32)$$

$$\tau = \frac{288}{T + 273} e^{-1,2 \cdot 10^{-4} Alt} \quad (33)$$

Sendo, μ : Massa específica do ar igual a 1,225 kg/m³ a temperatura de 15°C e pressão atmosférica de 101,3 kPa ao nível do mar;

τ : Factor de correcção da massa específica do ar;

K_R : Factor de rugosidade do terreno;

V_{RB} : Velocidade de referência do vento para categoria de terreno B, determinado para um intervalo de integração de 10 minutos, a 10 metros acima do terreno, com um período de retorno de T anos;
(m/s)

T : Temperatura do ar; (°C)

Alt : Altitude. (m)

A norma recomenda verificar a existência de correlação entre velocidade do vento e a altitude e/ou temperatura no local considerado. Inicialmente, pressupõe como referência uma temperatura de 15° C e altitude ao nível do mar. Para situações diferentes dessas, deve-se considerar o factor de correcção T, indicado pela Equação 33, que correlaciona a massa específica com a altitude e temperatura no cálculo da pressão dinâmica do vento q_0 . Caso contrário, o factor é adoptado igual a 1.

A IEC 60826 (2017) define quatro categorias de terreno, de crescente rugosidade, como indicado na Tabela 7. Neste mesmo quadro, é apresentado o factor de rugosidade K_R ,

que representa um multiplicador da velocidade do vento de referência para conversão da velocidade de uma categoria de terreno para outra.

Tabela 7 Classificação das categorias de terrenos

Categoria do terreno	Classe de rugosidade	K_R
A	Grande extensões de água, área costeira plana	1,08
B	Campos abertos com pequenos obstáculos, por exemplo aeroportos, áreas cultivadas com pequenas árvores	1,00
C	Terreno com baixo número de obstáculos de pequena altura	0,85
D	Área suburbana ou áreas com muitas árvores altas	0,67

Fonte: IEC 60826 (2017)

As forças de vento sobre os cabos, aplicadas perpendicularmente ao cabo no seu ponto de fixação em cada suporte, são dadas pela Equação 34.

$$A_c = q_0 C_{XC} G_C G_L d L \sin^2 \Omega \quad (34)$$

Sendo, C_{XC} : Coeficiente de arrasto de cabos;

G_C : Factor combinado do vento para cabos;

G_L : Factor correlacionado ao vão;

d : Diâmetro do conductor; (m)

L : Comprimento efectivo do vão adoptado para a estrutura suporte; (m)

Ω : Ângulo formado entre a direcção de incidência do vento e do comprimento do conductor. (°)

O factor G_C é determinado conforme as características do terreno e a altura, z , considerada acima do solo, conforme as Equações (35) – (38). A altura considerada deve ser tomada como aquela correspondente ao centro de gravidade dos conductores suspensos e teoricamente localizados no terço inferior da catenária.

Terreno Categoria A $G_C = 0,2914 \ln z + 1,0468 \quad (35)$

Terreno Categoria B $G_c = 0,3733lnz + 0,9762$ (36)

Terreno Categoria C $G_c = 0,4936lnz + 0,9124$ (37)

Terreno Categoria D $G_c = 0,6153lnz + 0,8144$ (38)

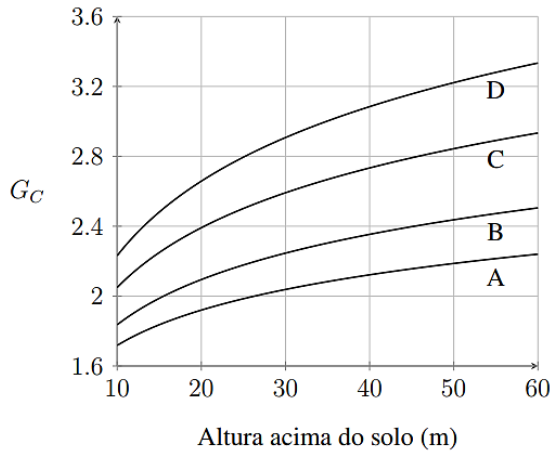


Figura 16 Factor combinado do vento G_c para conductores em várias categorias de terreno e altura sobre o solo.

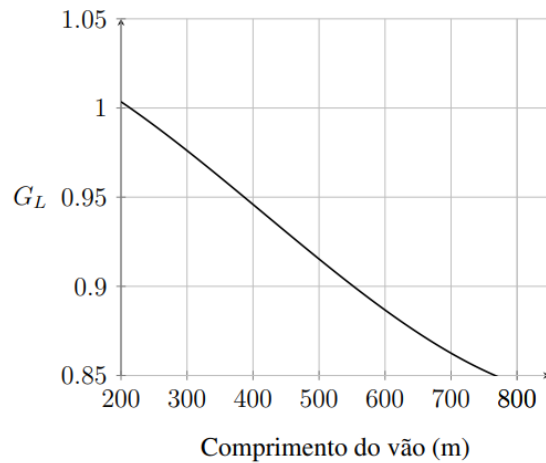


Figura 17 Factor do vão G_L .

O factor G_L é determinado em função do comprimento do vão de vento considerado, conforme a Equação 39.

$$G_L = 4 \cdot 10^{-10}L^3 - 5 \cdot 10^{-7}L^2 - 10^{-4}L + 1,0403 \quad \text{Se } L < 200 \text{ m, } G_L = 1$$
 (39)

A força devida ao vento actuante directamente sobre os isoladores pode ser calculada pela Equação 40.

$$A_i = q_0 C_{xi} G_t S_i$$
 (40)

Sendo, C_{xi} : Coeficiente de arrasto dos isoladores;

G_t : Factor combinado do vento para isoladores,

S_i : Área do isolador projectado no plano vertical paralelo ao eixo do isolador.

A norma toma o valor do coeficiente C_{xi} igual a 1,20.

O factor G_t é determinado em função da categoria de rugosidade do terreno e da altura do centro de gravidade do isolador em relação ao nível do solo, conforme as Equações (41) – (44).

$$\text{Terreno Categoria A} \quad G_t = -0,0002z^2 + 0,0232z + 1,4661 \quad (41)$$

$$\text{Terreno Categoria B} \quad G_t = -0,0002z^2 + 0,0274z + 1,6820 \quad (42)$$

$$\text{Terreno Categoria C} \quad G_t = -0,0002z^2 + 0,0298z + 2,2744 \quad (43)$$

$$\text{Terreno Categoria D} \quad G_t = -0,0002z^2 + 0,0384z + 2,9284 \quad (44)$$

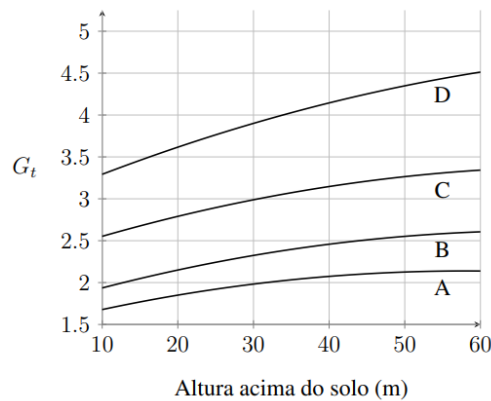


Figura 18 Factor G_t aplicável às estruturas de suportes e isoladores

A força devida ao vento, aplicada no centro de gravidade de um painel, composto por diversos elementos estruturais, pode ser calculada conforme a Equação 45.

$$A_t = q_0[(1 + 0,2\sin^2 2\theta)((S_{t1}C_{xt1}\cos^2\theta) + S_{t2}C_{xt2}\sin^2\theta)]G_t \quad (45)$$

Sendo, θ : Ângulo de incidência da direcção do vento com a direcção perpendicular da face 1 do painel no plano horizontal; (°)

S_{t1} : Área total da superfície projectada normalmente a face 1 do painel da torre; (m²)

S_{t2} : Área total da superfície projectada normalmente na face 2, correspondente aos elementos estruturais da mesma face da torre;
(m^2)

C_{xt1} , C_{xt2} : Coeficientes de arrasto correspondentes às faces 1 e 2, respectivamente, para o vento incidindo perpendicularmente.

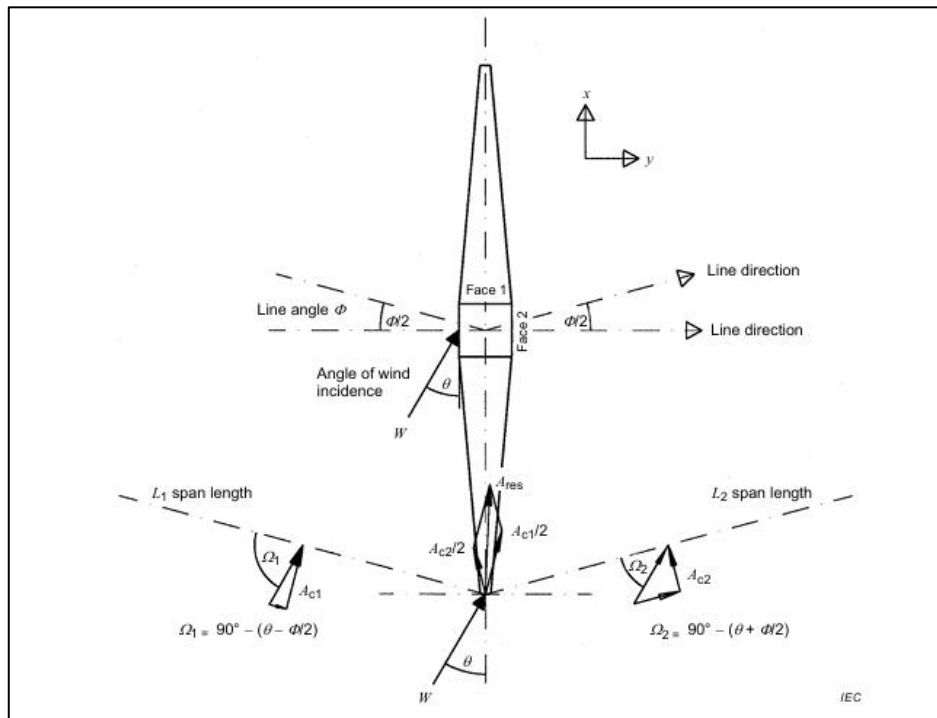


Figura 19 Definição do ângulo de incidência do vento (Fonte: IEC 60826:2017)

No caso de torres reticuladas compostas por cantoneiras, os coeficientes de arrasto C_{xt1} e C_{xt2} são obtidos conforme a Equação 46.

$$C_{xt1,2} = 4,1727\chi^2 - 6,1681\chi + 4,0088 \quad (46)$$

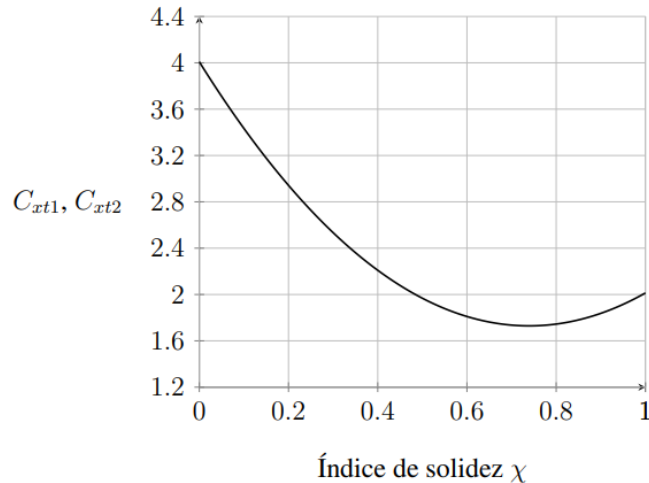


Figura 20 Coeficiente C_{xt} aplicável às torres reticuladas compostas por elementos com lados planos.

Na Equação 47, χ é o índice de área exposta, definido como a relação entre a soma da área dos elementos estruturais projectados no painel (S_{t1} ou S_{t2}) e área total do painel considerado, conforme a Equação 47.

$$\chi = \frac{A_{efectiva}}{A_{total}} \quad (47)$$

2.8 CRITÉRIOS DE PROJECTO CONFORME A NBR 5422-1985

A NBR 5422 (1985) define uma equação geral de cálculo das forças devidas ao vento apresentada na Equação 48.

$$A = q_0 C_x G \quad (48)$$

Sendo, q_0 : Pressão dinâmica de referência do vento; (Pa ou N/m^2)

C_x : Coeficiente de arrasto, função das propriedades geométricas do elemento considerado;

G : Factor combinado do vento, que leva em consideração as influências da altura do elemento em relação ao solo, categoria do terreno, efeito de rajada

do vento e resposta dinâmica. No caso dos conductores esse factor é dividido em G_L e G_C ;

A pressão dinâmica de referência do vento é definida conforme a Equação 49.

$$q_0 = \frac{1}{2} \rho v_p^2 \quad (49)$$

Sendo, ρ : Massa específica do ar igual a $1,225 \text{ kg/m}^3$ a temperatura de 15°C e pressão atmosférica de $101,3 \text{ kPa}$ ao nível do mar;

v_p : Velocidade do Projecto: ;

A NBR 5422-1985 define quatro categorias de terreno, de crescente rugosidade, como indicado na Tabela 9, é apresentado o factor de rugosidade n , que representa um multiplicador da velocidade do vento de referência para conversão da velocidade de uma categoria de terreno para outra.

Tabela 8 Classificação das categorias de terrenos

Categoria do terreno	Características do terreno	Coefficiente de rugosidade K_r
A	Vastas extensões de água; áreas planas costeiras; desertos planos	1,08
B	Terreno aberto com poucos obstáculos	1,00
C	Terreno com obstáculos numerosos e pequenos	0,85
D	Áreas urbanizadas; terrenos com muitas árvores altas	0,67

Tabela 9 Valores n de correcção da velocidade do vento em Função da Altura

Categoria do terreno	n	
	t = 2 seg	t = 30 seg
A	13	12
B	12	11
C	10	9,5
D	8,5	8

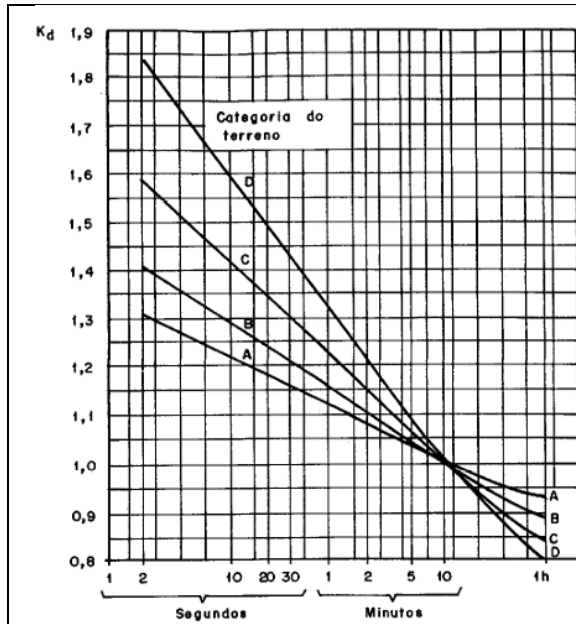


Figura 21 Valores de \$K_d\$ para a velocidade do vento a uma altura de 10 metros

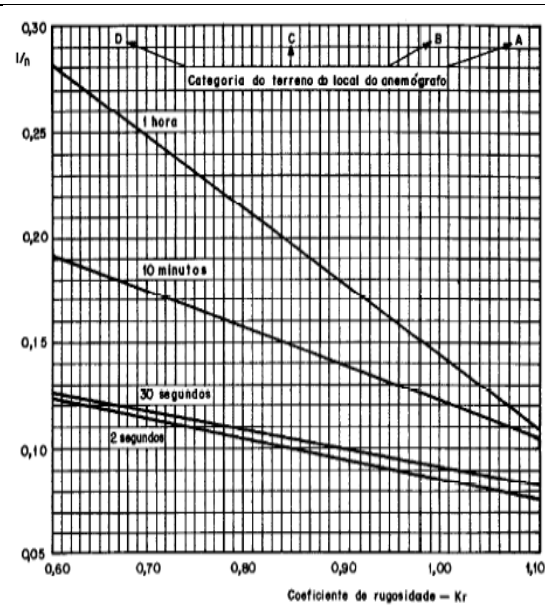


Figura 22 Coeficiente \$1/n\$ em Função do coeficiente de Rugosidade

$$v_p = K_r K_d \left(\frac{H}{10}\right)^{1/n} v_T \quad (50)$$

Onde, \$v_p\$: velocidade do Projecto

\$K_r\$: coeficiente de Rugosidade

\$K_d\$: coeficiente de integração

\$H\$: altura acima do solo

\$v_T\$: velocidade básica do projecto

As forças de vento sobre os cabos, aplicadas perpendicularmente ao cabo no seu ponto de fixação em cada suporte, são dadas pela Equação 51.

$$A_c = q_0 C_{XC} \alpha d \frac{z}{2} L \sin^2 \theta \quad (51)$$

Sendo, \$C_{XC}\$: Coeficiente de arrasto de cabos;

\$\alpha\$: Factor efectividade adimensional de acordo com a Figura 23 ;

\$z\$: comprimento do vão considerado em metros;

\$d\$: Diâmetro do conductor; (m)

L : Comprimento efectivo do vão adoptado para a estrutura suporte;

(m)

θ : Ângulo formado entre a direcção de incidência do vento e do comprimento do conductor. (°)

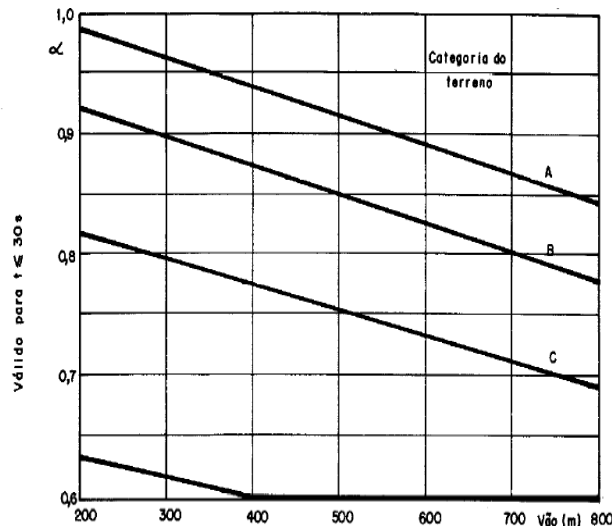


Figura 23 Factor de efectividade α

A força devida ao vento actuante directamente sobre os isoladores pode ser calculada pela Equação 52.

$$A_i = q_0 C_{xi} S_i \quad (52)$$

Sendo, C_{xi} : Coeficiente de arrasto dos isoladores;

S_i : Área do isolador projectado no plano vertical paralelo ao eixo do isolador.

A norma toma o valor do coeficiente C_{xi} igual a 1,20.

A força devida ao vento, aplicada no centro de gravidade de um painel, composto por diversos elementos estruturais, pode ser calculada conforme a Equação 53.

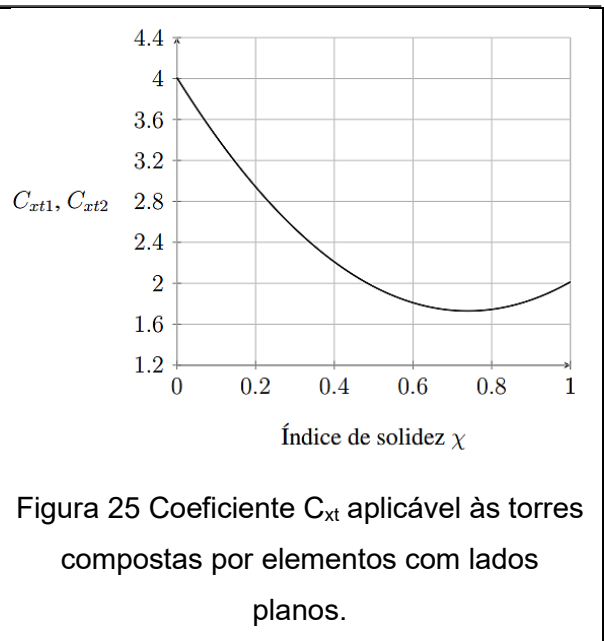
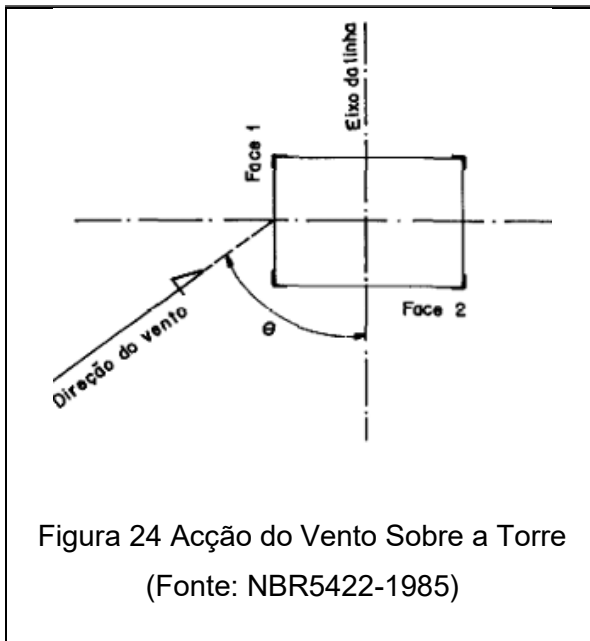
$$A_t = q_0 [(1 + 0,2 \sin^2 2\theta) ((S_{t1} C_{xt1} \sin^2 \theta) + S_{t2} C_{xt2} \cos^2 \theta)] \quad (53)$$

Sendo, θ : Ângulo de incidência da direcção do vento com a direcção perpendicular da face 1 do painel no plano horizontal; (°)

S_{t1} : Área total da superfície projectada normalmente a face 1 do painel da torre;
(m^2)

S_{t2} : Área total da superfície projectada normalmente na face 2, correspondente aos elementos estruturais da mesma face da torre;
(m^2)

C_{xt1} , C_{xt2} : Coeficientes de arrasto correspondentes às faces 1 e 2, respectivamente, para o vento incidindo perpendicularmente.



No caso de torres compostas por cantoneiras, os coeficientes de arrasto C_{xt1} e C_{xt2} são obtidos conforme o gráfico acima (Figura 25).

Na Equação 54, χ é o índice de área exposta, definido como a relação entre a soma da área dos elementos estruturais projectados no painel (S_{t1} ou S_{t2}) e área total do painel considerado.

$$\chi = \frac{A_{efectiva}}{A_{total}} \quad (54)$$

2.9 CRITÉRIOS DE SEGURANÇA CONFORME O EUROCÓDIGO 3

O projecto em tensões admissíveis (Allowable Stress Design - ASD), em que a tensão do material é limitada por alguma fracção de sua tensão de falha, demonstra que, sob o carregamento esperado ou especificado, a tensão alcançada não excede o valor admissível, expresso simbolicamente por:

$$\gamma_s S \leq R \quad (55)$$

Sendo, γ_s : Coeficiente de segurança aplicado ao carregamento;

S: Carregamento (acções ou solicitações) na estrutura;

R: Resistência da estrutura;

Para verificação da segurança, como mencionada anteriormente, será tomado como Base o Euro código 3. Inicialmente serão determinadas as expressões necessárias para a verificação dos membros que compõem a Torre em relação aos esforços de Tracção e Compressão.

2.9.1 Combinação de acções

Para o caso em estudo, serão efectuadas combinações de acções para Estados Limites Últimos (Equação 56).

$$\sum \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_{k,1} + \sum \gamma_Q \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (56)$$

Onde: G_k : Valor característico das acções permanentes (ex: peso próprio)

$Q_{k,1}$: Valor característico da acção variável principal (ex: vento, sobrecarga)

$Q_{k,i}$: Outras acções variáveis simultâneas

$\Psi_{0,i}$: Coeficiente de redução da combinação

γ_G, γ_Q : Coeficientes parciais de segurança (típicos: 1.35 para G, 1.5 para Q)

2.9.2 Verificação em relação à Tracção

As cantoneiras serão ligadas por parafusos, para a verificação da resistência à tracção dos elementos deverá cumprir o estabelecido na cláusula 6.2.3 da EN 1993-1-1.

$$\frac{N_{ED}}{N_{t,RD}} \leq 1 \quad (57)$$

Onde: N_{ED} - Esforço actuante

$N_{t,RD}$ - Esforço Resistente

Pode-se verificar em secções com ligações aparafusadas, uma redução da resistência à tracção devido à diminuição de secção e concentração de tensões junto aos furos.

Na existência de furos, o valor de cálculo do esforço normal resistente último da secção útil na zona com furos de ligação deve ser obtido tendo como base uma secção útil reduzida calculada de acordo com a cláusula 6.2.2 da parte 1-1 do Eurocódigo 3.

Assim, o valor de cálculo do esforço normal resistente de tracção $N_{t,RD}$ deverá ser considerado igual ao menor dos seguintes valores:

Valor de cálculo do esforço Normal resistente da secção bruta:

$$N_{RD} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \quad (58)$$

Valor de cálculo da resistência última da secção útil:

1
parafuso

$$N_{u,Rd} = \frac{2,0(e_2 - 0,5d_0)tf_u}{\gamma_{M2}} \quad (59)$$

2
parafusos

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (60)$$

3 ou mais
parafusos

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (61)$$

Em que:

β_1 e β_2 - coeficientes de redução função da distância p_1 , como indicado na Tabela 10.

