



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Geziel Pereira da Silva


**Comportamento estrutural de torres de transmissão em aço
inoxidável**

Rio de Janeiro

2016

Geziel Pereira da Silva

Comportamento estrutural de torres de transmissão em aço inoxidável



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientadores: Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco
Prof. André Tenchini da Silva
Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Rio de Janeiro

2016

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S586 Silva, Geziel Pereira da.

Comportamento estrutural de torres de transmissão em aço
inoxidável / Geziel Pereira da Silva. – 2016.
111f.

Orientadores: Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco,
André Tenchini da Silva e Luciano Rodrigues Ornelas de Lima.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil. 2. Aço – Estrutura - Dissertações. 3. Aço
inoxidável - Dissertações. I. Vellasco, Pedro Colmar Gonçalves da
Silva. II. Silva, André Tenchini. III. Lima, Luciano Rodrigues
Ornelas de. IV. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. V.
Título.

CDU 624.016

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial
desta dissertação.

Assinatura

Data

Geziel Pereira da Silva

Comportamento estrutural de torres de transmissão em aço inoxidável

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de pós-Graduação em Engenharia Civil, da universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em:

Banca Examinadora:

Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco (Orientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. André Tenchini da Silva (Orientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Profa. Marília Garcia Diniz
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. João de Jesus dos Santos
Faculdade de Engenharia – CEFET-RJ

Rio de Janeiro

2016

DEDICATÓRIA

A Deus, por permitir mais essa vitória. Aos meus pais, pelo apoio e conselhos dados a mim, meus irmãos que são amigos fiéis e a minha amada esposa Thaise pelo apoio incondicional em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que sem a sua ajuda e sua presença em nós, não conseguiríamos estar de pé para realizar quaisquer feitos em nossa vidas.

A minha esposa, amiga e parceira Thaise, que nunca mediu esforços em me apoiar em meus projetos com toda a sua paciência, companheirismo e todo que me dedica.

A minha família, meus pais que com certeza serei grato eternamente pelo apoio e amor que me deram e dão em minha vida, meus irmãos pelo respeito e amor e amizade que não se pode medir pela sua grandeza.

Ao meu orientador, Prof. Pedro C. G. da S. Vellasco, pela oportunidade e atenção dispensada ao longo deste trabalho. Agradeço também pelo incentivo em minha vida profissional, em minha vida pessoal, pela confiança, pela amizade e orientação.

Aos meus orientadores, Prof. Doutor Luciano Rodrigues Ornelas de Lima e Prof. André Tenchini da Silva por toda a ajuda dispensada, pela excelente orientação, sempre indicando os melhores caminhos, dando estímulos para o desenvolvimento deste trabalho e pela amizade demonstrada nesses anos.

Aos professores, pelos ensinamentos, dentro e fora da sala de aula, durante a época da graduação e agora do mestrado, que foram e sempre serão de suma importância para a minha vida.

Aos meus colegas de mestrado, pelo companheirismo e pelo inegável apoio quando necessário, principalmente ao meu colega e amigo Leonardo de Souza Bastos que esteve em todos os momentos desta jornada acadêmica.

A UERJ, porque sem ela não poderia ter realizado este sonho de conquista.

A todos aqueles, que de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Feliz é o homem que acha sabedoria,
e o homem que adquire entendimento;
Pois melhor é o lucro que ela dá do que o lucro da prata,
e a sua renda do que o ouro.

Provérbios Cp.3 vs.13-14

RESUMO

SILVA, Geziel Pereira. *Comportamento estrutural de torres de transmissão em aço inoxidável*. 2016. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