Para valores intermédios de p_1 , o valor β de poderá ser determinado por interpolação linear;

A_{net} - A área da secção útil da cantoneira. Para uma cantoneira com abas desiguais ligada pela aba menor, deverá considerar-se que é igual à área útil da secção

de uma cantoneira equivalente de abas iguais com dimensões iguais às da aba menor.

Tabela 10 Coeficientes de β_1 e β_2 redução e (Fonte: EC3-1-1)

Distância	p_1	$\leq 2,5 d_0$	$\geq 5,0 d_0$
2 parafusos	β_2	0,4	0,7
3 ou mais parafusos	β_3	0,5	0,7

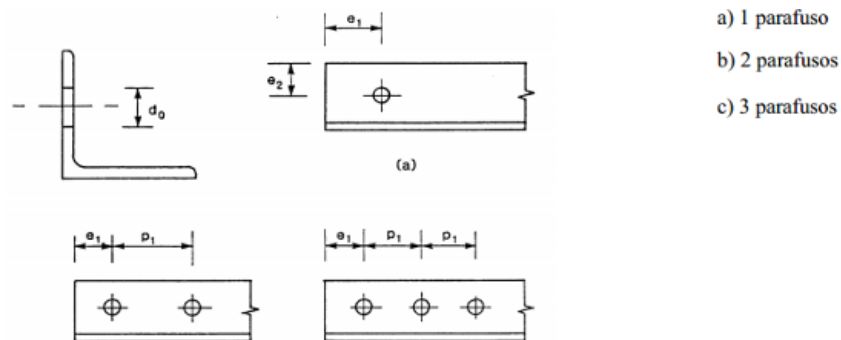


Figura 26 Cantoneiras ligadas por uma aba (Fonte: EC3-1-1)

Tabela 11 Coeficientes parciais de segurança (Adaptação - Fonte: EC3-1-1)

Resistência dos elementos à cedência	$\gamma_{M0} = 1,0$
Resistência dos elementos à encurvadura	$\gamma_{M1} = 1,0$
Resistência da secção útil na zona com furos de ligação	$\gamma_{M2} = 1,25$
Resistência dos parafusos	$\gamma_{M2} = 1,25$
Resistência ao escorregamento	$\gamma_{M3} = 1,25$

2.9.3 Verificação em relação à Compressão

O valor de cálculo do esforço de compressão actuante N_{Ed} em cada secção transversal deve satisfazer a condição:

$$\frac{N_{ED}}{N_{C,RD}} \leq 1 \quad (62)$$

Em que:

$N_{C,Rd}$ - valor de cálculo do esforço normal resistente à compressão uniforme. Este valor é determinado do seguinte modo:

$$N_{C,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (63)$$

Em que:

χ - Factor de redução para o modo de encurvadura relevante, obtido através da seguinte expressão:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}}, \text{ mas } \chi \leq 1,0 \quad (64)$$

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (65)$$

Tabela 12 Factor de Imperfeição pra curvas de cedência

Curva de cedência	a ₀	a	b	c	d
Factor de Imperfeição	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

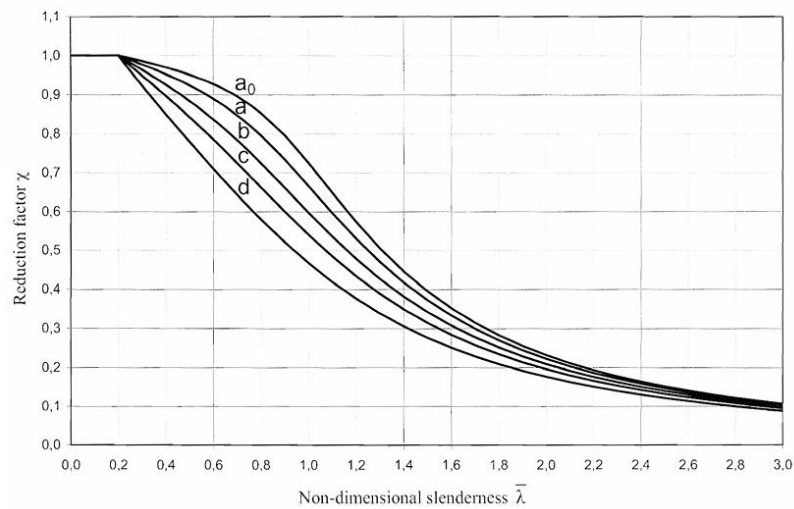


Figura 27 Curvas de Cedência

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1} \quad (66)$$

$$\lambda_1 = 93,9\varepsilon; \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (f_y \text{ em N/mm}^2) \quad (67)$$

Nos casos em que $\bar{\lambda} \leq 0,2$ ou $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq 0,04$, os efeitos da encurvadura poderão ser desprezados, sendo apenas necessárias as verificações de segurança das secções transversais.

2.9.4 Verificação da Segurança das Barras à flexão composta

Feitos os cálculos dos esforços resistentes e obtendo-se os valores dos esforços de calculo com base no Programa de cálculo *Robot Structural Analysis*, a verificação da segurança faz-se de acordo com a equação (68)

$$\frac{N_{ED}}{N_{RD}} + \frac{M_{xED}}{M_{xRD}} + \frac{M_{yED}}{M_{yRD}} \leq 1 \quad (68)$$

Onde: M_{xED} - Momento flector de cálculo na direcção x

M_{xRD} – Momento flector resistente na direcção x

M_{yED} – Momento flector de cálculo na direcção y

M_{yRD} – Momento flector resistente na direcção y

2.9.5 Verificação da Segurança das Ligações Metálicas

As ligações Metálicas no caso em estudo são aparafusadas, logo, será tomada em consideração a resistência dos parafusos assim como das chapas. Dito isto:

$$F_{v,RD} = \frac{0,6f_{ub}A_v n}{\gamma_{M2}} \quad (69)$$

Onde: $F_{v,RD}$ - Força de Resistência ao corte dos parafusos

A_v - Área Bruta de secção Transversal do parafuso

n - Número de Parafusos

γ_{M2} - Coeficiente de Majoração da acção

$$N_{u,RD} = \frac{\beta_2 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (70)$$

Onde: $N_{u,RD}$ - Resistência a Tracção da chapa tendo em conta a área Líquida

A_{net} - Área Líquida (Excluindo os furos)

f_u - Tensão de Ruptura da Chapa

β_2 - Factor de redução

$$N_{y,RD} = \frac{0,9 A f_y}{\gamma_{M2}} \quad (71)$$

Onde: $N_{y,RD}$ - Resistência a Tracção da chapa, tendo em conta a área Bruta

A - Área de secção Bruta da chapa

$$F_{b,RD} = \frac{k_1 \alpha f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (72)$$

Onde: $F_{b,RD}$ - Força de esmagamento da Ligação

d - Diâmetro do furo

t - Espessura da chapa

k - Coeficiente dado pelo mínimo valor encontrado nas equações 73 e 74

α - Coeficiente, dado pelo mínimo valor encontrado nas equações 75 e 76

$$k = \min \left[2,8 \left(\frac{e_1}{d_0} \right) - 2,7; 2,5 \right] \quad (73)$$

$$k = \min \left[2,8 \left(\frac{e_1}{d_0} \right) - 1,7; 1,4 \left(\frac{p_1}{d_0} \right) - 1,7; 2,5 \right] \quad (74)$$

$$\alpha_{min} \left[\frac{e_1}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - 0,25; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right] \quad (75)$$

$$\alpha_{min} \left[\frac{e_2}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right] \quad (76)$$

Onde: e_1 , e_2 , p_1 e p_2 são as distâncias do centro dos furos as bordas das chapas e as distâncias entre os parafusos entre si, nas direcções paralela e perpendiculares a acção da Força, como podem ser vistos na Figura 28.

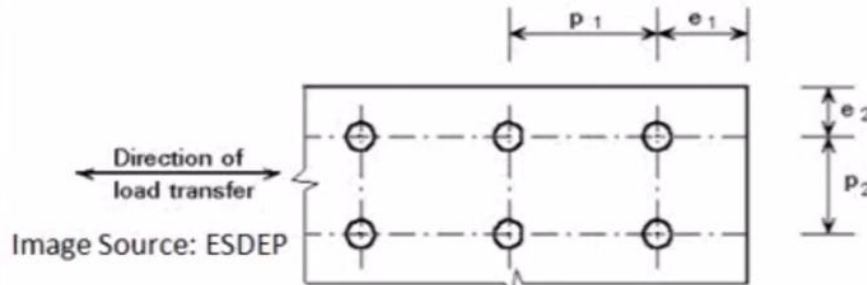


Figura 28 Distâncias entre parafusos e entre os parafusos e as bordas

Nota; O valor a adoptar como de resistência, deve ser o menor valor, entre os apresentados acima.

2.9.6 Efeitos de Segunda ordem

2.9.6.1 Estabilidade Global

As imperfeições de natureza global traduzem-se, na análise global da estrutura, por considerar uma inclinação inicial Φ de todas as colunas da estrutura (elementos verticais) no sentido mais desfavorável, isto é, no sentido dos deslocamentos horizontais provocados pelas forças horizontais (Figura 29). O valor desta inclinação inicial é dado por:

$$\Phi = \frac{1}{200} \alpha_m \alpha_h \quad (77)$$

Onde: (i) $\alpha_h = 2/h^{0.5}$ é um factor de redução que toma em consideração a altura total da estrutura h e deve estar compreendido no intervalo $2/3 \leq \alpha_h \leq 1$, e

(ii) $\alpha_m = (0.5 + \frac{0.5}{m})^{0.5}$ é um factor de redução que toma em consideração o número de colunas “suficientemente carregadas” da estrutura. Em virtude das torres de distribuição de energia serem estruturas treliçadas bastante altas ($h \gg 9m$), o parâmetro α_h assume o valor mínimo $2/3$. Por outro lado, e assumindo que as quatro colunas principais que constituem a estrutura treliçada absorvem grande parte do esforço axial, pode tomar-se

aproximadamente $m=4$ e, desta forma, $\alpha m=0.8$. Assim, uma estimativa aproximada do valor da inclinação inicial da estrutura associada a uma imperfeição global é $\Phi=1/375$.

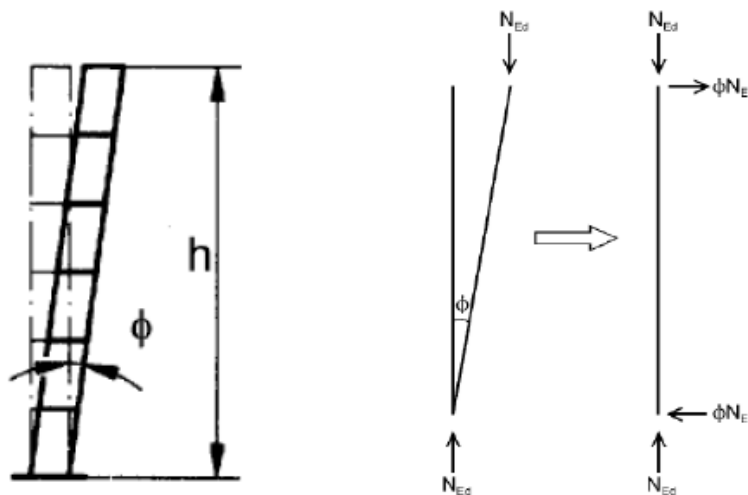


Figura 29 Imperfeição global ϕ da estrutura e forças laterais equivalentes.

Para evitar a necessidade de analisar uma estrutura “imperfeita” (desviada em relação à geometria perfeita), o EC3 permite que se substitua a inclinação inicial por um sistema de forças horizontais equivalentes (auto-equilibrado). Assim, pode-se substituir a inclinação inicial da estrutura por um binário de forças laterais (horizontais) equivalentes de valor $F_i=\phi N_i$ ao nível de cada um dos dois nós de uma barra i , em que N_i é o valor do esforço axial nessa barra da estrutura perfeita Figura 29.

Claro está que este procedimento se torna impracticável quando uma estrutura tem um número de barras elevadíssimo. No entanto, e de forma aproximada, poderiam adicionar-se forças horizontais $F_i=\phi V_i$ às componentes horizontais H_i das forças devidas à acção dos cabos, actuantes nas extremidades dos “braços” da estrutura (V_i são as componentes verticais das mesmas forças devidas à acção dos cabos).

Claro que, ao tomar este valor para toda a estrutura, está-se a tomar uma “imperfeição média”. No entanto, no caso de estruturas em que se verifique a condição

$$H_{Ed} \geq 0,15V_{Ed} \quad (78)$$

o EC3 (Parte 1.1) permite que não se considerem as imperfeições globais da estrutura. De facto, neste caso as forças horizontais H_{Ed} são bastante elevadas (superiores a 15% das forças verticais V_{Ed}) e, por isso, as forças horizontais equivalentes às imperfeições globais tornam-se desprezáveis face a H_{Ed} e podem não ser consideradas (embora existam, o seu valor relativo é diminuto).

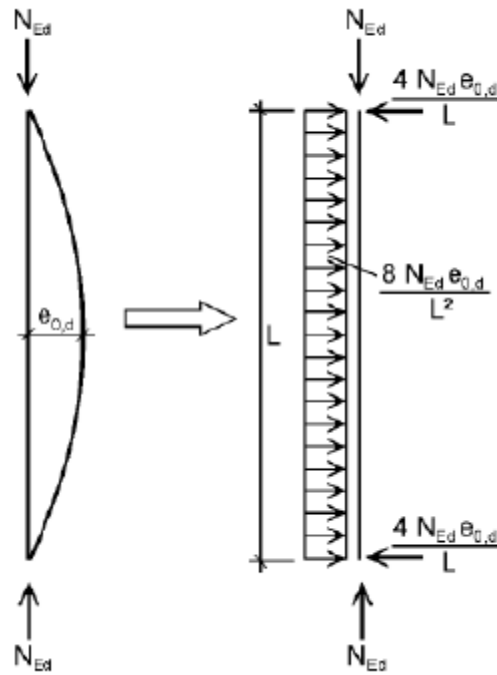


Figura 30 Imperfeição local e_o da barra e forças transversais equivalentes.

Capítulo 3

Caso de Estudo

3 CASO DE ESTUDO

3.1 DESCRIÇÃO GERAL DA TORRE

A torre que constitui o objecto de estudo do presente trabalho, trata-se de uma estrutura metálica, treliçada, autoportante, projectada por uma empresa Sul-africana de nome ABB, e implantada nas proximidades da praça da juventude, na rotunda do bairro de Malhazine, ao longo da Av. Julius Nyerere, conforme ilustra a Figura 31.

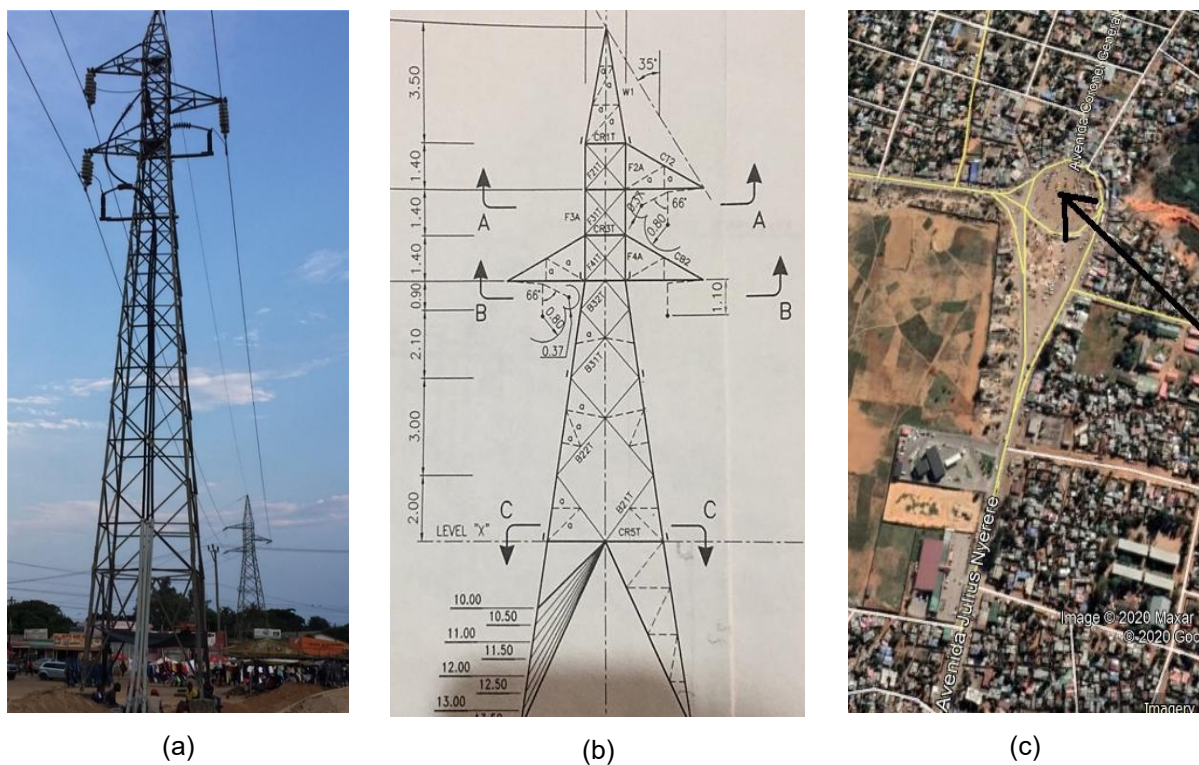


Figura 31 Ilustração da torre (a) vista geral da torre implantada (b) vista geral no projecto e (c) localização da torre de Malhazine

A partir dos dados do projecto, nomeadamente, as peças desenhadas e dos levantamentos feitos in situ, foi possível constatar que a estrutura da torre em termos geométricos apresenta cerca de 21,2 metros de altura, com abertura de base de 7,0

metros e abertura de topo de 1,40 metros, como ilustram as Figura 32 e Figura 33. Os elementos principais da estrutura da torre são constituídos por perfis cantoneiras de abas iguais, que possibilitam a ligação aparafusada entre si.

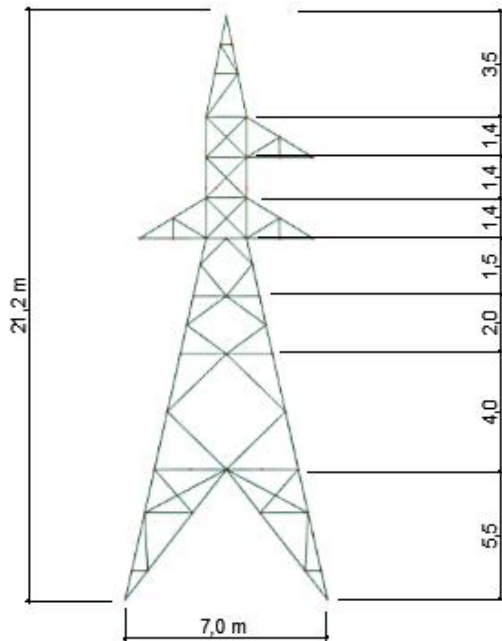


Figura 32 Dimensões das Faces Frontal da Torre de Suspensão de Malhazine .

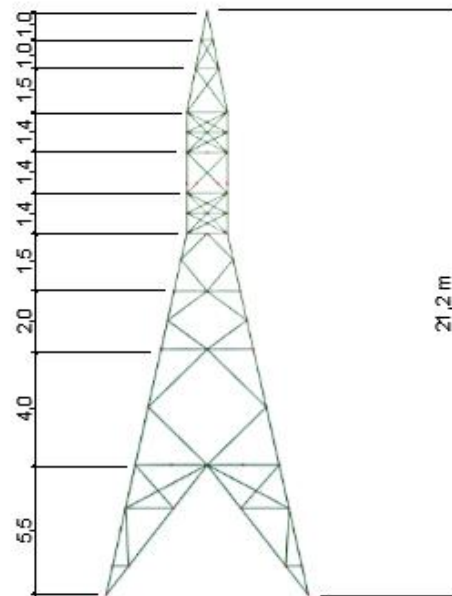


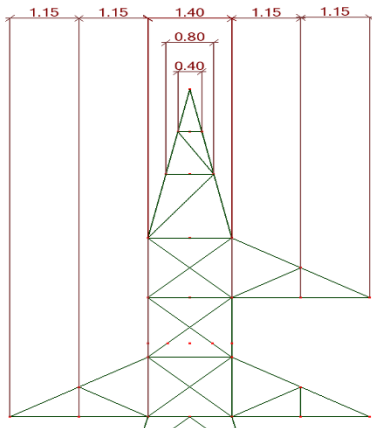
Figura 33 Dimensões das Faces Lateral da Torre de Suspensão de Malhazine .

Nas extremidades das mísulas, os cabos conductores são vinculados à estrutura da torre por meio de cadeias de isoladores de suspensão de 1,62 m de comprimento, compostas por discos com corpo isolante de vidro temperado (254 x 146 mm). No caso do cabo pára-raios, a vinculação é feita directamente na extremidade da mísula.

3.2 MODELO NUMÉRICO DA TORRE

De formas a poder proceder com a análise numérica e avaliação do comportamento estrutural da torre, foi desenvolvido um modelo de calculo numérico com recurso ao método de elementos finitos, modelando a estrutura toda, treliçada, com elementos de barras, respeitando toda a geometria ora apresentada. Nas Figuras 34 a 37 são ilustradas imagens do modelo desenvolvido.

Figura
Vista
em
parte



superior do modelo numérico da Torre.

34 –
frontal
2D da

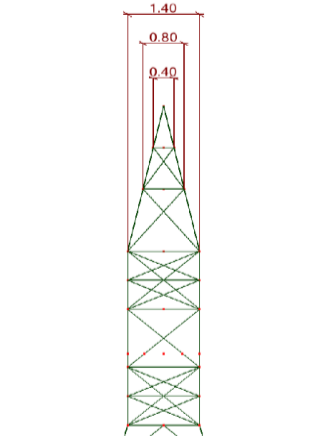


Figura 35 Vista lateral em 2D da parte superior do modelo da Torre.

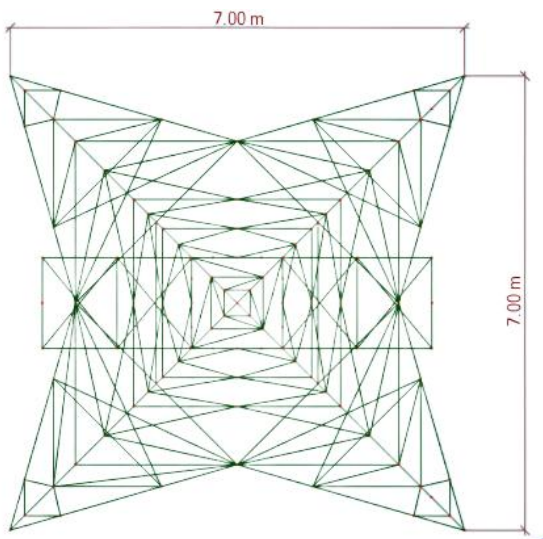


Figura 36 Vista superior do modelo numérico.

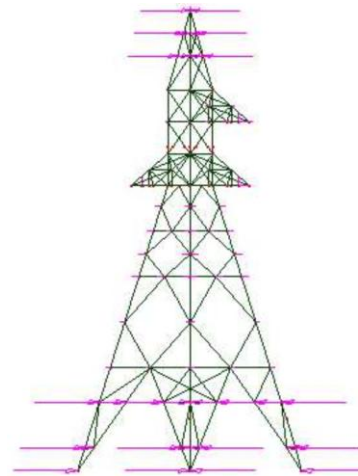


Figura 37 Vista geral do modelo numérico com forças aplicadas.

3.2.1 Características dos Elementos Estruturais da Torre

Conforme já mencionado a torre é constituída por barras metálicas treliçadas. As mesmas são materializadas, conforme o projecto, por perfis de secções transversais apresentados na Tabela 13, incluídos no modelo tal qual, e chapas de ligações apresentadas na Tabela 14.

Tabela 13 Perfis na torre e suas funções

Perfil	Montante	Diagonais	Mísulas	Pico
L 45x45x5	-	X	X	X
L50x50x5	X	-	X	-
L50x50x6	-	X	-	-
L55x55x5	-	-	X	-
L55x55x6	-	X	X	-

Análise Comparativa de Normas de Dimensionamento de Torres de Alta Tensão Face a Acção de Ciclones

L65x65x5	-	-	X	-
L 70x70x6	-	-	-	X
L 100x100x8	X	-	-	-

Nota: o 'X' marca onde foi usado o perfil

Tabela 14 Perfil das chapas de Ligação

Perfil das chapas	Nível
PL 284X10	A 5,5 metros em todas as faces
L 100x100x8	Nas Juntas entre painéis verticais, ao longo da estrutura
PL 185X8 e PL 164x6;	A 13,5 metros em todas as faces
PL 195X6	A 14,9 metros em todas as faces
PL 175X8 e 140x6	A 16,3 metros em todas as faces
PL 110X6;	Nas mísulas(crossarms), na Face Longitudinal
PL145x6; 190x20	Nas mísulas, mas nas bases

Com relação as propriedades mecânicas dos materiais, foi usado o aço da classe Fe 430 e Fe 510 para os perfis metálicos e para os parafusos, o aço da classe 6.8, segundo a norma ISO 898. As propriedades destas classes de aço apresentam-se na Tabela 15.

Tabela 15 Propriedades do Aço

	Fe 430	Fe 510	Gr 6.8
f_{yd} (MPa)	248	345	480
F_u (MPa)	400	450	600
$\tau=0,6f_y$ (MPa)	148,8	207	282
Φ (mm)	-	-	12
E (MPa)	$2,06 \times 10^5$	$2,06 \times 10^5$	$2,06 \times 10^5$
ν	0,3	0,3	0,3
G (MPa)	$0,8 \times 10^5$	$0,8 \times 10^5$	$0,8 \times 10^5$
γ (kN/m ³)	77,0	77,0	77,0

Em relação as bases de betão, adoptou-se para efeitos de análise uma classe de resistência B30 cujas propriedades se apresentam na Tabela 16. Este betão, é

acompanhado de armadura ordinária de aço de Classe A400NR cujas propriedades se apresentam na Tabela 17.

Tabela 16 Propriedades do betão

f_{ck} (MPa)	30
f_{cd} (MPa)	16.7
f_{ctk} (MPa)	1.8
f_{ctd} (MPa)	1.2
$E_{c,28}$ (GPa)	30.5
γ (kN/m ³)	24
ν	0.2

Tabela 17 Propriedade das armaduras ordinárias

f_{syk} (MPa)	400
f_{syd} (MPa)	348
f_{suk} (MPa)	460
ϵ_{suk} (%)	1.5
E (GPa)	200

Por fim em relação aos cabos de transmissão, e pára-raios, foram considerados propriedades mecânicas, apresentadas na Tabela 18 preconizadas na norma ABNT NBR 5908 (1988) e ABNT NBR 7270 (1988).

Tabela 18 Propriedades mecânicas dos cabos

Propriedade		Condutor	Para-raios
Nome		Linnet 336,4 MCM	HS 5/16"
Material		Núcleo de aço com alumínio	Cordoalha de aço
Massa	<i>kgf/m</i>	0,6884	0,3050
Diâmetro	<i>m</i>	0,01831	0,00790
Força de ruptura	<i>N</i>	61810	35610
Módulo de elasticidade	<i>GPa</i>	74	200
Coef. de dilatação térmica	<i>°C⁻¹</i>	18,9 10 ⁻⁶	1,0 10 ⁻⁵

3.3 ACÇÃO DO VENTO

A solicitação devida ao vento foi calculada de acordo com cada uma das Normas citadas anteriormente no subcapítulo 2.3.3. Neste item também é abordado a consideração da acção do vento nas demais faces adjacentes à face incidente.

3.3.1 Velocidade Básica do vento

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, admitindo-se, como regra geral, que o vento básico pode soprar de qualquer direcção horizontal.

Na Figura 38 ilustra-se o mapa de zonamento de ventos de Moçambique, produzido e emitido em 2014. A partir deste mapa, observa-se que a torre em estudo se encontra inserida correctamente na zona II cujo valor da velocidade extrema definida é de 43 m/s, o qual tomou-se como velocidade básica para as devidas análises.

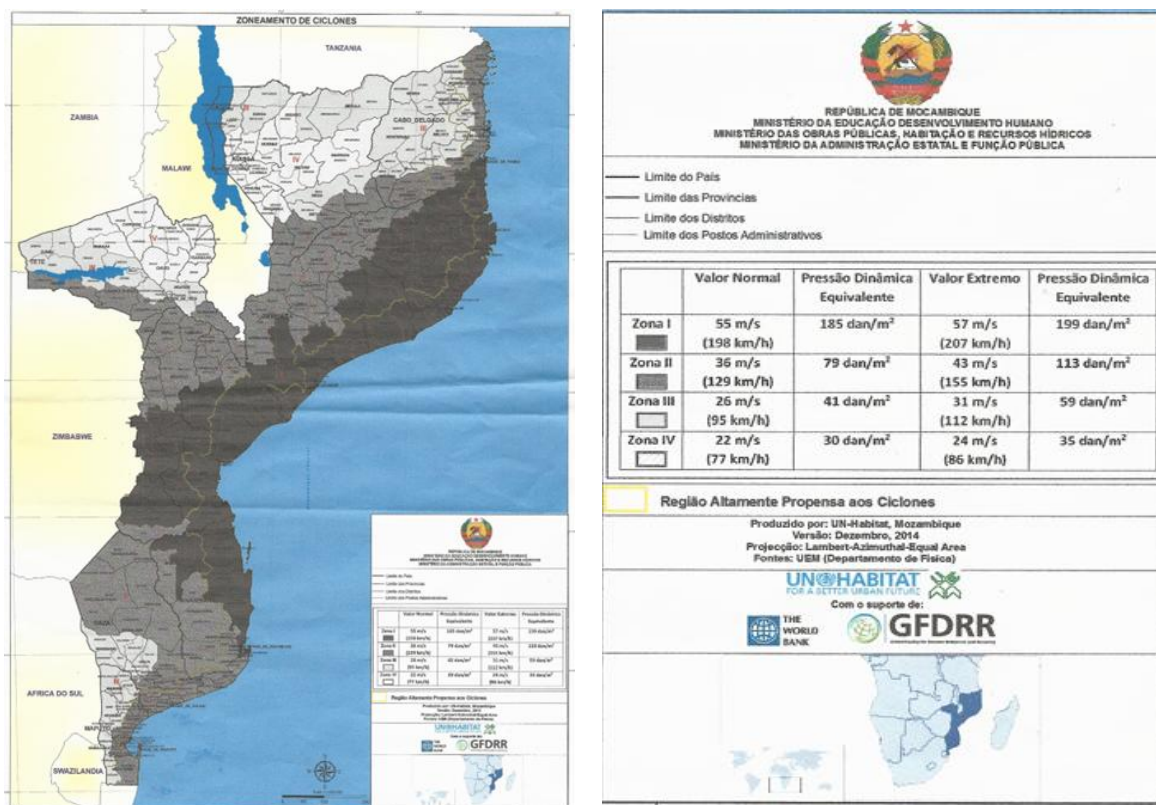


Figura 38 - Zonamento de Ciclones em Moçambique (a Direita) e detalhe das velocidades (a esquerda)

3.3.2 Velocidade de Projecto

A velocidade de projecto é definida como função da velocidade básica, e da categoria do terreno cuja a determinação tem em conta os factores como a topografia do terreno e atrito do solo. De acordo com a natureza da zona de inserção da torre, para a Norma IEC 60826 e a NBR-5422 a categoria correspondente é **D** e para o Documento ASCE-74 considera-se a categoria **B**. Em relação as categorias identificadas, define-se na Tabela 19 os coeficientes de rugosidade e de correcção da velocidade através dos quais determinou-se valores de velocidades de projectos considerados nas diferentes normas em função da altura da torre apresentados na Tabela 20.

Tabela 19 Coeficientes de rugosidade e Coeficientes de correcção da velocidade do vento

Análise Comparativa de Normas de Dimensionamento de Torres de Alta Tensão Face a Acção de Ciclones

IEC 60826		NBR5422-1985		ASCE-74
K_R	α	K_R	$1/n (\alpha)$	K_{ZT}
0,67	0,28	0,67	0,16	1

Tabela 20 Valores de Velocidade considerados para IEC 60826, NBR 5422-1985 e ASCE 74

	(IEC60826)	(NBR5422-1985)	ASCE74
H(m)	$V = 43x(h/10)^\alpha$	$VP=43*K_d*K_r(h/10)^{1/n}$	$V_{(50)}$
0	0,00	0,00	0
5,5	24,37	25,87	43
9,5	28,40	28,55	43
11,5	29,96	29,54	43
13,5	31,34	30,41	43
14,9	32,21	30,95	43
16,3	33,03	31,46	43
17,7	33,80	31,93	43
21,2	35,56	32,98	43

3.3.3 Factor de resposta à Rajada e Coeficiente de Arrasto

O Factor de resposta à Rajada é somente considerado pela Norma IEC 60826 (2017) e pela ASCE 74, e os valores para a torre em estudo para diferentes alturas são dados na Tabela 21. Correlação ao coeficiente de arrasto as três normas apresentam os valores correspondentes na Tabela 22. Mais abaixo a Figura 39 e Figura 40 ilustram os mesmos valores de forma gráfica.

Tabela 21 Factor de Resposta à Rajada das Torres IEC 60826, NBR 5422-1985 e ASCE 74

	IEC60826	ASCE74
H(m)	$G_{T1,2}=-0,0002H^2+0,0384H+2,9284$	$G_t=[1+2,7E(B_T)^{1/2}]/K_V$
0	2,93	-
5,5	3,15	1,37
10,5	3,35	1,34
12,6	3,44	1,33
13,5	3,48	1,33
14,9	3,54	1,32
16,3	3,61	1,32
17,7	3,67	1,31
21,2	3,83	1,31

Tabela 22 Coeficiente de arrasto para Para IEC 60826, NBR 5422-1985 e ASCE-74

	IEC60836	NBR5322-1985	ASCE 74
H(m)	$C_{xt1,2}=4,1227\chi^2-6,1881\chi+4,0088$	$C_{xt1,2}$(Valores obtidos na Figura 25)	C_f
0,00	4	4	4,00
5,50	3,6	4	3,71
10,50	3,3	3,2	3,44
12,60	2,9	2,9	3,06
13,50	2,94	2,94	3,12
14,90	2,2	2,88	2,03
16,30	2,86	2,86	2,96
17,70	2,2	2,87	2,03
21,20	2,6	2,7	2,86

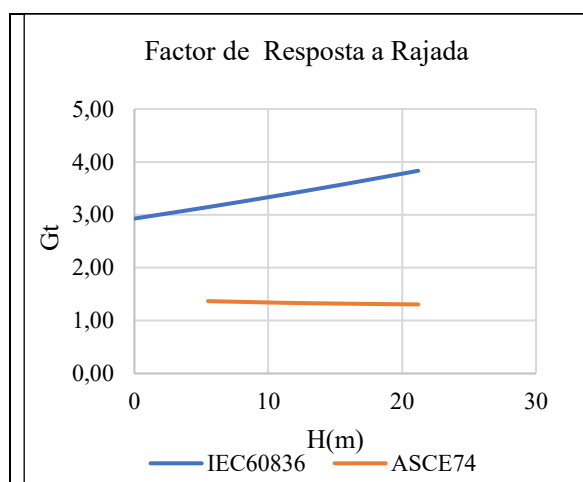


Figura 39 - Factor de Resposta a rajada Segundo a IEC 60826 e ASCE-74

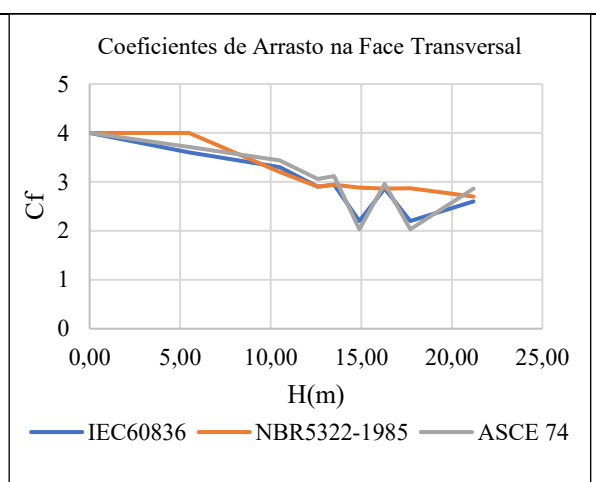


Figura 40 Comportamento do Factor de rajada em função da Altura para os 3 Documentos

3.4 FORÇAS DEVIDO A ACÇÃO DO VENTO PARA DIFERENTES HIPÓTESES

A consideração da acção do vento de projecto em cada uma das normas varia, tomando valores de 0 a 35,56 m/s para as Norma IEC 60826 e de 0 a 32,98 m/s para a NBR 5422-1985, enquanto que a normativa apresentada no documento ASCE 74 considera uma velocidade constante de 96,875 mph (43m/s) em toda a estrutura (Vide Tabela 20).

Com estas velocidades do vento a ser projectado nos diferentes níveis da torre, são igualmente geradas diferentes forças sobre a estrutura de acordo com o tipo de Hipótese e o ângulo de incidência do vento. A título de exemplo nas Tabelas 23 a 25 apresentam-se resultados de cálculo de forças actuantes sobre a estruturas para o caso da Hipótese 1 e vento actuando na direcção do 0° , usando as expressões referentes a cada Norma. E na

Tabela 26 e Figura 41 apresentam-se de forma resumida os resultados obtidos e a gráfico comparativo das forças, respectivamente.

Os demais resultados dos cálculos para as demais Hipóteses 1, 2 e 3 com diferentes ângulos de incidência do vento combinado a 0°, 30°, 45°, 60° e 90°, encontram-se em detalhe nas tabelas em anexo e os respectivos gráficos comparativos são apresentados a baixo nas Tabelas 27 a 31.

Importa referir, ainda, que ao Longo do trabalho são mencionadas faces da estrutura que se referem a:

- Face 1 é a face com duas mísulas (Transversal à Linha)
- Face 2, Face sem mísulas (Longitudinal à Linha)
- Face 3 é a Face com uma mísula (Transversal à Linha, paralela a Face 1)

Tabela 23 Tabela com os resultados dos esforços actuantes nas torres e nos cabos segundo a Norma IEC 60826

Altura da Torre - H (m)	0	5,5	9,5	11,5	13,5	14,9	16,3	17,7	21,2
$v_z = v_R \left(\frac{H}{10}\right)^{0,28} [m/s]$	0	24,37	28,4	29,96	31,34	32,21	33,03	33,8	35,56
$q = \frac{1}{2} \tau \mu (K_R v_{RB})^2 [N/m^2]$	0	363,74	493,99	549,77	601,42	635,59	668,37	699,93	774,36
F_{estrutura} [kN] $A_t = q \left[\begin{matrix} (1 + 0,2) \left(S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta \right) \\ \sin^2 2\theta \left(+ S_{t2} C_{xt2} \sin^2 \theta \right) \end{matrix} \right] G_t$	0	11,9	12,59	6,5	4,57	4,04	3,04	4,45	4,34
F_{isolador} (KN) $A_i = q C_{xi} G_t S_i$					2,4		2,67		3,09
F_{conductor} (KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L dL \sin^2 \Omega$					12,03		14,48		
F_{pára-raio} (KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L dL \sin^2 \Omega$									9,02
ST1 (m2)	0	2,46	2,09	1,1	0,7	0,78	0,43	0,78	0,58
A1 (m2)	0	32,95	16,34	5,49	3,7	1,96	1,96	1,96	2,45

Análise Comparativa de Normas de Dimensionamento de Torres de Alta Tensão Face a Acção de Ciclones

$\chi = \left(\frac{ST_1}{A_1}\right)$	0	0,07	0,13	0,2	0,19	0,4	0,22	0,4	0,24
ST2 (m2)	0	2,46	2,09	1,1	0,7	1,06	0,43	0,75	0,58
A2 (m2)	0	32,95	16,34	5,49	3,7	5,18	1,96	3,57	2,45
χ	0	0,07	0,13	0,2	0,19	0,21	0,22	0,21	0,24
C_{xt1}	4	3,6	3,3	2,9	2,94	2,2	2,86	2,2	2,6
C_{xt2}	4	3,6	3,3	2,9	2,94	2,88	2,86	2,88	2,6
Nº de nós na Face 1	0	10	5	5	5	4	2	4	7
F por Nó	0	1,19	1,26	1,3	0,91	0,81	0,76	2,22	1,08
Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores					14,43		17,15		12,11

Tabela 24 Tabela com os resultados dos esforços actuantes nas torres e nos cabos segundo a Norma NBR 5422-1985

H(m)	0	5,5	9,5	11,5	13,5	14,9	16,3	17,7	21,2
v(m/s) $v_z = K_T K_d v_T \left(\frac{h}{10}\right)^{0,18}$	0	25,87	28,55	29,54	30,41	30,95	31,46	31,93	32,98
q(N/m2) $q = \frac{1}{2} \rho v^2 (K_R v_{RB})^2$	0	409,94	499,08	534,62	566,39	586,87	606,15	624,4	666,31
Festructura (KN) $A_t = q \left[\begin{matrix} (1 + 0,2) \\ \sin^2 2\theta \end{matrix} \left(\begin{matrix} S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta \\ + S_{t2} C_{xt2} \sin^2 \theta \end{matrix} \right) \right]$	0	4,03	3,33	1,71	1,16	1,8	0,75	1,34	1,05
Fisolador (KN) $A_i = q C_{xi} S_i$					0		0		0
Fconductor (KN) $A_c = q C_{xc} \alpha d \frac{z}{2} \sin^2 \theta$					0		0		
F pára raio (KN) $A_c = q C_{xc} \alpha d \frac{z}{2} \sin^2 \theta$									0
ST1 (m2)	0	2,46	2,09	1,1	0,7	0,78	0,43	0,78	0,58
A1 (m2)	0	32,95	16,34	5,49	3,7	1,96	1,96	1,96	2,45
χ $\left(\frac{ST_1}{A_1}\right)$	0	0,07	0,13	0,2	0,19	0,4	0,22	0,4	0,24
ST2 (m2)	0	2,46	2,09	1,1	0,7	1,06	0,43	0,75	0,58

Análise Comparativa de Normas de Dimensionamento de Torres de Alta Tensão Face a Acção de Ciclones

H(m)	0	5,5	9,5	11,5	13,5	14,9	16,3	17,7	21,2
A2 (m2)	0	32,95	16,34	5,49	3,7	5,18	1,96	3,57	2,45
X $\left(\frac{ST_2}{A_2}\right)$	0	0,07	0,13	0,2	0,19	0,21	0,22	0,21	0,24
Cxt1	4	4	3,2	2,9	2,94	2,2	2,86	2,2	2,7
Cxt2	4	4	3,2	2,9	2,94	2,88	2,86	2,87	2,7
Nº de nós na Face 2	0	10	5	5	5	9	2	5	7
F por Nó (KN)	0	0,4	0,67	0,34	0,23	0,2	0,37	0,27	0,15
Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores					0		0		0

Tabela 25 Tabela com os resultados dos esforços actuantes nas torres e nos cabos segundo a ASCE-74

H(m)	0	5,5	9,5	11,5	13,5	14,9	16,3	17,7	21,2
Pressão na Torre (KN/m ²) $P =$ $QK_zK_{zt}G_T(V_{pr})^2$	0,00	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Pressão nos cabos (KN/m ²) $P =$ $QK_zK_{zt}G_C(V_{pr})^2$					13,63		13,63		13,63
F1 (KN)	0,00	8,74	6,87	3,23	2,09	1,52	1,22	1,52	1,60
F2 (KN)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F Conductor (KN)					5,98		5,98		
F pára- raio (KN)									2,58
ST1 (m2)	0,00	2,46	2,09	1,10	0,70	0,78	0,43	0,78	0,58
A1 (m2)	0,00	32,95	16,34	5,49	3,70	1,96	1,96	1,96	2,45
$\Phi \frac{A_1}{ST_1}$	0,00	0,07	0,13	0,20	0,19	0,40	0,22	0,40	0,24
Cf	4,00	3,71	3,44	3,06	3,12	2,03	2,96	2,03	2,86
Nº de Nós Face 1	0,00	10,00	5,00	5,00	5,00	4,00	2,00	4,00	7,00
F de Vento por no Face 1	0,00	0,87	1,37	0,65	0,42	0,38	0,61	0,38	0,23
ST2 (m2)	0,00	2,46	2,09	1,10	0,70	1,06	0,43	0,75	0,58
A2 (m2)	0,00	32,95	16,34	5,49	3,70	5,18	1,96	3,57	2,45
$\Phi \frac{A_2}{ST_2}$	0,00	0,07	0,12	0,20	0,18	0,20	0,21	0,20	0,23
Cf	4,00	3,71	3,43	3,05	3,11	3,03	2,95	3,01	2,86
Nº de Nós Face 2	0,00	10,00	5,00	5,00	5,00	9,00	2,00	5,00	7,00
F de Vento por Nó na Face 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Análise Comparativa de Normas de Dimensionamento de Torres de Alta Tensão Face a Acção de Ciclones

Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores					5,98		5,98		2,58
---	--	--	--	--	------	--	------	--	------

Tabela 26 Tabela Comparativa das forças devido a acção do vento na Face 01 para cada um dos 3 Documentos normativos na Hipótese 1

H(m)	IEC 60826	NBR 5422-1985	ASCE 74
0	0,00	0,00	0,00
5,5	11,90	4,03	8,74
9,5	12,59	3,33	6,87
11,5	6,50	1,71	3,23
13,5	4,57	1,16	2,09
14,9	4,04	1,80	1,52
16,3	3,04	0,75	1,22
17,7	4,45	1,34	1,52
21,2	4,34	1,05	1,60

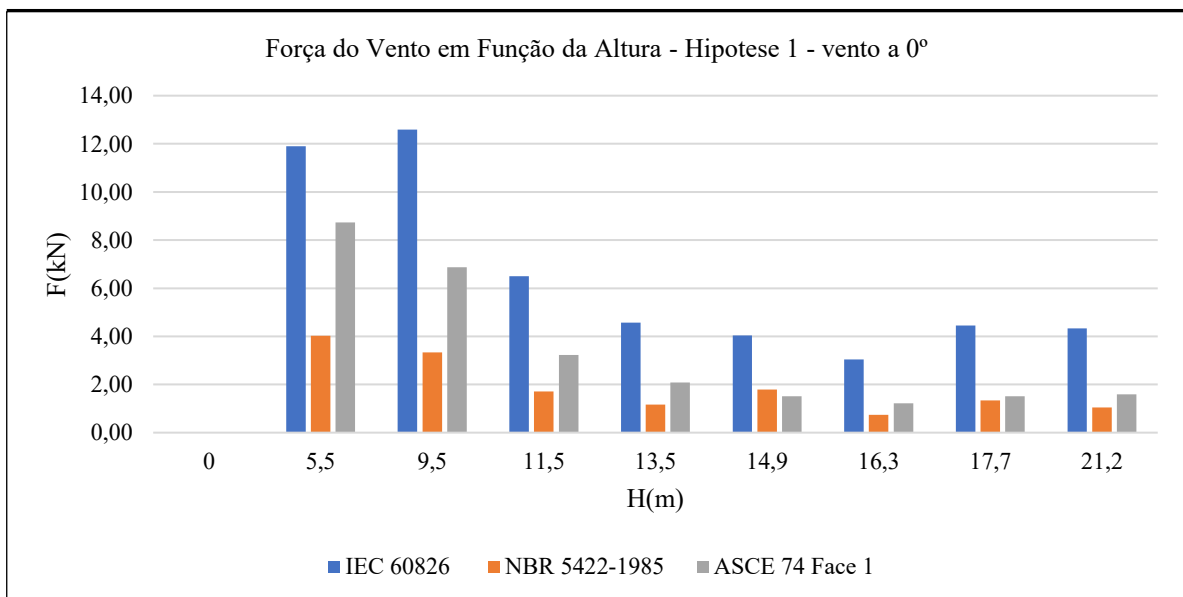
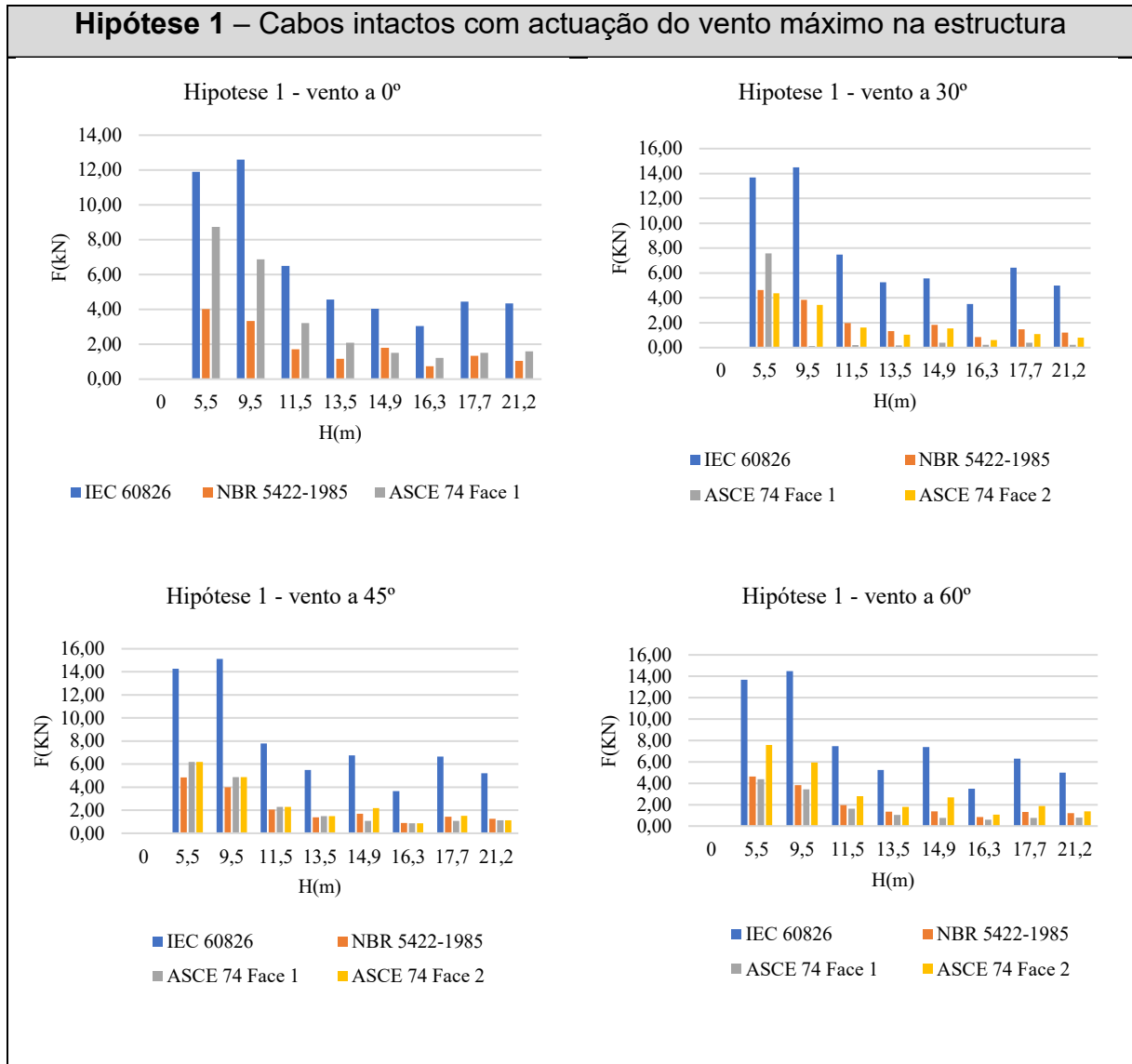


Figura 41 Força do vento actuando em diferentes níveis na estrutura da torre devido a incidência do vento a 0° na Hipótese 1 obtido pelas diferentes normas

Tabela 27 - Gráficos Comparativos de Força do vento nos nós da Estructura devido a incidência do vento actuando nas direcções de 0°, 30°, 45°, 60° e 90° nas Faces 1 e 2 para a Hipótese 1.