Nos últimos anos, a crescente utilização do aço inoxidável como elemento estrutural vem despertando grande interesse de clientes, arquitetos e engenheiros. Apesar do seu custo inicial ainda elevado, a sua aplicação na construção civil vem substituindo outros aços tradicionais. Sua alta resistência à corrosão quando comparado ao aço carbono, aumenta consideravelmente a eficiência do projeto quando o custo de manutenção é considerado. Sua estética, proporcionando formas cada vez mais desafiadora, não só pelo seu apelo ambiental, gera menos resíduos ao meio ambiente e torna o planeta mais limpo. As torres de transmissão tem um papel muito importante no fornecimento de energia. Estas estruturas são responsáveis pelo transporte da energia gerada em usinas até os consumidores. Portanto, qualquer falha no sistema devido ao colapso estrutural das torres de transmissão acarretará em sanções pelo órgão regulador pois haverá interrupção do fornecimento de energia. Assim, é importante manter a integridade estrutural destas torres com manutenções preventivas. Em contrapartida, as torres estão sendo construídas em zonas com limitado acesso, dificultando ou onerando, qualquer intervenção que venha a ser realizada. Desta forma, este trabalho propõe examinar as vantagens técnicas-econômicas de torres de transmissão usando aço inoxidável nos elementos estruturais. Combinar uma estrutura onde a durabilidade é um importante fator a ser considerado com um aço reconhecido pela sua alta resistência à corrosão parece ser uma solução racional. Para obter valores adequados para investigar as vantagens do aço inoxidável, uma torre já existente foi utilizada como referência onde os elementos estruturais foram dimensionados usando cantoneiras de aço carbono galvanizado. Em adição, mais duas torres foram selecionadas com alturas diferentes para compor os casos de estudo. Portanto, três torres foram dimensionadas para cada tipo de aço, nomeadamente, aço carbono e aço inoxidável. Para investigar as vantagens econômicas, análises de custos foram realizadas levando em conta o investimento inicial para a construção das torres e os custos referente às manutenções preventivas a serem realizadas ao longo da vida. Ao analisar os resultados obtidos neste estudo, o aço inoxidável demonstrou ser uma solução eficiente em termos econômicos devido à sua durabilidade resultando em um custo menor comparado a solução com aço carbono.

Palavras-chave: Aço carbono; Aço inoxidável; Torres de Transmissão; Projeto Estrutural; Análise Não Linear; Análise de Custos.

ABSTRACT

SILVA, Geziel Pereira. Structural behavior of stainless steel transmission towers. 2016. 111f. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Faculty of Engineering, State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

In recent years, the increasing use of stainless steel as a structural element is attracting great interest of clients, architects and engineers. Despite its still high initial cost, its application in construction is replacing other traditional steels. Its high corrosion resistance when compared to carbon steel, greatly increases design efficiency when cost is considered. Its aesthetic, providing increasingly challenging ways, not only for its environmental appeal, generates less waste to the environment and make the planet cleaner. Transmission towers have a very important role in energy supply. These structures are responsible for the transport of the energy generated in power plants to consumers. Therefore, any system failure due to structural collapse of transmission towers will result in sanctions by the regulator as there will be interruption of power supply. Thus, it is important to maintain the structural integrity of these towers with preventive maintenance. In contrast, the towers are being built in areas with limited access, making it difficult or burdening any intervention that may be performed. Thus, this work proposes to examine the technical and economic advantages of transmission towers using stainless steel in structural elements. Combining a structure where durability is an important factor to be considered with a steel known for its high corrosion resistance appears to be a rational solution. For suitable values to investigate the advantages of stainless steel, an existing tower was used as a reference where the structural elements were sized using galvanized carbon steel angles. In addition, two more towers were selected with different heights to make the case studies. Therefore, three towers were designed for each type of steel include carbon and stainless steel. To investigate the economic advantages, cost analyzes were performed taking into account the initial investment for the construction of the towers and the costs related to preventive maintenance to be performed throughout life. When analyzing the results obtained in this study, stainless steel has proven to be an efficient solution in economic terms because of its durability resulting in a lower cost compared to the solution with carbon steel.

Keywords: Carbon steel; Stainless steel; Transmission Towers; Structural Design; Nonlinear Analysis ; Cost Analysis.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Comparação de preços (http://www.worldsteelprices.com , 2016)..... | 18 |
| Figura 2: Torre de linha de transmissão em colapso..... | 19 |
| Figura 3: Edifício Chrysler em Nova York [3]..... | 23 |
| Figura 4: Consumo aparente de aço inoxidável no Brasil [4] | 24 |
| Figura 5: Produção de aço inoxidável global [5]..... | 25 |
| Figura 6: Curvas tensão <i>versus</i> deformação [6]..... | 28 |
| Figura 7: Exemplo de uma linha de transmissão [8]..... | 31 |
| Figura 8: Principais fontes de geração de energia elétrica no Brasil [9]..... | 33 |
| Figura 9: Torre metálica autoportante de cantoneira quadrada [10]..... | 35 |
| Figura 10: Torre metálica autoportante de chapa dobrada triangular [11]..... | 35 |
| Figura 11: Torre autoportante de tubo triangular [10]..... | 36 |
| Figura 12: Torres de linhas de transmissão autoportantes [12]..... | 37 |
| Figura 13: Torre estaiada em aço triangular [14]..... | 39 |
| Figura 14: Torre metálica estaiada irradiante [15]..... | 40 |
| Figura 15: Torre de transmissão TE6..... | 48 |
| Figura 16: Esquema estrutural dos estudos de caso. | 49 |
| Figura 17: Estudos de casos modelados no Autodesk Robot Structural Analysis..... | 51 |
| Figura 18: Hipóteses de carregamento 1, 2, 3. | 54 |
| Figura 19: Hipóteses de carregamento 4, 5, 6. | 55 |
| Figura 20: Hipóteses de carregamento 7, 8, 9. | 56 |
| Figura 21: Resultados estudo de caso 1..... | 67 |
| Figura 22: Resultados estudo de caso 2..... | 68 |
| Figura 23: Resultados estudo de caso 3..... | 69 |
| Figura 24:Gráfico custos FJVP estudo de caso 1 | 85 |
| Figura 25:Gráfico custos FJVP estudo de caso 2 | 85 |
| Figura 26:Gráfico custos FJVP estudo de caso 3 | 85 |
| Figura 27: Gráfico custos FJVP estudo de caso 1, equivalente em US\$ | 86 |
| Figura 28: Gráfico custos FJVP caso de estudo 2, equivalente em US\$ | 86 |
| Figura 29: Gráfico custos FJVP estudo de caso 3, equivalente em US\$ | 86 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Peso Total das Torres | 70 |
| Tabela 2: Ciclo de vida dos materiais [31]..... | 74 |
| Tabela 3: Preço unitário po kg de aço..... | 75 |
| Tabela 4: Custos de construção para os três estudos de caso. 1 US\$ = R\$ 3,54 | 76 |
| Tabela 5: Custos manutenção torres. 1 US\$ = R\$ 3,54 | 78 |
| Tabela 6: Valores calculados para os FJVF e FJVP para uma manutenção Periódica de 3 em 3 anos..... | 79 |
| Tabela 7: Custos contábeis e valor presente relativo ao CCV estudo de caso 1. | 81 |
| Tabela 8: Custos contábeis e valor presente relativo ao CCV estudo de caso 2. | 81 |
| Tabela 9: Custos contábeis e valor presente relativo ao CCV estudo de caso 3. | 82 |
| Tabela 10: Custos contábeis e valor presente relativo ao CCV estudo de caso 1, equivalentes em US\$. | 83 |
| Tabela 11: Custos contábeis e valor presente relativo ao CCV estudo de caso 2, equivalentes em US\$. | 83 |
| Tabela 12: Custos contábeis e valor presente relativo ao CCV estudo de caso 3, equivalentes em US\$. | 84 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------|--|
| ANEEL | Agencia Nacional de Energia Elétrica |
| AT | Alta Tensão |
| EPC | Equipamentos de Proteção Coletiva |
| EPI | Equipamento de Proteção Individual |
| EUROCODE | European Committee for Standardisation |
| NBR | Norma Brasileira |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| LTA | Linha de Transmissão Aérea |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------|--|
| A | área da seção transversal |
| A_v | área resistente ao esforço cortante |
| A_{net} | área útil de uma seção transversal |
| AP | carga axial permanente no pilar |
| b | largura da mesa |
| C | comprimento |
| C_{My} | coeficiente de momento uniforme equivalente no eixo de maior inércia |
| C_{Mz} | coeficiente de momento uniforme equivalente no eixo de menor inércia |
| d_0 | diâmetro do furo |
| E | módulo de elasticidade longitudinal |
| e_2 | distância dos furos a extremidade lateral da cantoneira |
| f_u | tensão última do aço |
| f_y | limite de escoamento do aço |
| G | módulo de elasticidade transversal |
| h | altura do perfil |
| h_w | altura da alma |
| H_i | carga horizontal |
| h_i | comprimento do pilar |
| i_i | raio de giração |
| k_{yy} | fator de interação |
| k_{yz} | fator de interação |
| k_{zz} | fator de interação |
| K_{zy} | fator de interação |
| k_r | fator de redução para o aço inoxidável |
| $l_{e,i}$ | comprimento equivalente |
| M_{Ed} | valor de cálculo do momento fletor atuante |
| $M_{c,Rd}$ | valor de cálculo do momento fletor resistente |
| $M_{pl,Rd}$ | valor de cálculo do momento fletor plástico resistente |
| $M_{y,Ed}$ | valor de cálculo do momento máximo no elemento em relação ao eixo y-y |
| $M_{z,Ed}$ | valor de cálculo do momento máximo no elemento em relação ao eixo z-z |
| N_{Rk} | valor característico do esforço normal resistente da seção transversal |