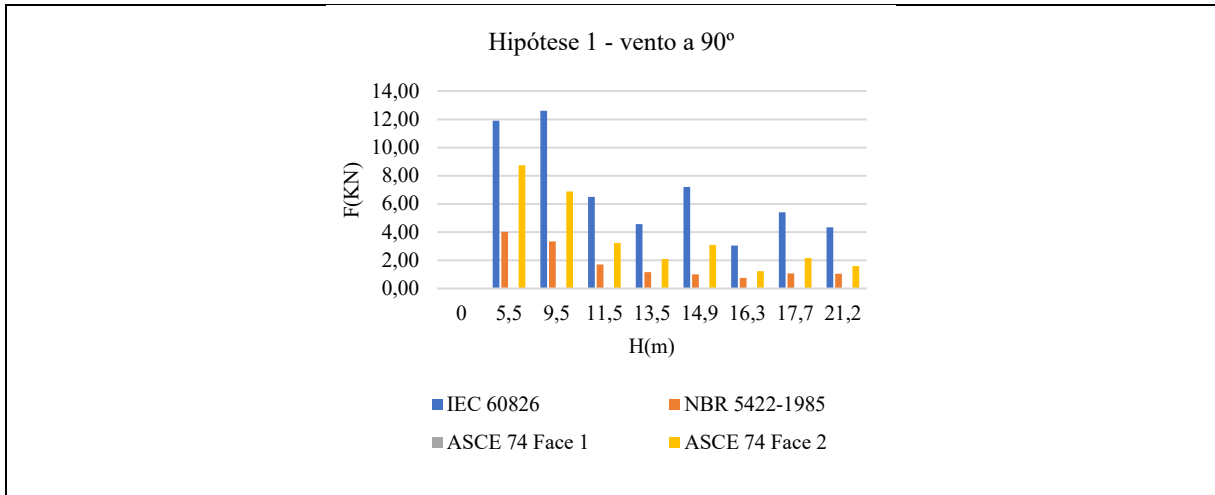
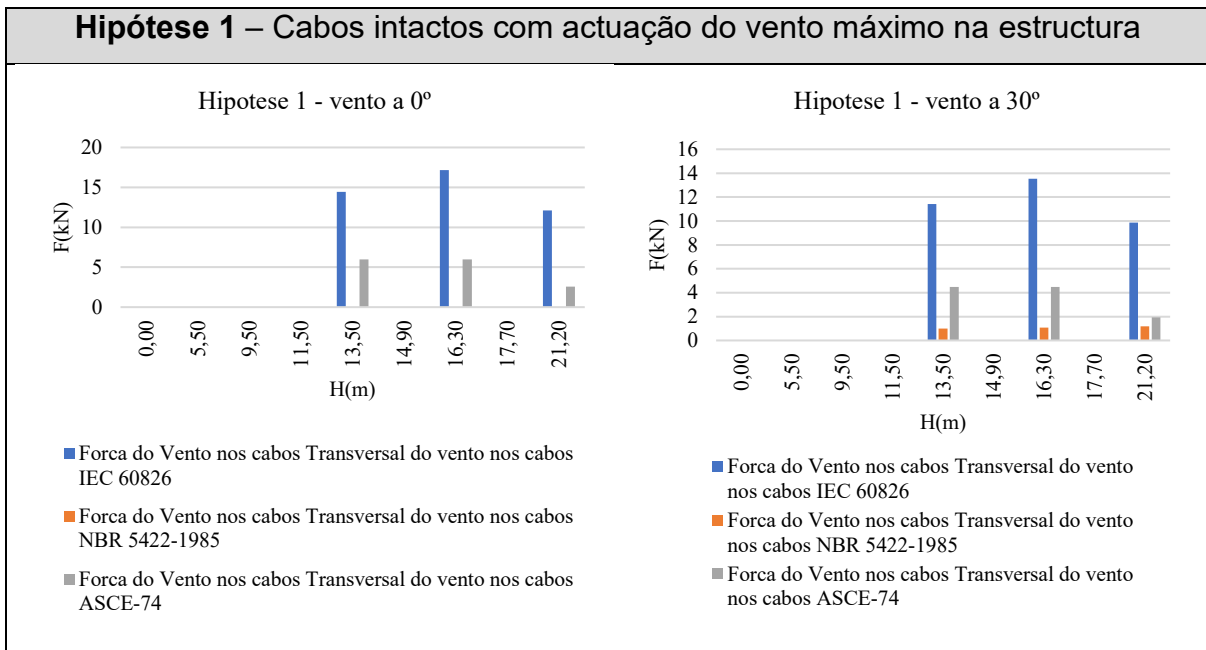


Tabela 28 Força de Vento incidente nas faces nos cabos de acordo com as diferentes Normas Para Hipótese 1



Análise Comparativa de Normas de Dimensionamento de Torres de Alta Tensão Face a Acção de Ciclones

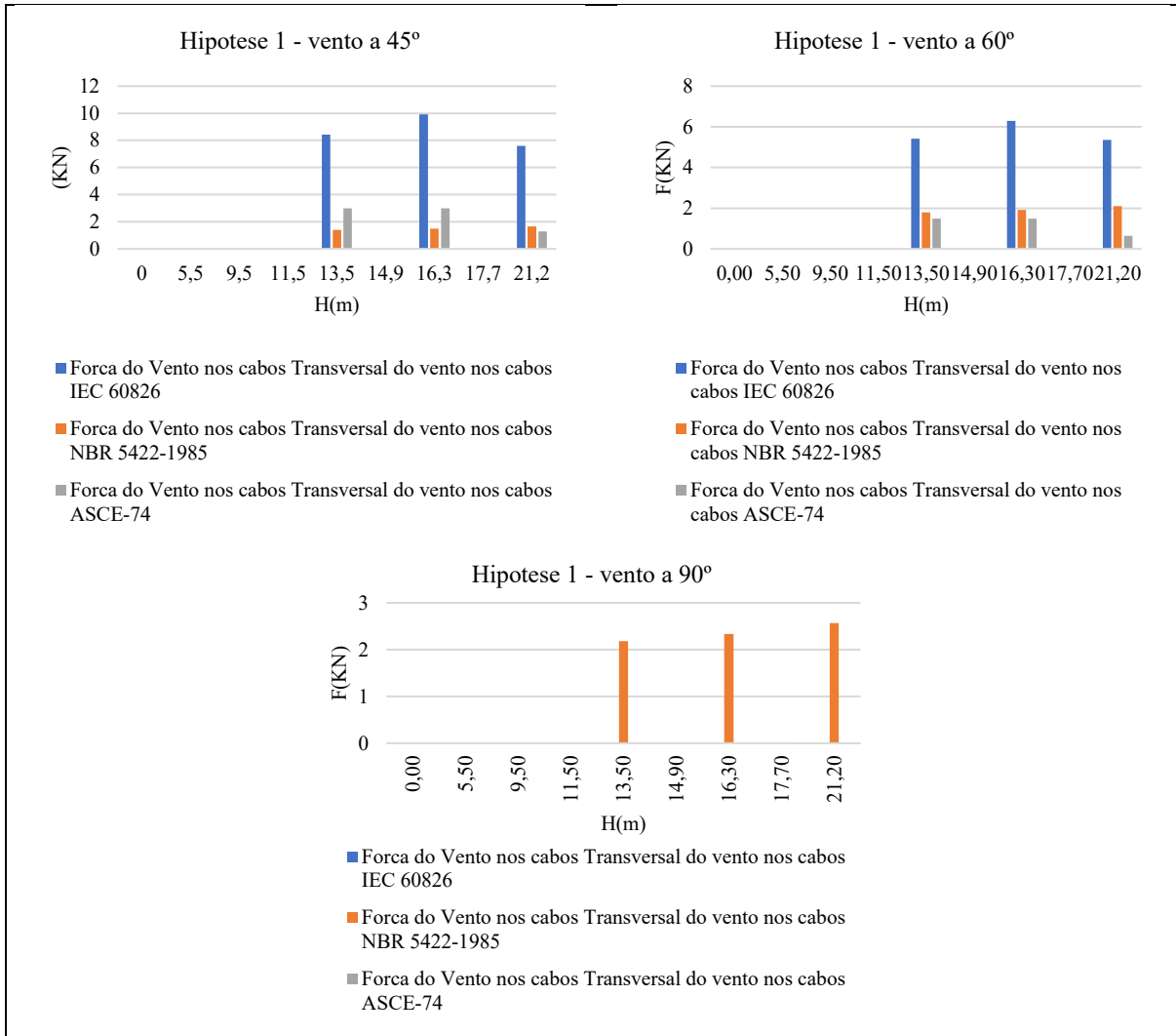
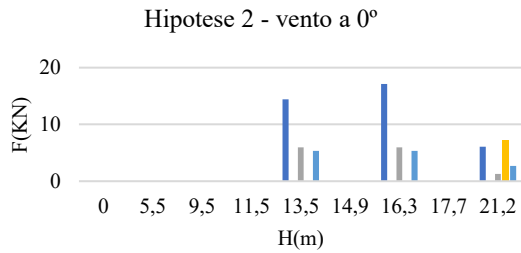
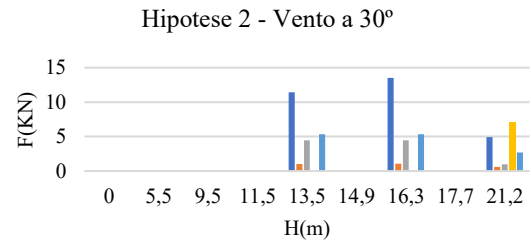


Tabela 29 Acção de Vento nos cabos, tendo em conta o cabo Pára-raios Rompido

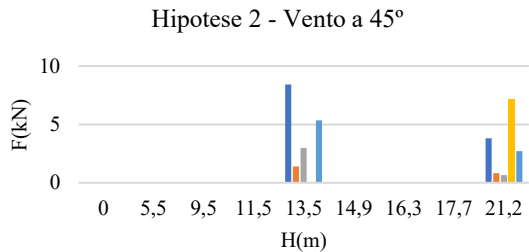
Hipótese 2 – Cabo pára-raios rompido com actuação do vento reduzido



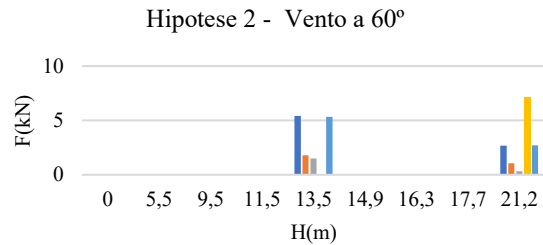
- Força do Vento nos cabos Transversal do vento nos cabos IEC 60826
- Força do Vento nos cabos Transversal do vento nos cabos NBR 5422-1985
- Força do Vento nos cabos Transversal do vento nos cabos ASCE-74
- Força do Vento nos cabos Longitudinal do vento nos cabos
- Peso do dos cabos



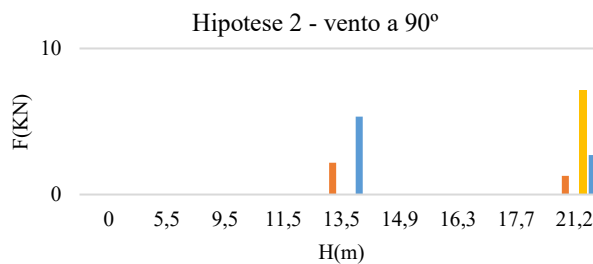
- Força do Vento nos cabos Transversal do vento nos cabos IEC 60826
- Força do Vento nos cabos Transversal do vento nos cabos NBR 5422-1985
- Força do Vento nos cabos Transversal do vento nos cabos ASCE-74
- Força do Vento nos cabos Longitudinal do vento nos cabos
- Peso do dos cabos



- Força do Vento nos cabos Transversal do vento nos cabos IEC 60826
- Força do Vento nos cabos Transversal do vento nos cabos NBR 5422-1985
- Força do Vento nos cabos Transversal do vento nos cabos ASCE-74
- Força do Vento nos cabos Longitudinal do vento nos cabos
- Peso do dos cabos

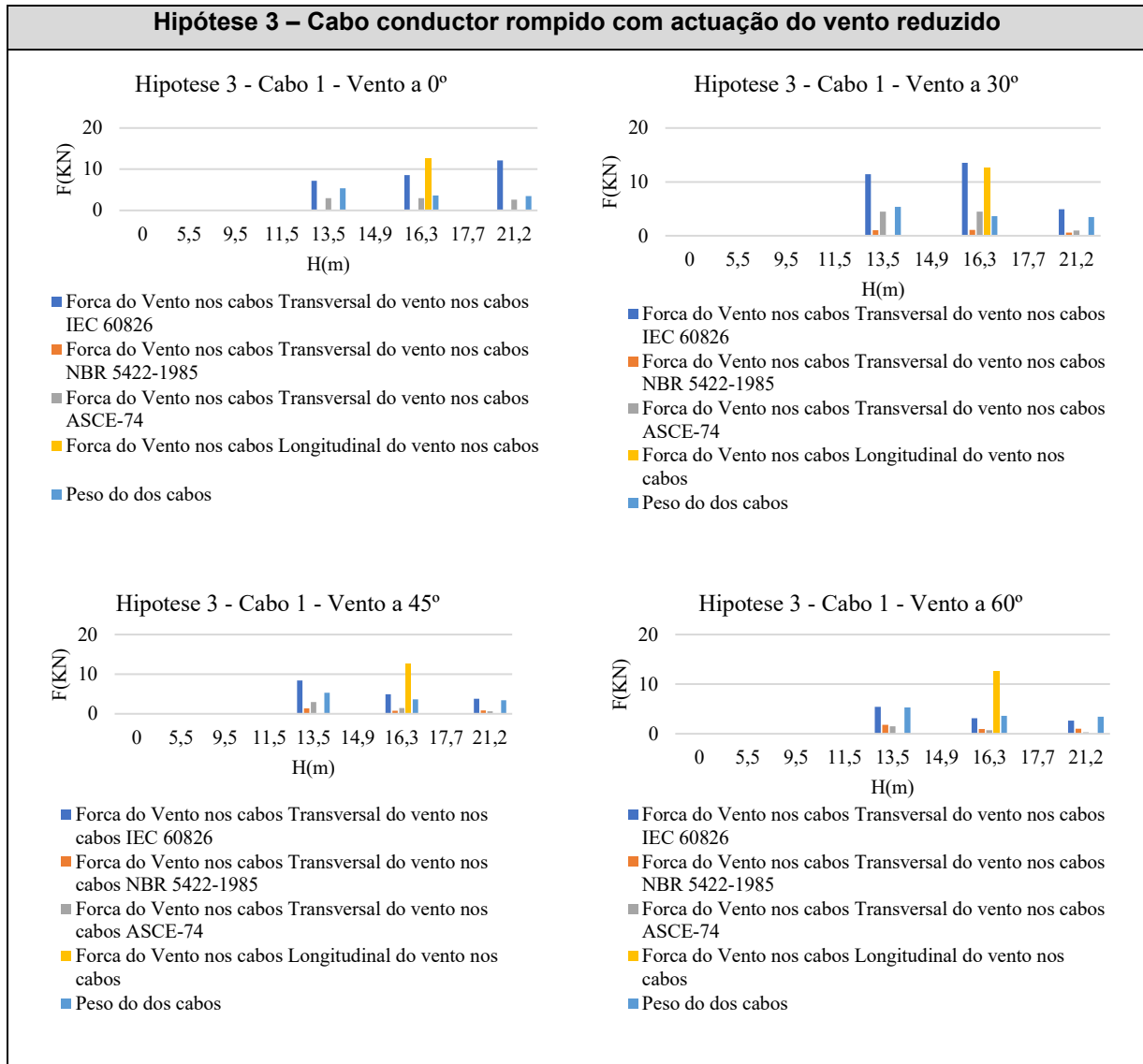


- Força do Vento nos cabos Transversal do vento nos cabos IEC 60826
- Força do Vento nos cabos Transversal do vento nos cabos NBR 5422-1985
- Força do Vento nos cabos Transversal do vento nos cabos ASCE-74
- Força do Vento nos cabos Longitudinal do vento nos cabos
- Peso do dos cabos



- Força do Vento nos cabos Transversal do vento nos cabos IEC 60826
- Força do Vento nos cabos Transversal do vento nos cabos NBR 5422-1985
- Força do Vento nos cabos Transversal do vento nos cabos ASCE-74
- Força do Vento nos cabos Longitudinal do vento nos cabos
- Peso do dos cabos

Tabela 30 Força do vento nos cabos, tendo em conta o cabo conductor rompido a 16,3 metros



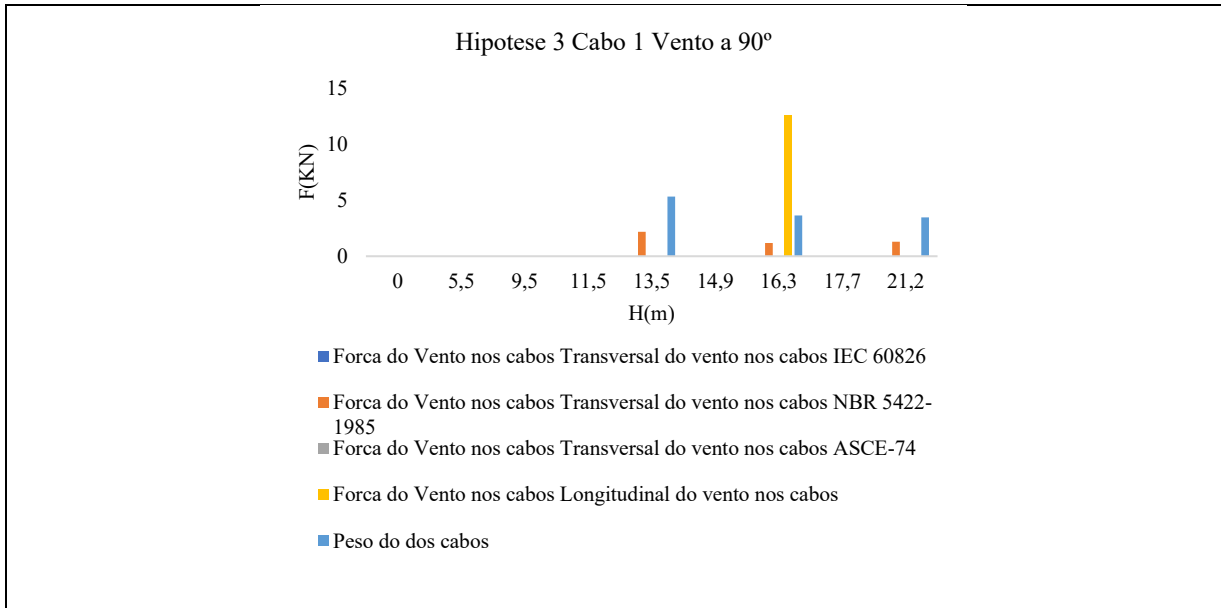
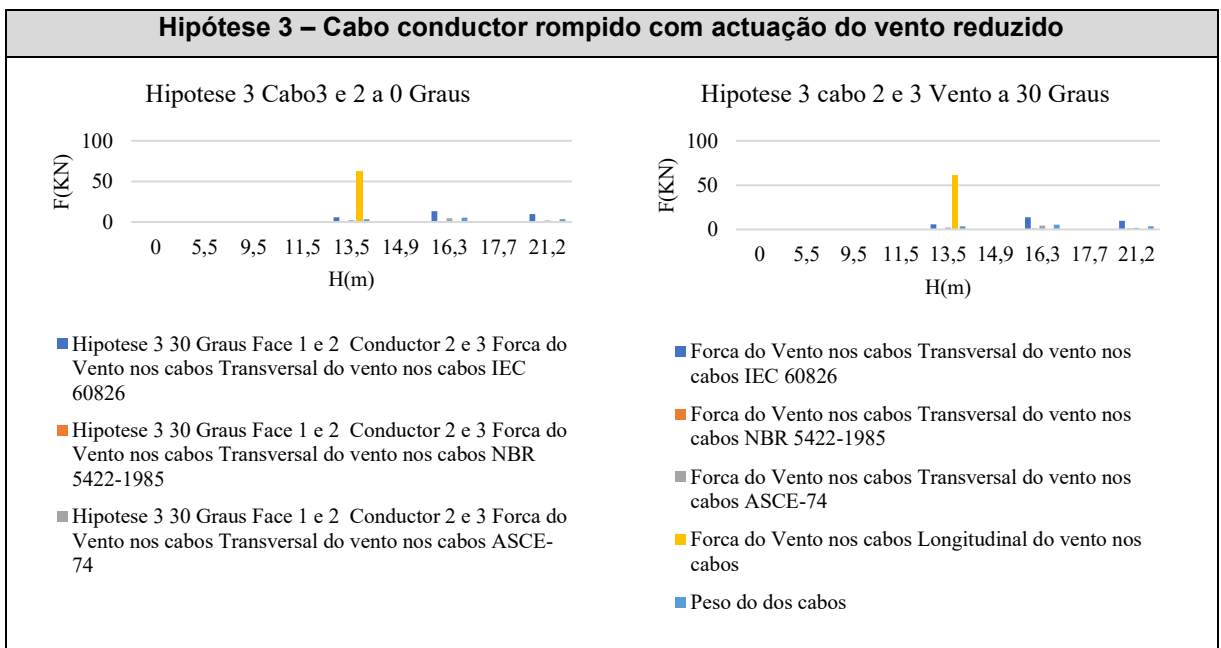
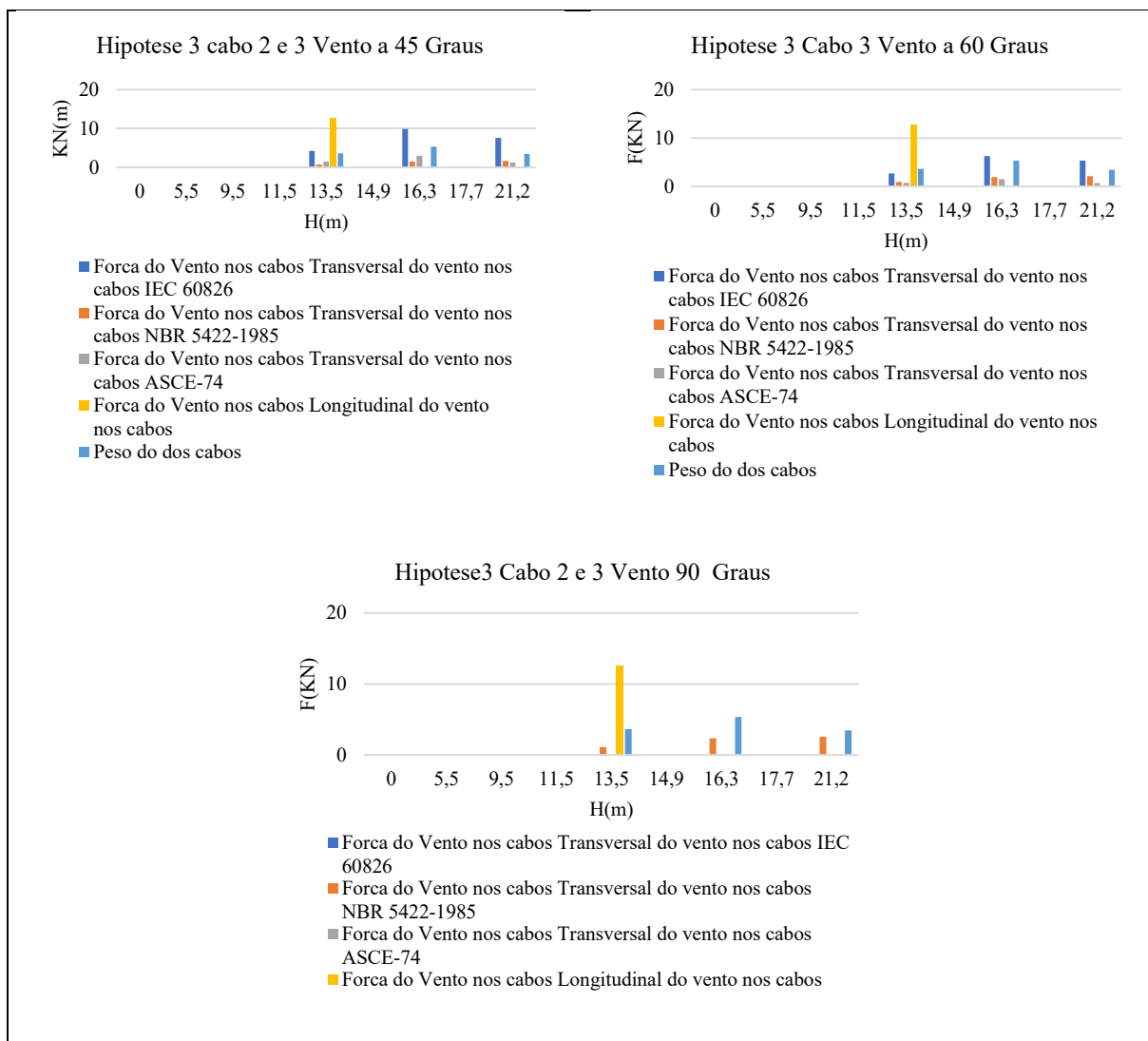


Tabela 31 Acção de Vento nos cabos, tendo em conta o cabo Conductor Rompido a 13,5 metros





3.5 AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DA TORRE

3.5.1 Combinação de acções

Tendo todas as acções individuais a aplicar sobre a estrutura, nomeadamente a acção do peso próprio e as forças devidas a incidência do vento nos mais diversos ângulos e hipóteses, procedeu-se com a combinação destas acções conforme o preconizado no Eurocódigo 3, com vista a verificação de segurança aos estados limites.

Para o caso das combinações fundamentais com vista a verificação aos Estados Limites Últimos, foram considerados os seguintes valores de coeficientes:

- Coeficiente de ponderação do peso próprio: $\gamma_g = 1,35$

- Coeficiente de ponderação da acção do vento: $\gamma_q = 1,5$

A expressão abaixo representa o valor da combinação para os Estados Limites Últimos:

$$F = 1,35(G_k) + 1,5(W_k) \quad (79)$$

3.5.2 Resultados de cálculos numéricos

Nas Figuras 42 a 45 são ilustrados uma amostra de resultados em termos de deformações, tensões máximas e mínimas, obtidos através de cálculos numéricos pelo modelo desenvolvido.

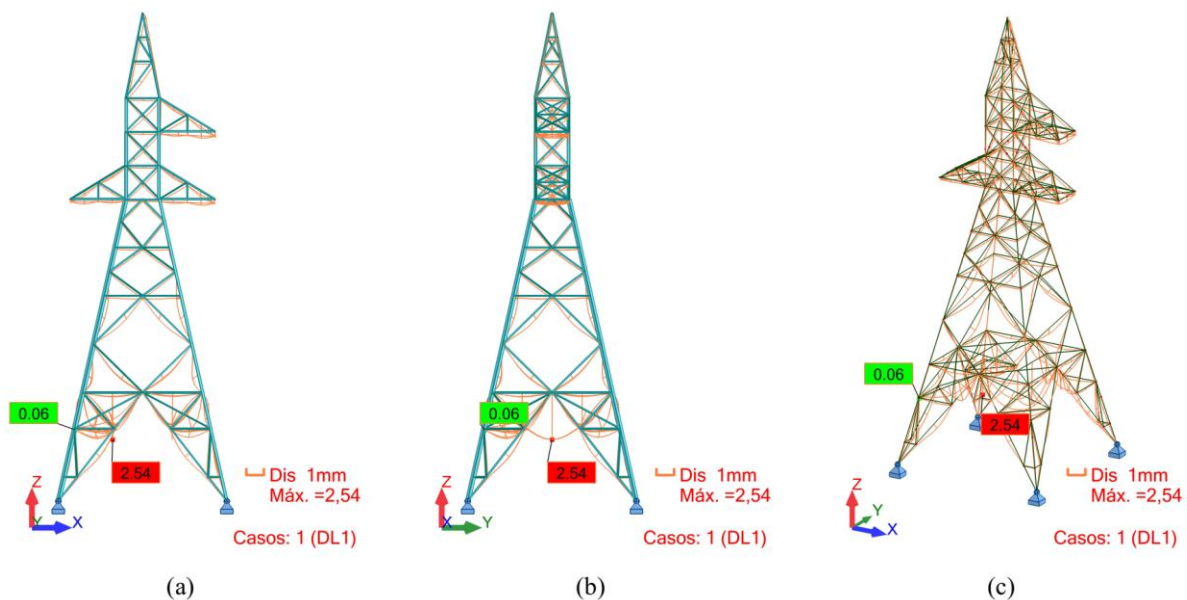


Figura 42 – Deformada da estrutura devido ao peso próprio: (a) vista frontal-XZ; (b) vista lateral YZ e (c) vista isométrica

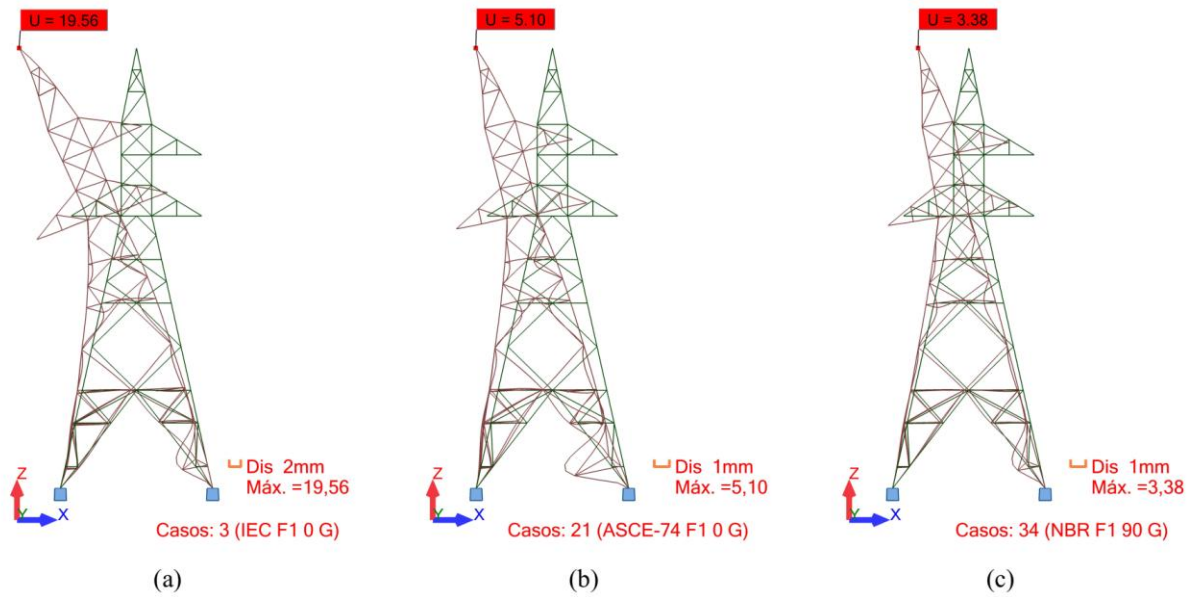


Figura 43 – Deformada da estrutura devido às forças do vento incidindo a 0° na Hipóteses 1 para diferentes normas: (a) IEC62826; (b) ASCE-74 e (c) NBR5482.

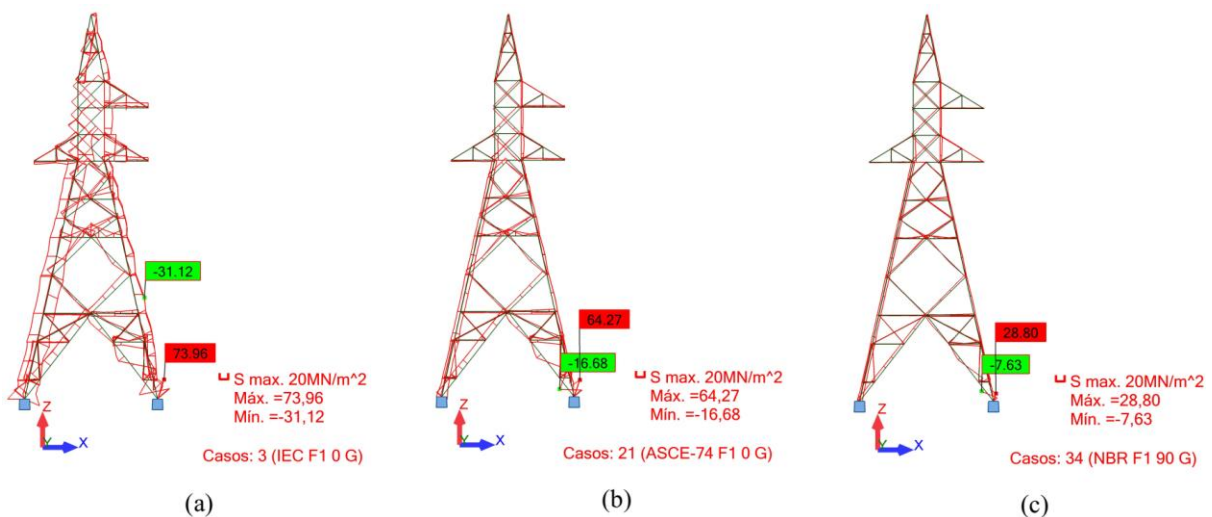


Figura 44 – Tensões nas barras devido às forças do vento incidindo a 0° na Hipóteses 1 para diferentes normas: (a) IEC62826; (b) ASCE-74 e (c) NBR5482.

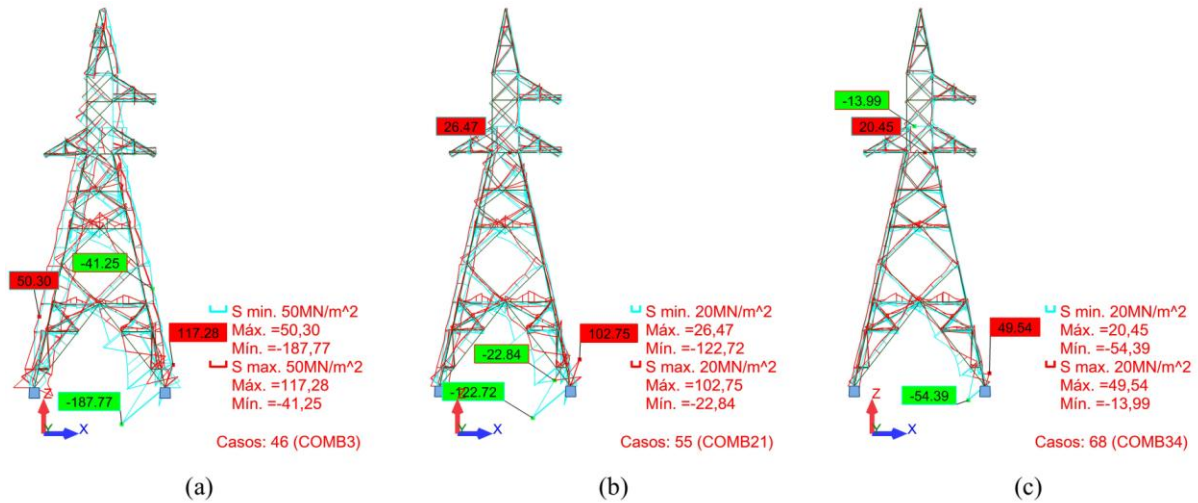


Figura 45 – Tensões máximas e mínimas nas barras devido às combinações fundamentais na Hipóteses 1 para diferentes normas: (a) IEC62826; (b) ASCE-74 e (c) NBR5482.

3.5.3 Análise e verificação da segurança

3.5.3.1 Verificação da Estabilidade Global da Estructura aos ELU

Para o cálculo da estabilidade Global, são considerados os casos mais desfavoráveis das acções horizontais, e verticais na Estructura. Com as reacções de apoios obtidos nestes casos, a verificação é feita nas duas direcções, x e y, como demonstrado na Tabela abaixo:

Tabela 32 Verificação da Estabilidade Global

Norma		IEC-60826		ASCE-74		NBR-5422	
Hipótese		Hip-1	Hip-2	Hip-1	Hip-2	Hip-1	Hip-2
Caso		52	132	52	132	52	132
Reações de apoios	H_{EDx}	108,79	108,58	70,94	47,28	35,01	23,35
	H_{EDy}	47,52	48,92	58,81	34,73	40,04	55,46
	V_{ED}	74,16	57,10	71,83	55,93	71,76	55,9
$0,15 V_{ED}$		11,12	8,57	10,77	8,39	10,76	8,39
Estabilidade x ($H_{Ed,x} = > 0,15 V_{Ed}$)		verifica	verifica	verifica	verifica	verifica	verifica
Estabilidade y ($H_{Ed,y} = > 0,15 V_{Ed}$)		verifica	verifica	verifica	verifica	verifica	verifica

Nota: A estrutura para todos os casos verifica a segurança global, sem a necessidade de verificação da flambagem

3.5.3.2 Verificação da segurança das Barras aos ELU

A verificação da segurança aos ELU das barras foi feita recorrendo, conforme já mencionado aos pressupostos do Euródigo 3. Foram identificadas as oito (08) barras mais solicitadas, sobre as quais foi possível verificar a segurança para as três Hipóteses de carregamentos com a consideração das três normas. Na Tabela 33 é apresentado de forma detalhada as equações e os resultados de verificação da segurança obtidos pela consideração dos esforços de cálculo obtidos pela aplicação da norma IEC 60826. E nas Figuras subsequentes (Figura 46, Figura 47 e Figura 48), são apresentados gráficos comparativos das tensões de cálculos nas mesmas barras para as diferentes Hipóteses de carregamento com a aplicação das três normas em análise.

Tabela 33 – Verificação da segurança aos ELU das 8 barras mais solicitadas pela IEC 60826

Barra	24	27	30	413	483	315	282	286
Perfil	130x130x10	50x50x5	50x50x5	50x50x5	130x130x10	50x50x5	45x45x5	45x45x5
N_{ED} (KN) (+) compressão (-) tracção	- 166,49	9,29	8,03	11,14	- 137,97	- 2,35	1,98	0,59
L(m)	13,11	1,29	1,29	1,29	13,11	1,40	1,18	1,18
N_{cr} $\frac{\pi^2 EI}{L^2}$	0,90	-	-	-	0,90	78,88	-	-
N_{Ed}/N_{cr}	185,09	-	-	-	153,39	0,03	-	-
Verificação a Flambagem $\frac{N_{ed}}{N_{cr}} > 0,04$	-	sim	sim	sim	-	-	sim	sim
$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}}$	8,40	-	-	-	8,40	0,90	-	-
$\Phi = [1 + 0,34(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$	37,14	-	-	-	37,14	1,02	-	-
$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$	0,01	-	-	-	0,01	0,66	-	-
NRd- Compressão (KN) $N_{RD} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}}$	-1065,00	-	-	-	-1065	-132	-	-
N tracção líquida $N_{u,RD} = \frac{0,9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}$	-	132	132	132	-	-	118,25	118,25
Mx	2,54	0,08	-0,1	0,07	2,49	0,04	0,01	0,01
M_{rdx}	17,9	0,84	0,84	0,84	17,9	0,67	0,67	0,67

Análise Comparativa de Normas de Dimensionamento de Torres de Alta Tensão Face a Acção de Ciclones

Barra	24	27	30	413	483	315	282	286
M_y	-3,77	0,27	0,37	0,28	1,3	0,37	0,09	0,09
$M_{r_{dy}}$	17,9	0,84	0,84	0,84	17,9	0,67	0,67	0,67
Tensão de calculo σ_{sd} [MPa]	191,72	134,11	170,83	137,96	130,34	139,32	45,76	42,52
Verificação $\frac{N_{ED}}{N_{RD}} + \frac{M_{xED}}{M_{xRD}} + \frac{M_{yED}}{M_{yRD}} \leq 1$	0,51	0,49	0,62	0,50	0,34	0,63	0,17	0,15
Observação	verifica	verifica	verifica	verifica	verifica	verifica	verifica	verifica

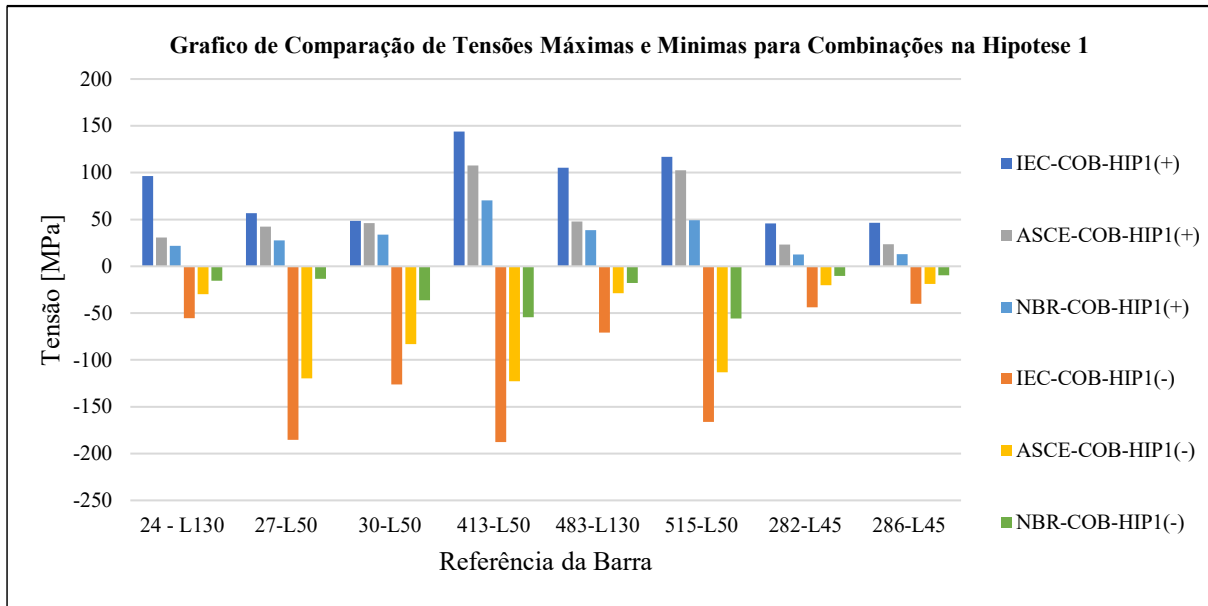


Figura 46 – Tensões máximas e mínimas nas 08 barras mais solicitadas devido às várias combinações na Hipótese 1 para as diferentes normas.

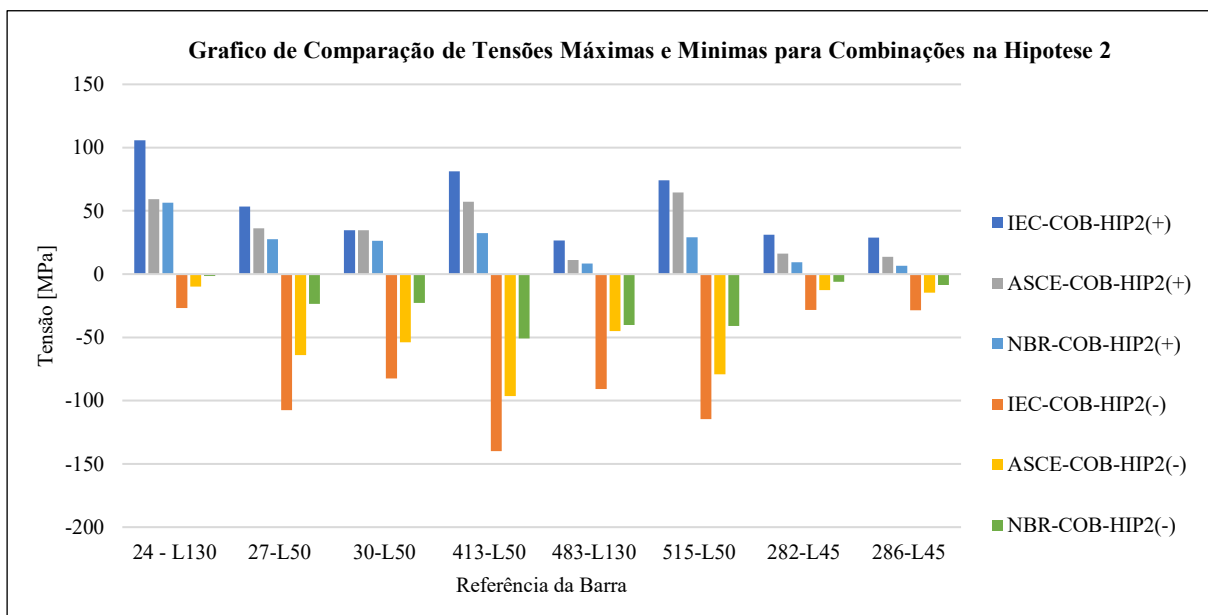


Figura 47 – Tensões máximas e mínimas nas 08 barras mais solicitadas devido às várias combinações na Hipótese 2 para as diferentes normas.

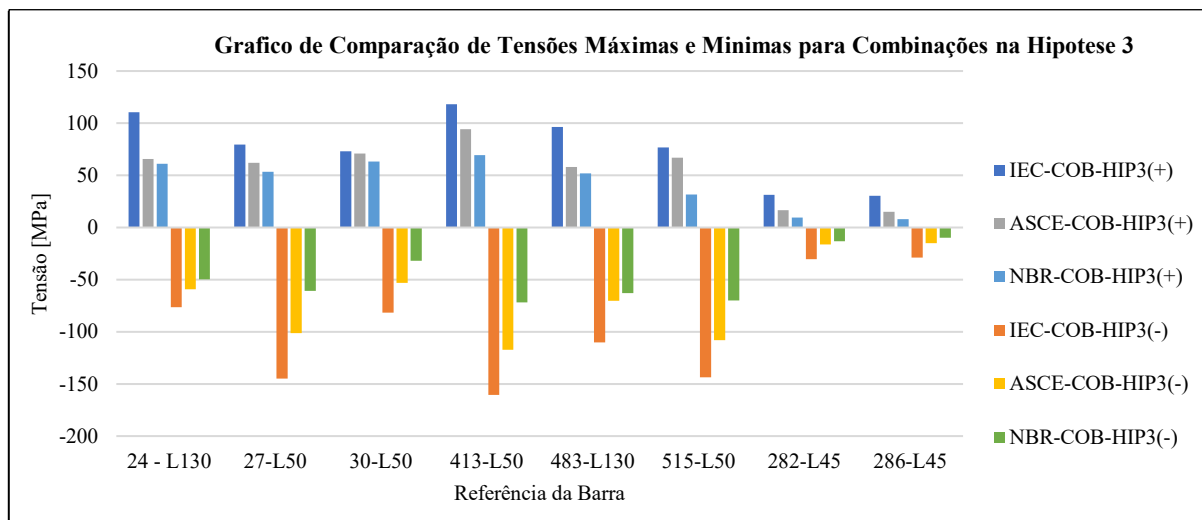


Figura 48 – Tensões máximas e mínimas nas 08 barras mais solicitadas devido às várias combinações na Hipótese 3 para as diferentes normas.

3.5.3.3 Verificação segurança das Ligações aos ELU em zonas mais solicitadas

A estrutura da torre em avaliação é constituída apenas por ligações aparafusadas, cujos elementos a verificar são, fundamentalmente, os próprios parafusos e as respectivas chapas de ligação. A Figura 49 e Figura 50 apresentam os pormenores típicos de duas ligações localizadas na mísula e na base, respectivamente. E na Tabela 34, são apresentados todos os cálculos de verificação da segurança aos ELU de ligações identificadas com esforços axiais máximos. E subsequentemente na Figura 51 são ilustrados os mesmos resultados de forma comparativa para as três normas em análise.

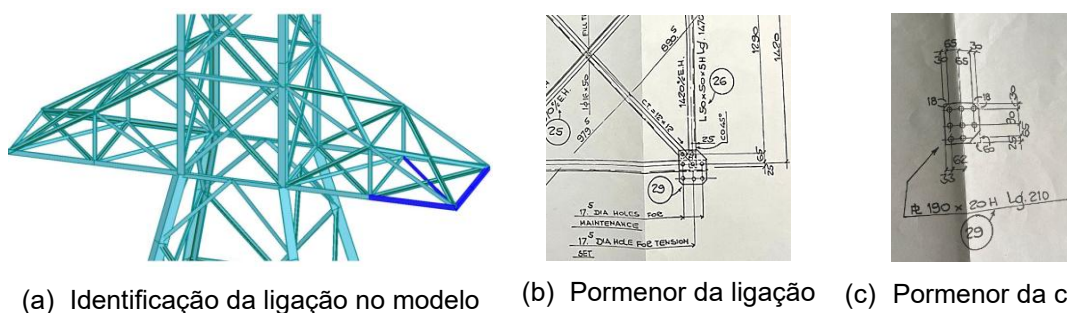
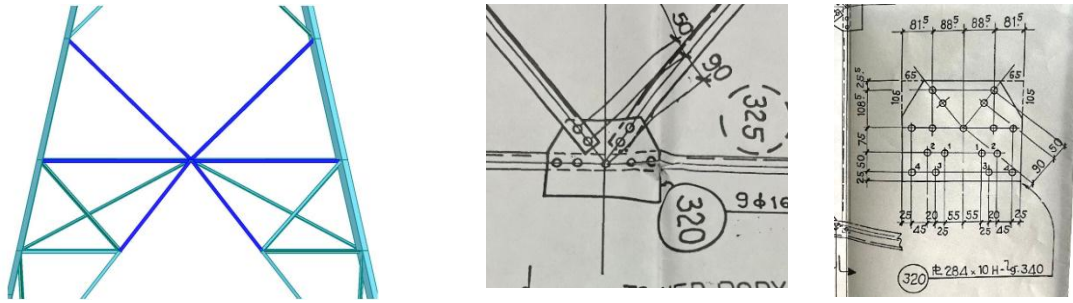


Figura 49 – Descrição da ligação, PL190x20, entre as barras inferiores de extremidade nas mísulas

Análise Comparativa de Normas de Dimensionamento de Torres de Alta Tensão Face a Acção de Ciclones



(a) Identificação da ligação no modelo (b) Pormenor da ligação (c) Pormenor da chapa

Figura 50 – Descrição da ligação, PL284x10, entre as barras inferiores de extremidade nas mísulas

Tabela 34 Verificação da Segurança das ligações mais solicitadas

Perfil das chapas	PL 284X10	L 100x100 x8	PL 185X8	PL 195X6	PL 175X8	PL140 x6	PL 110X6	PL145 x6	PL190 x20
Número. Nó da Ligação	216	77	74	133	137	141	200	135	201
Nrd corte dos parafusos $F_{V, RD}$ $= \frac{0,6 f_{ub} A_v n}{\gamma_{M2}}$	16,93	13,02	9,12	6,51	11,72	5,21	6,51	2,60	10,42
Nrd Chapa Área Bruta $N = \frac{f_y A}{\gamma_{M0}}$	793,60	791,62	372,00	290,16	347,20	208,3	793,60	215,7	942,40
Nrd Chapa Área Líquida $N_{u, RD}$ $= \frac{0,9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}$	777,60	442,37	345,60	269,57	322,56	192,9	777,60	201,6	864,00
Nrd Esmagamento $F_{b, RD}$ $= K_1 \alpha_b f_u \frac{dt}{\gamma_{M2}}$	21,12	16,90	16,90	16,90	16,90	12,67	21,12	12,67	42,24
Nrd da Ligação	274,56	168,96	122,45	124,12	152,06	130,8	105,6	80,34	260,44
Verificação com IEC-60826									

Análise Comparativa de Normas de Dimensionamento de Torres de Alta Tensão Face a Acção de Ciclones

Hipótese	3	3	2	2	2	2	3	3	3
Caso	109	109	79	79	79	79	109	109	109
NSd	4,38	154,97	121,28	121,28	121,28	121,2	61,36	64,99	64,99
Verificação (Nrd ≥ Nsd)	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica
Verificação com ASCE-74									
Hipótese	3	3	2	2	2	2	3	3	3
Caso	172	119	89	89	89	89	119	119	119
NSd	2,4	97,84	82,3	82,3	82,3	82,3	53,91	59,06	59,06
Verificação (Nrd ≥ Nsd)	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica
Verificação com NBR-5422									
Hipótese	3	3	2	2	2	2	3	3	3
Caso	130	130	101	101	101	101	130	130	130
NSd	0,2	91,46	79,84	79,84	79,84	79,84	53,78	57,71	57,71
Verificação (Nrd ≥ Nsd)	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica

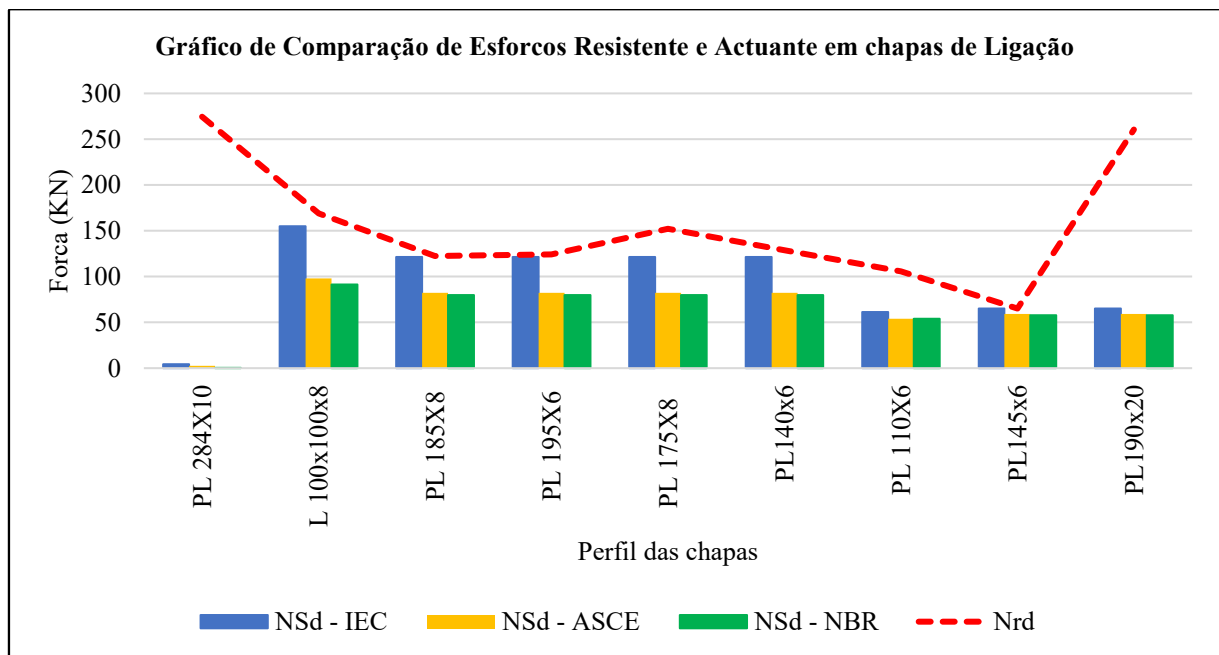


Figura 51 – Esforços axiais máximos resistentes e actuantes em chapas de ligação nas diferentes normas.

Capítulo 4

Conclusões e Recomendações

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

4.1 SOBRE AS FORÇAS DO VENTO

Do estudo levado à cabo sobre a torre Metálica, conclui-se que a quantificação dos ventos, tendo em conta as diferentes Normas, apresenta diferentes características.

Verificou-se que os três documentos tomam em consideração os efeitos topográficos e de geometria da estrutura, que traduzem a resistência que a rugosidade do solo e os obstáculos oferecem ao livre fluxo do vento.

Contudo, de forma específica, verificou-se que a IEC 60826 e a NBR5422-1985 usam o coeficiente de rugosidade (K_r) de forma directa para a conversão da velocidade de referência em velocidade de projecto, enquanto que a ASCE 74 considera primeiro o quadrado da velocidade de referência sem considerar o coeficiente ora mencionado, mas usa deste na quantificação da pressão dinâmica do vento. Referir ainda que nas duas primeiras normas (IEC e NBR) o coeficiente de rugosidade toma o valor de 0,67 enquanto que a ASCE confere-lhe o valor igual a unidade.

Em termos de factor de resposta à Rajada (G_T e G_C), apenas a IEC 60826 e a ASCE-74 consideram este efeito. Neste aspecto, A IEC apresenta valores de G_T e G_C de 3,7 e 2,7, respectivamente, enquanto que a ASCE apresenta valores de G_T e G_C 1,04 e 0,68, sendo os valores da IEC superiores em relação a ASCE em mais de 70%, com implicações directas nos valores das forças do vento sobre a estrutura.

Em termos de coeficientes de arrasto, todas as normas apresentam valores similares. A ASCE apresenta valores na ordem de 2,03 a 4 unidades (adimensional), enquanto que a IEC 60826 e a NBR 5422-1985 apresentam valores de coeficiente de arrasto na ordem de 2,2 a 4 unidades.

Em relação à quantificação do vento, como se observou nos gráficos, as máximas forças de vento sobre a estrutura ocorrem quando o vento incide a 45° apresentando os seguintes valores por cada norma: 15,11 kN para a norma IEC 60826; 4,0 kN para NBR e 4,88 kN para a ASCE. Com estes resultados, claramente se observa que os valores da IEC são cerca de 4 vezes mais que o das restantes normas. Refira-se ainda que nos cálculos das forças do vento a 45° a IEC e a NBR consideram a actuação simultânea do vento nas duas faces com a mesma intensidade, enquanto que a ASCE, considera actuação com diferentes intensidades.

4.2 SOBRE A SEGURANÇA DA ESTRUTURA

Com base nos resultados obtidos, observou-se que das diferentes hipóteses de carregamento, nomeadamente, estrutura com cabos intactos e vento máximo (Hipótese 1); cabo Pára-raios rompido com vento reduzido (Hipótese 2), cabo conductor rompido com vento reduzido (Hipótese 3), os casos que conduziram para situações mais desfavoráveis na estrutura, nas diferentes normas, foram os casos em que os cabos estavam intactos, com a incidência do vento actuando a 45° em relação a face transversal.

Neste cenário todas as verificações de segurança aos ELU pelas três normas verificaram, seja de estabilidade global assim como como local caracterizada pela verificação das barras e ligações. Contudo, fazendo-se as comparações normativas observou-se que:

- Para a barra 413, a mais solicitada, a tensão de cálculo obtida foi de 187,7 MPa pela IEC 60826, 122,72 MPa pela ASCE e 54,29 MPa pela NBR 5422, todas inferiores à tensão de cedência no valor 248 MPa. Sendo a IEC apresenta o maior valor de todos em cerca de 1,53 e 3,27 vezes mais em relação a ASCE e NBR respectivamente;
- Para a ligação mais solicitada, com o perfil da chapa 100x100x8, a força máxima de cálculo para IEC é de 154,97 kN e para ASCE é de 97,84 kN e para a NBR 91,46 kN. Igualmente neste caso a IEC apresenta valor maior na ordem de 1,58 e 1,69 vezes mais que a ASCE e NBR, respetivamente. Sendo que, estas duas últimas apresentam valores similares

- Em relação a estabilidade global todas as normas apresentam valores de segurança na mesma ordem de grandeza.

Com o exposto, conclui-se que a norma IEC em caso de dimensionamento tende a exigir maiores perfis ou com maior resistência e conseqüente maior robustez.

4.3 SOBRE O CONTEXTO NACIONAL

Em relação à aplicação das normas no contexto moçambicano, através deste estudo, recomenda-se a utilização da norma IEC, primeiro por ser de adopção Internacional e segundo por se apresentar com resultados mais conservadores no que diz respeito a segurança.

Para o caso da torre analisada todas as normas verificaram a segurança, mas poderão haver casos em que uma Torre ao ser dimensionada ou analisada verifique a segurança pelas normas Brasileira e Americana mas seja reprovada pela norma IEC. Esta conclusão não significa que estas normas devam entrar em desuso, mas chama-se a atenção aos contextos geográficos de aplicação das normas.

Para o nosso País, caracterizado por ter uma costa extensa, frequentemente assolada, nas últimas décadas por ciclones significativos, tal como forma os casos de ciclone ***Kenneth*** e ***Idai***, que para além de terem causado danos à vidas humanas, trouxeram grande desastre a nível de infra-estruturas, recomenda-se a adopção e ou revisão de normas que confirmem maiores resiliências e segurança às infra-estruturas em especial as torres de alta tensão.

4.4 SOBRE TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros recomenda-se que sejam feitas avaliações também a nível das Fundações, de forma a verificar, ainda mais, o impacto deste tipo de intempérie (ciclone), e que não seja somente verificada a segurança em relação aos ventos extremos mas também à maremotos, de modo a avaliar o seu efeito destrutivo, apesar do nosso país não apresentar no seu registo histórico, casos típicos de entrada de grandes quantidades de águas dos mares ao continente, à título de possibilidade de prognóstico, seria importante avaliar o impacto que teria numa torre de transmissão.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR CIVIL ENGINEERING 74ç Guidelines For Electrical Transmission Line structural Loading, Virginia, 1985, Estados Unidos da America, 173 p
- [2] AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY. Cyclonic scale. Glossary of meteorology. [S.l], 2012. Disponível em : <http://glossary.ametsoc.org/wiki/Cyclonic_scale>
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5422: **Projeto de linhas de transmissão de energia eléctrica - procedimento.** 1985 Rio de Janeiro, 66 p
- [4] BLESSMAN, J. 2005- **Introdução ao estudo das acções dinâmicas do vento.** Editora UFRGS, Porto Alegre, RS
- [5] EN 1993-1-1 (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings 2005
- [6] GONTIJO, C. R. 1994-**Cálculo de torres para linhas de transmissão.** IEA Editora, Belo Horizonte
- [7] **IEC 60826:** Design criteria of overhead transmission lines. 4. ed. Geneva, Switzerland, 2017.243 p.
- [8] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). IEC 60071-1: Insulation co-ordination–part 1: Definitions, principles and rules. 2006, 9. ed. Geneva, Switzerland, 70 p.
- [9] KIESSLING, F. et al. 2014-**Overhead power lines: planning, design, construction.** [S.l.]: Springer,

- [10] LABEGALINI, P. R. et al. **Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão**. 2. ed. Edgard Blucher LTDA, São Paulo
- [11] SIMIU, E.; YEO, D. 2019.-**Wind Effects on Structures: Modern Structural Design for Wind**. 4th. ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ

ANEXOS

Anexo 1

-Acção do Vento na Torre para as diferentes Normas a diferentes ângulos de incidência (0° , 30° , 45° , 60° e 90°)

IEC60826 (Face 1 e 2)

Hipótese 1 para 0 graus																	
H(m)	v_z $= v_R \left(\frac{H}{10}\right)^{0,28}$	q $= \frac{1}{2} \rho \mu (K_R v_{RB})^2$	Festruturas(KN) $A_t \left[(1+0,2) \left(\frac{S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta}{\sin^2 2\theta} + S_{t2} C_{xt2} \sin^2 \theta \right) \right] G_t$	F isolador(KN) $A_i = q C_{xi} G_t S_i$	F Condutor(KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L d L \sin^2 \Omega$	F pára raio(KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L d L \sin^2 \Omega$	ST1 (m2)	A1 (m2)	$\frac{\chi}{\left(\frac{ST_1}{A_1}\right)}$	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\chi}{\left(\frac{ST_2}{A_2}\right)}$	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 1	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	4,00	0,00	0,00	
5,5	24,37	363,74	11,90				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	3,60	3,60	10,00	1,19	
9,5	28,40	493,99	12,59				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,30	3,30	5,00	1,26	
11,5	29,96	549,77	6,50				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,90	2,90	5,00	1,30	
13,5	31,34	601,42	4,57	2,40	12,03		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	5,00	0,91	14,43
14,9	32,21	635,59	4,04				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,20	2,88	4,00	0,81	
16,3	33,03	668,37	3,04	2,67	14,48		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	2,00	0,76	17,15
17,7	33,80	699,93	4,45				0,78	1,96	0,40	0,75	3,57	0,21	2,20	2,88	4,00	2,22	
21,2	35,56	774,36	4,34	3,09		9,02	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,60	2,60	7,00	1,08	12,11
Hipótese 1 para 30 graus																	
H(m)	v_z $= v_R \left(\frac{H}{10}\right)^{0,28}$	q $= \frac{1}{2} \rho \mu (K_R v_{RB})^2$	Festruturas(KN) $A_t \left[(1+0,2) \left(\frac{S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta}{\sin^2 2\theta} + S_{t2} C_{xt2} \sin^2 \theta \right) \right] G_t$	F isolador(KN) $A_i = q C_{xi} G_t S_i$	F Condutor(KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L d L \sin^2 \Omega$	F pára raio(KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L d L \sin^2 \Omega$	ST1 (m2)	A1 (m2)	$\frac{\chi}{\left(\frac{ST_1}{A_1}\right)}$	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\chi}{\left(\frac{ST_2}{A_2}\right)}$	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 1	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	4,00	0,00	0,00	
5,5	24,37	363,74	13,69				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	3,60	3,60	20,00	0,68	
9,5	28,40	493,99	14,48				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,30	3,30	10,00	1,45	
11,5	29,96	549,77	7,47				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,90	2,90	10,00	0,75	
13,5	31,34	601,42	5,25	2,40	9,02		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	10,00	0,53	11,42
14,9	32,21	635,59	5,55				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,20	2,88	13,00	0,43	
16,3	33,03	668,37	3,50	2,67	10,86		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	4,00	0,87	13,53
17,7	33,80	699,93	6,44				0,78	1,96	0,40	0,75	3,57	0,21	2,80	2,80	9,00	0,72	
21,2	35,56	774,36	4,99	3,09		6,76	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,60	2,60	14,00	0,36	9,86
Hipótese 1 para 45 graus																	
H(m)	v_z $= v_R \left(\frac{H}{10}\right)^{0,28}$	q $= \frac{1}{2} \rho \mu (K_R v_{RB})^2$	Festruturas(KN) $A_t \left[(1+0,2) \left(\frac{S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta}{\sin^2 2\theta} + S_{t2} C_{xt2} \sin^2 \theta \right) \right] G_t$	F isolador(KN) $A_i = q C_{xi} G_t S_i$	F Condutor(KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L d L \sin^2 \Omega$	F pára raio(KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L d L \sin^2 \Omega$	ST1 (m2)	A1 (m2)	$\frac{\chi}{\left(\frac{ST_1}{A_1}\right)}$	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\chi}{\left(\frac{ST_2}{A_2}\right)}$	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 1	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	4,00	0,00	0,00	
5,5	24,37	363,74	14,28				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	3,60	3,60	20,00	0,71	
9,5	28,40	493,99	15,11				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,30	3,30	10,00	1,51	
11,5	29,96	549,77	7,80				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,90	2,90	10,00	0,78	
13,5	31,34	601,42	5,48	2,40	6,01		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	10,00	0,55	8,42
14,9	32,21	635,59	6,75				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,20	2,88	13,00	0,52	
16,3	33,03	668,37	3,65	2,67	7,24		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	4,00	0,91	9,91
17,7	33,80	699,93	6,64				0,78	1,96	0,40	0,75	3,57	0,21	2,80	2,80	9,00	0,74	

H(m)	vz(m/s) $v_z = v_R \left(\frac{H}{10}\right)^{0,28}$	q(N/m2) $q = \frac{1}{2} \rho v_z^2$	Festruturas(KN) $A_t \left[\frac{1+0,2}{\sin^2 2\theta} \left(S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta \right) \right] G_t$	F isolador(KN) $A_i = q C_{xi} G_t S_i$	F Condutor(KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L dL \sin^2 \Omega$	F pára raio(KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L dL \sin^2 \Omega$	ST1 (m2)	A1 (m2)	$\frac{\chi}{A_1} \left(\frac{ST_1}{A_1} \right)$	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\chi}{A_2} \left(\frac{ST_2}{A_2} \right)$	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 1	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores	
21,2	35,56	774,36	5,21	3,09			4,51	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,60	2,60	14,00	0,37	7,60
Hipótese 1 pára 60 graus																		
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	4,00	0,00	0,00		
5,5	24,37	363,74	13,69				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	3,60	3,60	20,00	0,68		
9,5	28,40	493,99	14,48				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,30	3,30	10,00	1,45		
11,5	29,96	549,77	7,47				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,90	2,90	10,00	0,75		
13,5	31,34	601,42	5,25	2,40	3,01		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	10,00	0,53	5,41	
14,9	32,21	635,59	7,37				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,20	2,88	13,00	0,57		
16,3	33,03	668,37	3,50	2,67	3,62		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	4,00	0,87	6,29	
17,7	33,80	699,93	6,30				0,78	1,96	0,40	0,75	3,57	0,21	2,80	2,80	9,00	0,70		
21,2	35,56	774,36	4,99	3,09			2,25	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,60	2,60	14,00	0,36	5,35
Hipótese 1 pára 90 graus																		
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	4,00	0,00	0,00		
5,5	24,37	363,74	11,90				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	3,60	3,60	10,00	1,19		
9,5	28,40	493,99	12,59				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,30	3,30	5,00	2,52		
11,5	29,96	549,77	6,50				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,90	2,90	5,00	1,30		
13,5	31,34	601,42	4,57	0,00	0,00		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	5,00	0,91	0,00	
14,9	32,21	635,59	7,20				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,20	2,88	9,00	0,80		
16,3	33,03	668,37	3,04	0,00	0,00		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	2,00	1,52	0,00	
17,7	33,80	699,93	5,42				0,78	1,96	0,40	0,75	3,57	0,21	2,80	2,80	5,00	1,08		
21,2	35,56	774,36	4,34	0,00			0,00	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,60	2,60	7,00	0,62	0,00

IEC60826 (Face 2 e 3)

Hipótese 1 pára 0 graus																		
H(m)	vz(m/s) $v_z = v_R \left(\frac{H}{10}\right)^{0,28}$	q(N/m2) $q = \frac{1}{2} \rho v_z^2$	Festruturas(KN) $A_t \left[\frac{1+0,2}{\sin^2 2\theta} \left(S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta \right) \right] G_t$	F isolador(KN) $A_i = q C_{xi} G_t S_i$	F Condutor(KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L dL \sin^2 \Omega$	F pára raio(KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L dL \sin^2 \Omega$	ST3 (m2)	A3 (m2)	$\frac{\chi}{A_3} \left(\frac{ST_3}{A_3} \right)$	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\chi}{A_2} \left(\frac{ST_2}{A_2} \right)$	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 1	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores	
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	4,00	0,00	0,00		
5,5	24,37	363,74	11,90				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	3,60	3,60	10,00	1,19		
9,5	28,40	493,99	12,59				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,30	3,30	5,00	2,52		
11,5	29,96	549,77	6,50				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,90	2,90	5,00	1,30		
13,5	31,34	601,42	4,57	2,40	12,03		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	5,00	0,91	14,43	

14,9	32,21	635,59	4,04				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,20	2,88	4,00	1,01	
16,3	33,03	668,37	3,04	2,67	14,48		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	2,00	1,52	17,15
17,7	33,80	699,93	3,19				0,43	1,96	0,22	0,75	3,57	0,21	2,86	2,88	2,00	1,59	
21,2	35,56	774,36	4,34	3,09		9,02	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,60	2,60	7,00	0,62	12,11
Hipótese 1 para 30 graus																	
H(m)	v_z $= v_R \left(\frac{H}{10}\right)^{0,28}$	q $= \frac{1}{2} \tau \mu (K_R v_{RB})^2$	Festutura(KN) $A_t \left[\frac{(1+0,2)}{\sin^2 2\theta} \left(S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta \right) + S_{t2} C_{xt2} \sin^2 \theta \right] G_t$	F isolador(KN) $A_i = q C_{xi} G_t S_i$	F Condutor(KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L d L \sin^2 \Omega$	F para raio(KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L d L \sin^2 \Omega$	ST3 (m2)	A3 (m2)	χ $\left(\frac{ST_3}{A_3}\right)$	ST2 (m2)	A2 (m2)	χ $\left(\frac{ST_2}{A_2}\right)$	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 1	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	4,00	0,00	0,00	
5,5	24,37	363,74	13,69				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	3,60	3,60	20,00	0,68	
9,5	28,40	493,99	14,48				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,30	3,30	10,00	1,45	
11,5	29,96	549,77	7,47				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,90	2,90	10,00	0,75	
13,5	31,34	601,42	5,25	2,40	9,02		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	10,00	0,53	11,42
14,9	32,21	635,59	5,55				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,20	2,88	13,00	0,43	
16,3	33,03	668,37	3,50	2,67	10,86		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	4,00	0,87	13,53
17,7	33,80	699,93	4,35				0,43	1,96	0,22	0,75	3,57	0,21	2,86	2,88	7,00	0,62	
21,2	35,56	774,36	4,99	3,09		6,76	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,60	2,60	14,00	0,36	9,86
Hipótese 1 para 45 graus																	
H(m)	v_z $= v_R \left(\frac{H}{10}\right)^{0,28}$	q $= \frac{1}{2} \tau \mu (K_R v_{RB})^2$	Festutura(KN) $A_t \left[\frac{(1+0,2)}{\sin^2 2\theta} \left(S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta \right) + S_{t2} C_{xt2} \sin^2 \theta \right] G_t$	F isolador(KN) $A_i = q C_{xi} G_t S_i$	F Condutor(KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L d L \sin^2 \Omega$	F para raio(KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L d L \sin^2 \Omega$	ST3 (m2)	A3 (m2)	χ $\left(\frac{ST_3}{A_3}\right)$	ST2 (m2)	A2 (m2)	χ $\left(\frac{ST_2}{A_2}\right)$	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 1	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	4,00	0,00	0,00	
5,5	24,37	363,74	14,28				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	3,60	3,60	20,00	0,71	
9,5	28,40	493,99	15,11				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,30	3,30	10,00	1,51	
11,5	29,96	549,77	7,80				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,90	2,90	10,00	0,78	
13,5	31,34	601,42	5,48	2,40	6,01		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	10,00	0,55	8,42
14,9	32,21	635,59	6,75				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,20	2,88	13,00	0,52	
16,3	33,03	668,37	3,65	2,67	7,24		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	4,00	0,91	9,91
17,7	33,80	699,93	5,25				0,43	1,96	0,22	0,75	3,57	0,21	2,86	2,88	7,00	0,75	
21,2	35,56	774,36	5,21	3,09		4,51	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,60	2,60	14,00	0,37	7,60
Hipótese 1 para 60 graus																	
H(m)	v_z $= v_R \left(\frac{H}{10}\right)^{0,28}$	q $= \frac{1}{2} \tau \mu (K_R v_{RB})^2$	Festutura(KN) $A_t \left[\frac{(1+0,2)}{\sin^2 2\theta} \left(S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta \right) + S_{t2} C_{xt2} \sin^2 \theta \right] G_t$	F isolador(KN) $A_i = q C_{xi} G_t S_i$	F Condutor(KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L d L \sin^2 \Omega$	F para raio(KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L d L \sin^2 \Omega$	ST3 (m2)	A3 (m2)	χ $\left(\frac{ST_3}{A_3}\right)$	ST2 (m2)	A2 (m2)	χ $\left(\frac{ST_2}{A_2}\right)$	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 1	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	4,00	0,00	0,00	
5,5	24,37	363,74	13,69				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	3,60	3,60	20,00	0,68	
9,5	28,40	493,99	14,48				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,30	3,30	10,00	1,45	
11,5	29,96	549,77	7,47				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,90	2,90	10,00	0,75	

13,5	31,34	601,42	5,25	2,40	3,01		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	10,00	0,53	5,41
14,9	32,21	635,59	7,37				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,20	2,88	13,00	0,57	
16,3	33,03	668,37	3,50	2,67	3,62		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	4,00	0,87	6,29
17,7	33,80	699,93	5,72				0,43	1,96	0,22	0,75	3,57	0,21	2,86	2,88	7,00	0,82	
21,2	35,56	774,36	4,99	3,09		2,25	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,60	2,60	14,00	0,36	5,35
Hipótese 1 pára 90 graus																	
H(m)	v_z $= v_R \left(\frac{H}{10}\right)^{0,28}$	q $= \frac{1}{2} \rho v_R^2 (K_R v_{RB})^2$	Festruturas(KN) $A_t \left[\left(\frac{1+0,2}{\sin^2 2\theta} \right) \left(S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta \right) + S_{t2} C_{xt2} \sin^2 \theta \right] G_t$	F isolador(KN) $A_i = q C_{xi} G_t S_i$	F Condutor(KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L dL \sin^2 \Omega$	F pára raio(KN) $A_c = q C_{xc} G_c G_L dL \sin^2 \Omega$	ST3 (m2)	A3 (m2)	χ $\left(\frac{ST_3}{A_3}\right)$	ST2 (m2)	A2 (m2)	χ $\left(\frac{ST_2}{A_2}\right)$	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 1	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	4,00	0,00	0	
5,5	24,37	363,74	11,90				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	3,60	3,60	10,00	1,19	
9,5	28,40	493,99	12,59				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,30	3,30	5,00	2,51	
11,5	29,96	549,77	6,50				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,90	2,90	5,00	1,29	
13,5	31,34	601,42	4,57	0,00	0,00		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	5,00	0,91	0
14,9	32,21	635,59	7,20				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,20	2,88	9,00	0,80	
16,3	33,03	668,37	3,04	0,00	0,00		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	2,00	1,52	0
17,7	33,80	699,93	5,57				0,43	1,96	0,22	0,75	3,57	0,21	2,86	2,88	5,00	1,11	
21,2	35,56	774,36	4,34	0,00		0,00	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,60	2,60	7,00	0,61	0

NBR 5422-1985 (Face 1 e 2)

Hipótese 1 pára 0 graus

H(m)	v_z $= K_T K_d v_T \left(\frac{h}{10}\right)^{0,18}$	q $= \frac{1}{2} \rho \mu (K_R v_{RB})^2$	Festruturas(KN) $A_t = q \left[\frac{(1+0,2)}{\sin^2 2\theta} \left(S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta + S_{t2} C_{xt2} \sin^2 \theta \right) \right]$	Fisolador(KN) $A_i = q C_{xi} S_i$	Fcondutor(KN) $A_c = q C_{xc} a d \frac{z}{2} \text{sen}^2 \theta$	F pára raio (KN) $A_c = q C_{xc} a d \frac{z}{2} \text{sen}^2 \theta$	ST1 (m2)	A1 (m2)	$\frac{\chi}{A_1}$	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\chi}{A_2}$	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 2	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	4,00	0	0,00	
5,5	25,87	409,94	4,03				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	4,00	4,00	10	0,40	
9,5	28,55	499,08	3,33				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,20	3,20	5	0,67	
11,5	29,54	534,62	1,71				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,90	2,90	5	0,34	
13,5	30,41	566,39	1,16	0,00	0,00		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	5	0,23	0,00
14,9	30,95	586,87	1,80				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,20	2,88	9	0,20	
16,3	31,46	606,15	0,75	0,00	0,00		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	2	0,37	0,00
17,7	31,93	624,40	1,34				0,78	1,96	0,40	0,75	3,57	0,21	2,20	2,87	5	0,27	
21,2	32,98	666,31	1,05	0,00		0,00	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,70	2,70	7	0,15	0,00

Hipótese 1 pára 30 graus

H(m)	v_z $= K_T K_d v_T \left(\frac{h}{10}\right)^{0,18}$	q $= \frac{1}{2} \rho \mu (K_R v_{RB})^2$	Festruturas(KN) $A_t = q \left[\frac{(1+0,2)}{\sin^2 2\theta} \left(S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta + S_{t2} C_{xt2} \sin^2 \theta \right) \right]$	Fisolador(KN) $A_i = q C_{xi} S_i$	Fcondutor(KN) $A_c = q C_{xc} a d \frac{z}{2} \text{sen}^2 \theta$	F pára raio (KN) $A_c = q C_{xc} a d \frac{z}{2} \text{sen}^2 \theta$	ST1 (m2)	A1 (m2)	$\frac{\chi}{A_1}$	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\chi}{A_2}$	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 2	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	4,00	0,00	0,00	
5,5	25,87	409,94	4,63				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	4,00	4,00	20,00	0,23	
9,5	28,55	499,08	3,83				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,20	3,20	10,00	0,38	
11,5	29,54	534,62	1,96				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,90	2,90	10,00	0,20	
13,5	30,41	566,39	1,34	0,61	0,39		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	10,00	0,13	1,00
14,9	30,95	586,87	1,84				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,20	2,88	13,00	0,14	
16,3	31,46	606,15	0,86	0,65	0,42		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	4,00	0,21	1,08
17,7	31,93	624,40	1,46				0,78	1,96	0,40	0,75	3,57	0,21	2,20	2,87	9,00	0,16	
21,2	32,98	666,31	1,20	0,72		0,46	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,70	2,70	14,00	0,09	1,18

Hipótese 1 pára 45 graus

H(m)	v_z $= K_T K_d v_T \left(\frac{h}{10}\right)^{0,18}$	q $= \frac{1}{2} \rho \mu (K_R v_{RB})^2$	Festruturas(KN) $A_t = q \left[\frac{(1+0,2)}{\sin^2 2\theta} \left(S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta + S_{t2} C_{xt2} \sin^2 \theta \right) \right]$	Fisolador(KN) $A_i = q C_{xi} S_i$	Fcondutor(KN) $A_c = q C_{xc} a d \frac{z}{2} \text{sen}^2 \theta$	F pára raio (KN) $A_c = q C_{xc} a d \frac{z}{2} \text{sen}^2 \theta$	ST1 (m2)	A1 (m2)	$\frac{\chi}{A_1}$	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\chi}{A_2}$	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 2	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	4,00	0,00	0,00	
5,5	25,87	409,94	4,83				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	4,00	4,00	20,00	0,24	
9,5	28,55	499,08	4,00				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,20	3,20	10,00	0,40	
11,5	29,54	534,62	2,05				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,90	2,90	10,00	0,20	

13,5	30,41	566,39	1,40	0,61	0,79		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	10,00	0,14	1,40
14,9	30,95	586,87	1,68				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,20	2,88	13,00	0,13	
16,3	31,46	606,15	0,89	0,65	0,84		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	4,00	0,22	1,50
17,7	31,93	624,40	1,45				0,78	1,96	0,40	0,75	3,57	0,21	2,20	2,87	9,00	0,16	
21,2	32,98	666,31	1,26	0,72		0,92	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,70	2,70	14,00	0,09	1,64

Hipótese 1 para 60 graus

H(m)	v_z $= K_T K_d v_T (\frac{h}{10})^{0,18}$	q $= \frac{1}{2} \rho \mu (K_R v_{RB})^2$	Festruturas(KN) $A_t = q \left[\frac{(1+0,2)}{\sin^2 2\theta} \left(S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta \right) \right]$	Fisolador(KN) $A_i = q C_{xi} S_i$	Fcondutor(KN) $A_c = q C_{xc} a d \frac{z}{2} \text{sen}^2 \theta$	F para raio (KN) $A_c = q C_{xc} a d \frac{z}{2} \text{sen}^2 \theta$	ST1 (m2)	A1 (m2)	$\frac{\chi}{A_1}$	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\chi}{A_2}$	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 2	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	4,00	0,00	0,00	
5,5	25,87	409,94	4,63				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	4,00	4,00	20,00	0,23	
9,5	28,55	499,08	3,83				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,20	3,20	10,00	0,38	
11,5	29,54	534,62	1,96				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,90	2,90	10,00	0,20	
13,5	30,41	566,39	1,34	0,61	1,18		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	10,00	0,13	1,79
14,9	30,95	586,87	1,39				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,20	2,88	13,00	0,11	
16,3	31,46	606,15	0,86	0,65	1,26		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	4,00	0,21	1,92
17,7	31,93	624,40	1,31				0,78	1,96	0,40	0,75	3,57	0,21	2,20	2,87	9,00	0,15	
21,2	32,98	666,31	1,20	0,72		1,39	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,70	2,70	14,00	0,09	2,11

Hipótese 1 para 90 graus

H(m)	v_z $= K_T K_d v_T (\frac{h}{10})^{0,18}$	q $= \frac{1}{2} \rho \mu (K_R v_{RB})^2$	Festruturas(KN) $A_t = q \left[\frac{(1+0,2)}{\sin^2 2\theta} \left(S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta \right) \right]$	Fisolador(KN) $A_i = q C_{xi} S_i$	Fcondutor(KN) $A_c = q C_{xc} a d \frac{z}{2} \text{sen}^2 \theta$	F para raio (KN) $A_c = q C_{xc} a d \frac{z}{2} \text{sen}^2 \theta$	ST1 (m2)	A1 (m2)	$\frac{\chi}{A_1}$	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\chi}{A_2}$	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 2	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	4,00	0,00	0,00	
5,5	25,87	409,94	4,03				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	4,00	4,00	10,00	0,40	
9,5	28,55	499,08	3,33				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,20	3,20	5,00	0,67	
11,5	29,54	534,62	1,71				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,90	2,90	5,00	0,34	
13,5	30,41	566,39	1,16	0,61	1,57		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	5,00	0,23	2,18
14,9	30,95	586,87	1,01				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,20	2,88	4,00	0,25	
16,3	31,46	606,15	0,75	0,65	1,68		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	2,00	0,37	2,34
17,7	31,93	624,40	1,07				0,78	1,96	0,40	0,75	3,57	0,21	2,20	2,87	4,00	0,27	
21,2	32,98	666,31	1,05	0,72		1,85	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,70	2,70	7,00	0,15	2,57

NBR5422 (Face 2 e 3)

Hipótese 1 para 0 graus

H(m)	v_z $= K_T K_d v_T (\frac{h}{10})^{0,18}$	q $= \frac{1}{2} \rho \mu (K_R v_{RB})^2$	Festruturas(KN) $A_t = q \left[\frac{(1+0,2)}{\sin^2 2\theta} \left(S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta \right) \right]$	Fisolador(KN) $A_i = q C_{xi} S_i$	Fcondutor(KN) $A_c = q C_{xc} a d \frac{z}{2} \text{sen}^2 \theta$	F para raio (KN) $A_c = q C_{xc} a d \frac{z}{2} \text{sen}^2 \theta$	ST3 (m2)	A3 (m2)	$\frac{\chi}{A_3}$	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\chi}{A_2}$	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 2	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos
------	--	--	--	---------------------------------------	---	--	----------	---------	--------------------	----------	---------	--------------------	------	------	---------------------	----------	---

H(m)	v(m/s)	q(N/m2)	Festrutur(KN)	Fisolador(KN)	Fcondutor(KN)	F pára raio (KN)	ST3 (m2)	A3 (m2)	χ ($\frac{ST_3}{A_3}$)	ST2 (m2)	A2 (m2)	χ ($\frac{ST_2}{A_2}$)	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 2	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores	
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4	4	0	0	cabos e nos Isoladores	
5,5	25,87	409,94	4,03				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	4	4,00	10,00	0,40		
9,5	28,55	499,08	3,33				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,2	3,20	5,00	0,67		
11,5	29,54	534,62	1,71				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,9	2,90	5,00	0,34		
13,5	30,41	566,39	1,16	0,00	0,00		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	5,00	0,23	0,00	
14,9	30,95	586,87	1,80				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,2	2,88	9,00	0,20		
16,3	31,46	606,15	0,75	0,00	0,00		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	2,00	0,37	0,00	
17,7	31,93	624,40	1,34				0,43	1,96	0,22	0,75	3,57	0,21	2,86	2,87	5,00	0,27		
21,2	32,98	666,31	1,05	0,00		0,00	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,7	2,70	7,00	0,15	0,00	
Hipótese 1 para 30 graus																		
H(m)	v(m/s)	q(N/m2)	Festrutur(KN)	Fisolador(KN)	Fcondutor(KN)	F pára raio (KN)	ST3 (m2)	A3 (m2)	χ ($\frac{ST_3}{A_3}$)	ST2 (m2)	A2 (m2)	χ ($\frac{ST_2}{A_2}$)	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 2	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores	
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4	4	0	0		
5,5	25,87	409,94	4,63				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	4	4,00	20,00	0,23		
9,5	28,55	499,08	3,83				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,2	3,20	10,00	0,38		
11,5	29,54	534,62	1,96				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,9	2,90	10,00	0,20		
13,5	30,41	566,39	1,34	0,61	0,39		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	10,00	0,13	1,00	
14,9	30,95	586,87	1,84				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,2	2,88	13,00	0,14		
16,3	31,46	606,15	0,86	0,65	0,42		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	4,00	0,21	1,08	
17,7	31,93	624,40	1,38				0,43	1,96	0,22	0,75	3,57	0,21	2,86	2,87	7,00	0,20		
21,2	32,98	666,31	1,20	0,72		0,46	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,7	2,70	14,00	0,09	1,18	
Hipótese 1 para 45 graus																		
H(m)	v(m/s)	q(N/m2)	Festrutur(KN)	Fisolador(KN)	Fcondutor(KN)	F pára raio (KN)	ST3 (m2)	A3 (m2)	χ ($\frac{ST_3}{A_3}$)	ST2 (m2)	A2 (m2)	χ ($\frac{ST_2}{A_2}$)	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 2	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores	
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4	4	0	0		
5,5	25,87	409,94	4,83				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	4	4,00	20,00	0,24		
9,5	28,55	499,08	4,00				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,2	3,20	10,00	0,40		
11,5	29,54	534,62	2,05				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,9	2,90	10,00	0,20		
13,5	30,41	566,39	1,40	0,61	0,79		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	10,00	0,14	1,40	
14,9	30,95	586,87	1,68				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,2	2,88	13,00	0,13		
16,3	31,46	606,15	0,89	0,65	0,84		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	4,00	0,22	1,50	
17,7	31,93	624,40	1,26				0,43	1,96	0,22	0,75	3,57	0,21	2,86	2,87	7,00	0,18		
21,2	32,98	666,31	1,26	0,72		0,92	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,7	2,70	14,00	0,09	1,64	
Hipótese 1 para 60 graus																		
H(m)	v(m/s)	q(N/m2)	Festrutur(KN)	Fisolador(KN)	Fcondutor(KN)	F pára raio (KN)	ST3 (m2)	A3 (m2)	χ	ST2 (m2)	A2 (m2)	χ	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 2	F por Nó	Força Total Devida a acção do	

	v_z $= K_r K_d v_T \left(\frac{h}{10}\right)^{0,18}$		A_t $= q \left[\frac{(1+0,2)}{\sin^2 2\theta} \left(S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta \right) \right]$		A_c $= q C_{xc} \alpha d \frac{z}{2} \text{sen}^2 \theta$	A_c $= q C_{xc} \alpha d \frac{z}{2} \text{sen}^2 \theta$			$\left(\frac{ST_3}{A_3}\right)$			$\left(\frac{ST_2}{A_2}\right)$						vento nos cabos e nos isoladores
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4	4	0	0		
5,5	25,87	409,94	4,63				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	4	4,00	10,00	0,46		
9,5	28,55	499,08	3,83				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,2	3,20	5,00	0,77		
11,5	29,54	534,62	1,96				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,9	2,90	5,00	0,39		
13,5	30,41	566,39	1,34	0,61	1,18		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	5,00	0,27	1,79	
14,9	30,95	586,87	1,39				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,2	2,88	4,00	0,35		
16,3	31,46	606,15	0,86	0,65	1,26		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	2,00	0,43	1,92	
17,7	31,93	624,40	1,05				0,43	1,96	0,22	0,75	3,57	0,21	2,86	2,87	4,00	0,26		
21,2	32,98	666,31	1,20	0,72		1,39	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,7	2,70	7,00	0,17	2,11	
Hipótese 1 para 90 graus																		
H(m)	v_z $= K_r K_d v_T \left(\frac{h}{10}\right)^{0,18}$	q $= \frac{1}{2} \rho \mu (K_R v_{RB})^2$	Festruturas(KN) A_t $= q \left[\frac{(1+0,2)}{\sin^2 2\theta} \left(S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta \right) \right]$	Fisolador(KN) $A_i = q C_{xi} S_i$	Fcondutor(KN) A_c $= q C_{xc} \alpha d \frac{z}{2} \text{sen}^2 \theta$	F para raio (KN) A_c $= q C_{xc} \alpha d \frac{z}{2} \text{sen}^2 \theta$	ST3 (m2)	A3 (m2)	χ $\left(\frac{ST_3}{A_3}\right)$	ST2 (m2)	A2 (m2)	χ $\left(\frac{ST_2}{A_2}\right)$	Cxt1	Cxt2	Nº de nós na Face 2	F por Nó	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos isoladores	
0,00	0,00	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4	4	0	0		
5,5	25,87	409,94	4,03				2,46	32,95	0,07	2,46	32,95	0,07	4	4,00	10,00	0,40		
9,5	28,55	499,08	3,33				2,09	16,34	0,13	2,09	16,34	0,13	3,2	3,20	5,00	0,67		
11,5	29,54	534,62	1,71				1,10	5,49	0,20	1,10	5,49	0,20	2,9	2,90	5,00	0,34		
13,5	30,41	566,39	1,16	0,61	1,57		0,70	3,70	0,19	0,70	3,70	0,19	2,94	2,94	5,00	0,23	2,18	
14,9	30,95	586,87	1,01				0,78	1,96	0,40	1,06	5,18	0,21	2,2	2,88	4,00	0,25		
16,3	31,46	606,15	0,75	0,65	1,68		0,43	1,96	0,22	0,43	1,96	0,22	2,86	2,86	2,00	0,37	2,34	
17,7	31,93	624,40	0,77				0,43	1,96	0,22	0,75	3,57	0,21	2,86	2,87	2,00	0,38		
21,2	32,98	666,31	1,05	0,72		1,85	0,58	2,45	0,24	0,58	2,45	0,24	2,7	2,70	7,00	0,15	2,57	

ASCE-74 (Face 1 e 2)

Hipótese 1 para 0 graus

H(m)	Pressão na Torre $P = QK_zK_{zt}G_T(V_{pr})^2$	Pressão nós cabos $P = QK_zK_{zt}G_C(V_{pr})^2$	F1 (KN)	F2 (KN)	F Condutor (KN)	F para raio (KN)	ST1 (m2)	A1 (m2)	$\frac{\Phi}{ST_1}$	Cf	Nº de Nós Face 1	F de Vento por Nó Face 1	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\Phi}{ST_2}$	Cf	Nº de Nós Face 2	F de Vento por Nó na Face 2	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00		0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	4,00	0	0,00	0,00	0,00	0	4,00	0	0,00	
5,5	0,96		8,74	0,00			2,46	32,95	0,07	3,71	10	0,87	2,46	32,95	0,074557596	3,71	10	0,00	
9,5	0,96		6,87	0,00			2,09	16,34	0,13	3,44	5	1,37	2,09	16,34	0,127778458	3,43	5	0,00	
11,5	0,96		3,23	0,00			1,10	5,49	0,20	3,06	5	0,65	1,10	5,49	0,200601093	3,05	5	0,00	
13,5	0,96	13,63	2,09	0,00	5,98		0,70	3,70	0,19	3,12	5	0,42	0,70	3,70	0,188958051	3,11	5	0,00	5,98
14,9	0,96		1,52	0,00			0,78	1,96	0,40	2,03	4	0,38	1,06	5,18	0,205366795	3,03	9	0,00	
16,3	0,96	13,63	1,22	0,00	5,98		0,43	1,96	0,22	2,96	2	0,61	0,43	1,96	0,219489796	2,95	2	0,00	5,98
17,7	0,96		1,52	0,00			0,78	1,96	0,40	2,03	4	0,38	0,75	3,57	0,209243697	3,01	5	0,00	
21,2	0,96	13,63	1,60	0,00		2,58	0,58	2,45	0,24	2,86	7	0,23	0,58	2,45	0,237673469	2,86	7	0,00	2,58

Hipótese 1 para 30 graus

H(m)	Pressão na Torre $P = QK_zK_{zt}G_T(V_{pr})^2$	Pressão nós cabos $P = QK_zK_{zt}G_C(V_{pr})^2$	F1 (KN)	F2 (KN)	F Condutor (KN)	F para raio (KN)	ST1 (m2)	A1 (m2)	$\frac{\Phi}{ST_1}$	Cf	Nº de Nós Face 1	F de Vento por Nó Face 1	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\Phi}{ST_2}$	Cf	Nº de Nós Face 2	F de Vento por Nó na Face 2	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00		0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	
5,5	0,96		7,57	4,37			2,46	32,95	0,07	3,71	10,00	0,76	2,46	32,95	0,07	3,71	10	0,44	
9,5	0,96		5,95	3,44			2,09	16,34	0,13	3,44	5,00	1,19	2,09	16,34	0,13	3,43	5	0,69	
11,5	0,96		2,79	1,61			1,10	5,49	0,20	3,06	5,00	0,56	1,10	5,49	0,20	3,05	5	0,32	
13,5	0,96	10,22	1,81	1,04	4,48		0,70	3,70	0,19	3,12	5,00	0,36	0,70	3,70	0,19	3,11	5	0,21	4,48
14,9	0,96		1,31	1,55			0,78	1,96	0,40	2,03	4,00	0,33	1,06	5,18	0,21	3,03	9	0,17	
16,3	0,96	10,22	1,06	0,61	4,48		0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0,53	0,43	1,96	0,22	2,95	2	0,30	4,48
17,7	0,96		1,31	1,08			0,78	1,96	0,40	2,03	4,00	0,33	0,75	3,57	0,21	3,01	5	0,22	
21,2	0,96	10,22	1,38	0,80		1,93	0,58	2,45	0,24	2,86	7,00	0,20	0,58	2,45	0,24	2,86	7	0,11	1,93

Hipótese 1 para 45 graus

H(m)	Pressão na Torre $P = QK_zK_{zt}G_T(V_{pr})^2$	Pressão nós cabos $P = QK_zK_{zt}G_C(V_{pr})^2$	F1 (KN)	F2 (KN)	F Condutor (KN)	F para raio (KN)	ST1 (m2)	A1 (m2)	$\frac{\Phi}{ST_1}$	Cf	Nº de Nós Face 1	F de Vento por Nó Face 1	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\Phi}{ST_2}$	Cf	Nº de Nós Face 2	F de Vento por Nó na Face 2	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00		0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	
5,5	0,96		6,18	6,18			2,46	32,95	0,07	3,71	10,00	0,62	2,46	32,95	0,07	3,71	10	0,62	
9,5	0,96		4,86	4,86			2,09	16,34	0,13	3,44	5,00	0,97	2,09	16,34	0,13	3,43	5	0,97	
11,5	0,96		2,28	2,28			1,10	5,49	0,20	3,06	5,00	0,46	1,10	5,49	0,20	3,05	5	0,46	
13,5	0,96	6,82	1,47	1,47	2,99		0,70	3,70	0,19	3,12	5,00	0,29	0,70	3,70	0,19	3,11	5	0,29	2,99
14,9	0,96		1,07	2,19			0,78	1,96	0,40	2,03	4,00	0,27	1,06	5,18	0,21	3,03	9	0,24	
16,3	0,96	6,82	0,86	0,86	2,99		0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0,43	0,43	1,96	0,22	2,95	2	0,43	2,99
17,7	0,96		1,07	1,52			0,78	1,96	0,40	2,03	4,00	0,27	0,75	3,57	0,21	3,01	5	0,30	

21,2	0,96	6,82	1,13	1,13		1,29	0,58	2,45	0,24	2,86	7,00	0,16	0,58	2,45	0,24	2,86	7	0,16	1,29
Hipótese 1 para 60 graus																			
H(m)	Pressão na Torre $P = QK_zK_{zt}G_T(V_{pr})^2$	Pressão nós cabos $P = QK_zK_{zt}G_C(V_{pr})^2$	F1 (KN)	F2 (KN)	F Condutor (KN)	F pára raio (KN)	ST1 (m2)	A1 (m2)	$\frac{\Phi}{ST_1}$	Cf	Nº de Nós Face 1	F de Vento por Nó Face 1	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\Phi}{ST_2}$	Cf	Nº de Nós Face 2	F de Vento por Nó na Face 2	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00		0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	
5,5	0,96		4,37	7,57			2,46	32,95	0,07	3,71	10,00	0,44	2,46	32,95	0,07	3,71	10	0,76	
9,5	0,96		3,44	5,95			2,09	16,34	0,13	3,44	5,00	0,69	2,09	16,34	0,13	3,43	5	1,19	
11,5	0,96		1,61	2,79			1,10	5,49	0,20	3,06	5,00	0,32	1,10	5,49	0,20	3,05	5	0,56	
13,5	0,96	3,41	1,04	1,81	1,49		0,70	3,70	0,19	3,12	5,00	0,21	0,70	3,70	0,19	3,11	5	0,36	1,49
14,9	0,96		0,76	2,68			0,78	1,96	0,40	2,03	4,00	0,19	1,06	5,18	0,21	3,03	9	0,30	
16,3	0,96	3,41	0,61	1,06	1,49		0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0,30	0,43	1,96	0,22	2,95	2	0,53	1,49
17,7	0,96		0,76	1,87			0,78	1,96	0,40	2,03	4,00	0,19	0,75	3,57	0,21	3,01	5	0,37	
21,2	0,96	3,41	0,80	1,38		0,64	0,58	2,45	0,24	2,86	7,00	0,11	0,58	2,45	0,24	2,86	7	0,20	0,64
Hipótese 1 para 90 graus																			
H(m)	Pressão na Torre $P = QK_zK_{zt}G_T(V_{pr})^2$	Pressão nós cabos $P = QK_zK_{zt}G_C(V_{pr})^2$	F1 (KN)	F2 (KN)	F Condutor (KN)	F pára raio (KN)	ST1 (m2)	A1 (m2)	$\frac{\Phi}{ST_1}$	Cf	Nº de Nós Face 1	F de Vento por Nó Face 1	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\Phi}{ST_2}$	Cf	Nº de Nós Face 2	F de Vento por Nó na Face 2	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00		0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	
5,5	0,96		0,00	8,74			2,46	32,95	0,07	3,71	10,00	0,00	2,46	32,95	0,07	3,71	10	0,87	
9,5	0,96		0,00	6,87			2,09	16,34	0,13	3,44	5,00	0,00	2,09	16,34	0,13	3,43	5	1,37	
11,5	0,96		0,00	3,23			1,10	5,49	0,20	3,06	5,00	0,00	1,10	5,49	0,20	3,05	5	0,65	
13,5	0,96	0,00	0,00	2,09	0,00		0,70	3,70	0,19	3,12	5,00	0,00	0,70	3,70	0,19	3,11	5	0,42	0
14,9	0,96		0,00	3,09			0,78	1,96	0,40	2,03	4,00	0,00	1,06	5,18	0,21	3,03	9	0,34	
16,3	0,96	0,00	0,00	1,22	0,00		0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0,00	0,43	1,96	0,22	2,95	2	0,61	0
17,7	0,96		0,00	2,16			0,78	1,96	0,40	2,03	4,00	0,00	0,75	3,57	0,21	3,01	5	0,43	
21,2	0,96	0,00	0,00	1,60		0,00	0,58	2,45	0,24	2,86	7,00	0,00	0,58	2,45	0,24	2,86	7	0,23	0

ASCE-74 (Face 2 e 3)

Hipótese 1 para 0 graus

H(m)	Pressão na Torre $P = QK_zK_{zt}G_T(V_{pr})^2$	Pressão nós cabos $P = QK_zK_{zt}G_C(V_{pr})^2$	F3 (KN)	F2 (KN)	F Condutor (KN)	F pára raio (KN)	ST3 (m2)	A3 (m2)	$\frac{\Phi}{A_3}$ $\frac{\Phi}{ST_3}$	Cf	Nº de Nós Face 3	F de Vento por Nó Face 3	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\Phi}{A_2}$ $\frac{\Phi}{ST_2}$	Cf	Nº de Nós Face 2	F de Vento por Nó na Face 2	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00		0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
5,50	0,96		8,74	0,00			2,46	32,95	0,07	3,71	10,00	0,87	2,45	32,95	0,07	3,71	10,00	0,00	
9,50	0,96		6,87	0,00			2,09	16,34	0,13	3,44	5,00	1,37	2,08	16,34	0,13	3,44	5,00	0,00	
11,50	0,96		3,23	0,00			1,10	5,49	0,20	3,06	5,00	0,65	1,10	5,49	0,20	3,06	5,00	0,00	
13,50	0,96	13,63	2,09	0,00	5,98		0,70	3,70	0,19	3,12	5,00	0,42	0,69	3,70	0,19	3,12	5,00	0,00	5,98
14,90	0,96		1,52	0,00			0,78	1,96	0,40	2,03	4,00	0,38	1,06	5,18	0,21	3,03	9,00	0,00	
16,30	0,96	13,63	1,22	0,00	5,98		0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0,61	0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0,00	5,98
17,70	0,96		1,22	0,00			0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0,61	0,74	3,57	0,21	3,01	5,00	0,00	
21,20	0,96	13,63	1,60	0,00		2,58	0,58	2,45	0,24	2,86	7,00	0,23	0,58	2,45	0,24	2,86	7,00	0,00	2,58

Hipótese 1 para 30 graus

H(m)	Pressão na Torre $P = QK_zK_{zt}G_T(V_{pr})^2$	Pressão nós cabos $P = QK_zK_{zt}G_C(V_{pr})^2$	F3 (KN)	F2 (KN)	F Condutor (KN)	F pára raio (KN)	ST3 (m2)	A3 (m2)	$\frac{\Phi}{A_3}$ $\frac{\Phi}{ST_3}$	Cf	Nº de Nós Face 3	F de Vento por Nó Face 3	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\Phi}{A_2}$ $\frac{\Phi}{ST_2}$	Cf	Nº de Nós Face 2	F de Vento por Nó na Face 2	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00		0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
5,50	0,96		7,57	4,37			2,46	32,95	0,07	3,71	10,00	0,76	2,45	32,95	0,07	3,71	10,00	0,44	
9,50	0,96		5,95	3,44			2,09	16,34	0,13	3,44	5,00	1,19	2,08	16,34	0,13	3,44	5,00	0,69	
11,50	0,96		2,79	1,61			1,10	5,49	0,20	3,06	5,00	0,56	1,10	5,49	0,20	3,06	5,00	0,32	
13,50	0,96	10,22	1,81	1,04	4,48		0,70	3,70	0,19	3,12	5,00	0,36	0,69	3,70	0,19	3,12	5,00	0,21	4,48
14,90	0,96		1,31	1,55			0,78	1,96	0,40	2,03	4,00	0,33	1,06	5,18	0,21	3,03	9,00	0,17	
16,30	0,96	10,22	1,06	0,61	4,48		0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0,53	0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0,30	4,48
17,70	0,96		1,06	1,08			0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0,53	0,74	3,57	0,21	3,01	5,00	0,22	
21,20	0,96	10,22	1,38	0,80		1,93	0,58	2,45	0,24	2,86	7,00	0,20	0,58	2,45	0,24	2,86	7,00	0,11	1,93

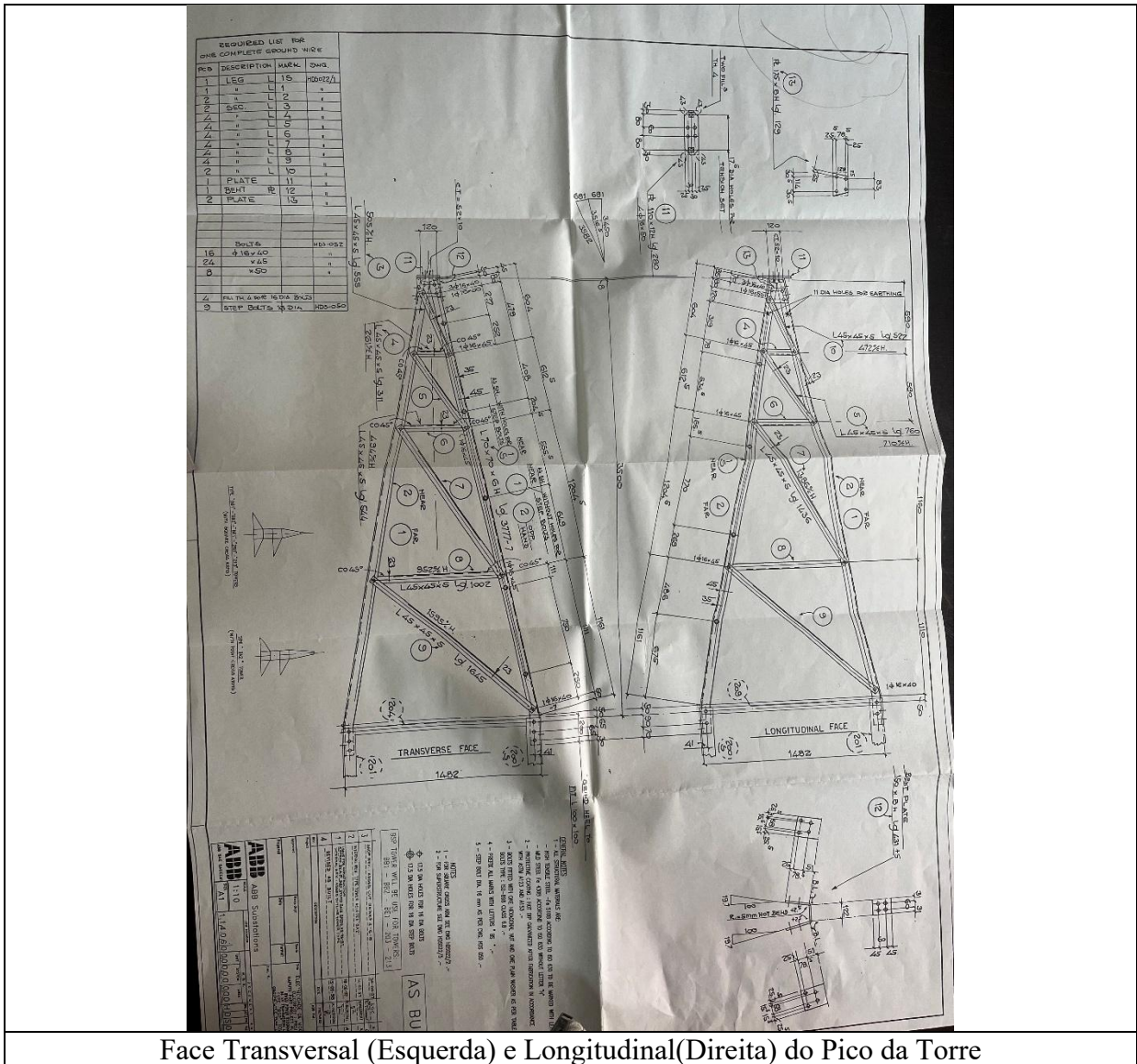
Hipótese 1 para 45 graus

H(m)	Pressão na Torre $P = QK_zK_{zt}G_T(V_{pr})^2$	Pressão nós cabos $P = QK_zK_{zt}G_C(V_{pr})^2$	F3 (KN)	F2 (KN)	F Condutor (KN)	F pára raio (KN)	ST3 (m2)	A3 (m2)	$\frac{\Phi}{A_3}$ $\frac{\Phi}{ST_3}$	Cf	Nº de Nós Face 3	F de Vento por Nó Face 3	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\Phi}{A_2}$ $\frac{\Phi}{ST_2}$	Cf	Nº de Nós Face 2	F de Vento por Nó na Face 2	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores
0,00	0,00		0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
5,50	0,96		6,18	6,18			2,46	32,95	0,07	3,71	10,00	0,62	2,45	32,95	0,07	3,71	10,00	0,62	
9,50	0,96		4,86	4,86			2,09	16,34	0,13	3,44	5,00	0,97	2,08	16,34	0,13	3,44	5,00	0,97	
11,50	0,96		2,28	2,28			1,10	5,49	0,20	3,06	5,00	0,46	1,10	5,49	0,20	3,06	5,00	0,46	
13,50	0,96	6,82	1,47	1,47	2,99		0,70	3,70	0,19	3,12	5,00	0,29	0,69	3,70	0,19	3,12	5,00	0,29	2,99
14,90	0,96		1,07	2,19			0,78	1,96	0,40	2,03	4,00	0,27	1,06	5,18	0,21	3,03	9,00	0,24	
16,30	0,96	6,82	0,86	0,86	2,99		0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0,43	0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0,43	2,99

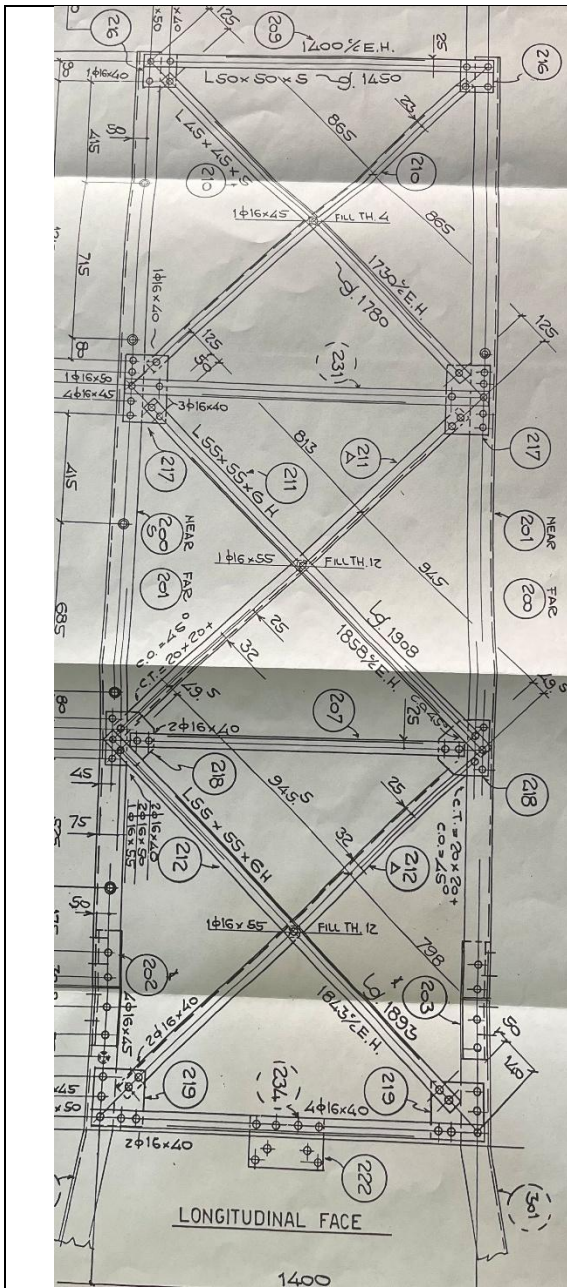
17,70	0,96		0,86	1,52			0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0,43	0,74	3,57	0,21	3,01	5,00	0,30		
21,20	0,96	6,82	1,13	1,13			1,29	0,58	2,45	0,24	2,86	7,00	0,16	0,58	2,45	0,24	2,86	7,00	0,16	1,29
Hipoteses 1 para 60 graus																				
H(m)	Pressão na Torre $P = QK_zK_{zt}G_T(V_{pr})^2$	Pressão nós cabos $P = QK_zK_{zt}G_C(V_{pr})^2$	F3 (KN)	F2 (KN)	F Condutor (KN)	F pára raio (KN)	ST3 (m2)	A3 (m2)	$\frac{\Phi}{ST_3}$	Cf	Nº de Nós Face 3	F de Vento por Nó Face 3	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\Phi}{ST_2}$	Cf	Nº de Nós Face 2	F de Vento por Nó na Face 2	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores	
0,00	0,00		0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
5,50	0,96		4,37	7,57			2,46	32,95	0,07	3,71	10,00	0,44	2,45	32,95	0,07	3,71	10,00	0,76		
9,50	0,96		3,44	5,95			2,09	16,34	0,13	3,44	5,00	0,69	2,08	16,34	0,13	3,44	5,00	1,19		
11,50	0,96		1,61	2,79			1,10	5,49	0,20	3,06	5,00	0,32	1,10	5,49	0,20	3,06	5,00	0,56		
13,50	0,96	3,41	1,04	1,81	1,49		0,70	3,70	0,19	3,12	5,00	0,21	0,69	3,70	0,19	3,12	5,00	0,36	1,49	
14,90	0,96		0,76	2,68			0,78	1,96	0,40	2,03	4,00	0,19	1,06	5,18	0,21	3,03	9,00	0,30		
16,30	0,96	3,41	0,61	1,06	1,49		0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0,30	0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0,53	1,49	
17,70	0,96		0,61	1,87			0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0,30	0,74	3,57	0,21	3,01	5,00	0,37		
21,20	0,96	3,41	0,80	1,38		0,64	0,58	2,45	0,24	2,86	7,00	0,11	0,58	2,45	0,24	2,86	7,00	0,20	0,64	
Hipoteses 1 para 90 graus																				
H(m)	Pressão na Torre $P = QK_zK_{zt}G_T(V_{pr})^2$	Pressão nós cabos $P = QK_zK_{zt}G_C(V_{pr})^2$	F3 (KN)	F2 (KN)	F Condutor (KN)	F pára raio (KN)	ST3 (m2)	A3 (m2)	$\frac{\Phi}{ST_3}$	Cf	Nº de Nós Face 3	F de Vento por Nó Face 3	ST2 (m2)	A2 (m2)	$\frac{\Phi}{ST_2}$	Cf	Nº de Nós Face 2	F de Vento por Nó na Face 2	Força Total Devida a acção do vento nos cabos e nos Isoladores	
0,00	0,00		0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
5,50	0,96		0,00	8,74			2,46	32,95	0,07	3,71	10,00	0	2,45	32,95	0,07	3,71	10,00	0,87		
9,50	0,96		0,00	6,87			2,09	16,34	0,13	3,44	5,00	0	2,08	16,34	0,13	3,44	5,00	1,37		
11,50	0,96		0,00	3,23			1,10	5,49	0,20	3,06	5,00	0	1,10	5,49	0,20	3,06	5,00	0,65		
13,50	0,96	0,00	0,00	2,09	0,00		0,70	3,70	0,19	3,12	5,00	0	0,69	3,70	0,19	3,12	5,00	0,42	0,00	
14,90	0,96		0,00	3,09			0,78	1,96	0,40	2,03	4,00	0	1,06	5,18	0,21	3,03	9,00	0,34		
16,30	0,96	0,00	0,00	1,22	0,00		0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0	0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0,61	0,00	
17,70	0,96		0,00	2,16			0,43	1,96	0,22	2,96	2,00	0	0,74	3,57	0,21	3,01	5,00	0,43		
21,20	0,96	0,00	0,00	1,60		0,00	0,58	2,45	0,24	2,86	7,00	0	0,58	2,45	0,24	2,86	7,00	0,23	0,00	

Anexo 2

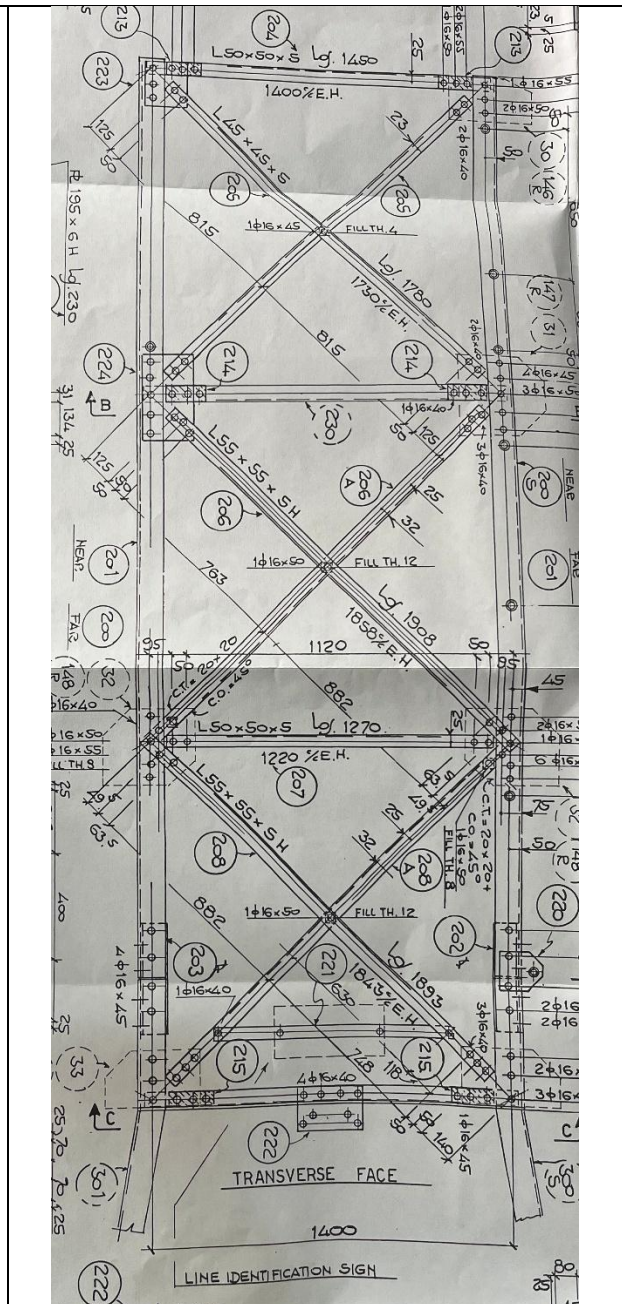
(Desenhos)



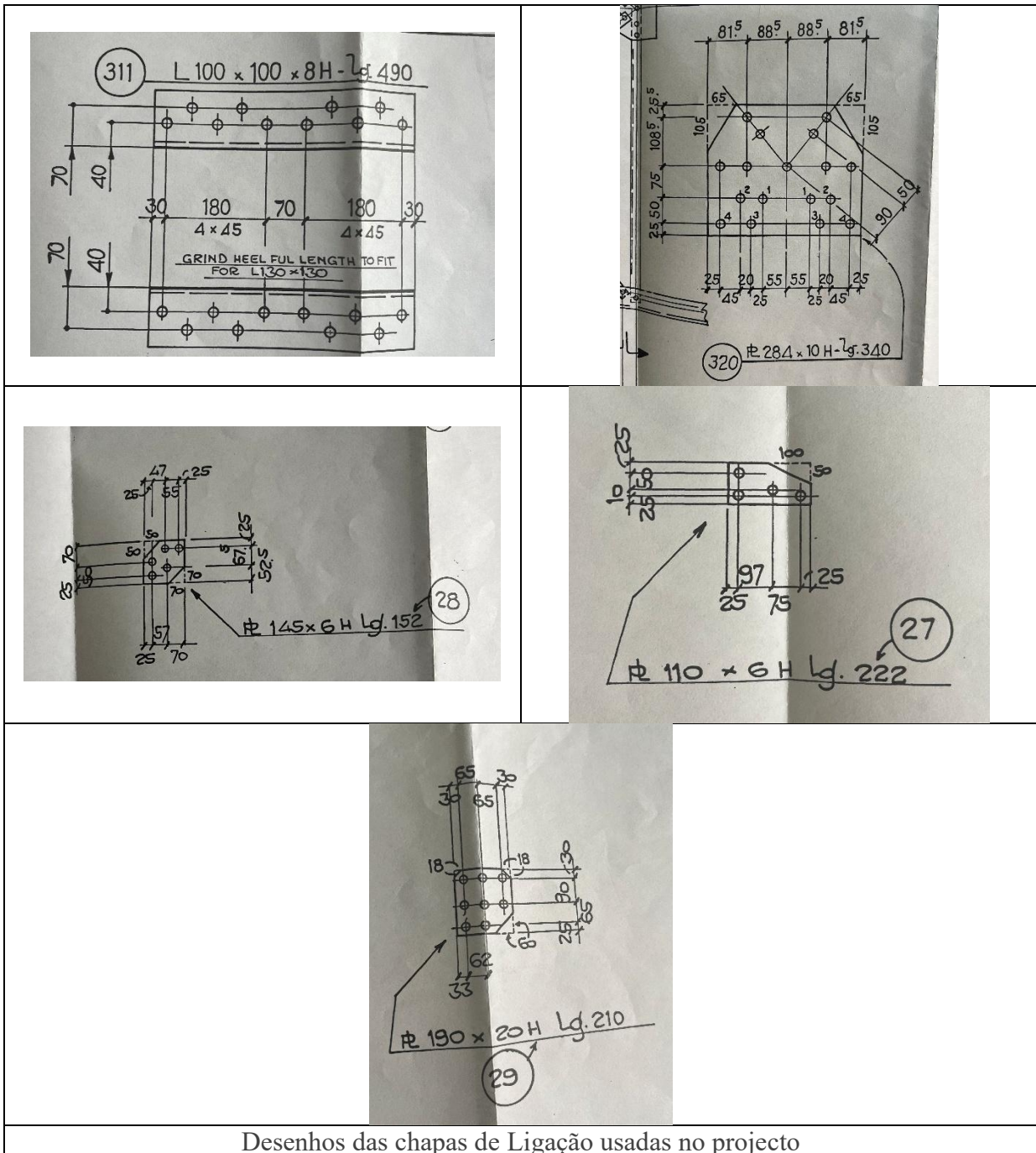
Análise Comparativa de Normas de Dimensionamento de Torres de Alta Tensão Face a Acção de Ciclones



Face Longitudinal à Linha (de 13,5 a 17,7 metros)



Face Transversal à Linha (de 13,5 a 17,7 metros)



Desenhos das chapas de Ligação usadas no projecto