| | |
|----------------|--|
| $N_{pl,rd}$ | valor de cálculo do esforço normal resistente plástico da secção bruta |
| $N_{u,rd}$ | força última de projeto de ruptura da seção líquida |
| N_{Ed} | valor de cálculo do esforço normal atuante |
| $N_{c,rd}$ | valor de cálculo do esforço normal resistente à compressão |
| $N_{t,rd}$ | valor de cálculo do esforço normal resistente de tração |
| $N_{b,rd}$ | valor de cálculo da resistência à flambagem do elemento comprimido |
| P_i | carga axial no pilar |
| r | raio de concordância |
| t | espessura do elemento |
| t_f | espessura da mesa |
| t_w | espessura da alma |
| u | constante usada no cálculo da ligação inoxidável |
| W_{pl} | módulo plástico de flexão |
| V_{Ed} | valor de cálculo do esforço cortante atuante |
| $V_{c,Rd}$ | valor de cálculo do esforço cortante resistente |
| $V_{pl,Rd}$ | resistência plástica ao cortante de cálculo |
| V_i | carga axial no pilar |
| ε | deformação |
| γ_{M0} | coeficiente de resistência |
| γ_{M1} | coeficiente de resistência |
| γ_{M2} | coeficiente de resistência |
| χ | coeficiente de redução associado a flambagem |
| Φ | valor para determinar o coeficiente de redução χ |
| α | fator de imperfeição para a flambagem de elementos comprimidos |
| χ_{LT} | coeficiente de redução para a flambagem lateral |
| ϕ_{LT} | coeficiente para determinar de χ_{LT} |
| α_{LT} | fator de imperfeição para a flambagem lateral |
| λ_{LT} | esbelteza normalizada para a flambagem lateral |
| ψ | relação entre os momentos de extremidade |
| χ_y | coeficiente de redução devido à flambagem por flexão no eixo y-y |
| χ_z | coeficiente de redução devido à flambagem por flexão no eixo z-z |
| χ_{LT} | coeficiente de redução devido à flambagem lateral |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| INTRODUÇÃO | 17 |
| 1 AÇO INOXIDÁVEL | 22 |
| 1.1 Histórico..... | 22 |
| 1.2 O uso do aço inoxidável | 23 |
| 1.3 Comportamento mecânico e composição química..... | 25 |
| 1.4 Arquitetura sustentável com aço inoxidável | 28 |
| 2 TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA | 31 |
| 2.1 Sistema de transmissão de energia elétrica..... | 32 |
| 2.1.1 Torres de linhas de transmissão | 33 |
| 2.1.2 Tipos de torres | 34 |
| 2.2 Manutenção em linhas de transmissão de energia elétrica | 40 |
| 2.2.1 Tipos de inspeções em torres de linhas de transmissão..... | 41 |
| 3 ESTUDOS DE CASOS | 47 |
| 3.1 Descrição da estrutura..... | 47 |
| 3.2 Análise estrutural | 50 |
| 3.3 Carregamento e combinações de carga..... | 52 |
| 3.4 Dimensionamento estrutural..... | 56 |
| 3.4.1 Estruturas em aço carbono | 57 |
| 3.4.2 Estruturas em aço inoxidável | 62 |
| 3.5 Resultados | 65 |
| 4 ANÁLISE ECONÔMICA | 71 |
| 4.1 Estimativa do ciclo de vida..... | 74 |
| 4.2 Preços dos Perfis | 74 |
| 4.3 Comparação de custos..... | 75 |
| 4.3.1 Custos para a construção..... | 75 |
| 4.3.2 Custos de manutenção..... | 77 |
| 4.4 Análise monetária | 79 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 87 |
| 5.1 Introdução..... | 87 |
| 5.2 Principais contribuições..... | 88 |
| 5.3 Custos | 88 |
| 5.4 Conclusões | 89 |

| | |
|---|------------|
| 5.5 Sugestões para trabalhos futuros | 90 |
| REFERÊNCIAS..... | 91 |
| ANEXO I – TABELA DE VERIFICAÇÃO PERFIL TORRE TE6 AÇO CARBONO X INOXIDÁVEL..... | 94 |
| ANEXO II – CUSTOS DE CONSTRUÇÃO | 96 |
| ANEXO III – CUSTOS DE MANUTENÇÃO | 106 |

INTRODUÇÃO

O consumo do aço inoxidável têm aumentado nos últimos anos. Este comportamento é observado no Brasil e no mundo. De fato, este material fornece aos elementos estruturais alta resistência à corrosão, durabilidade, fácil manutenção, apelo estético e resistência ao fogo. Diferente dos tradicionais aços carbono, os aços inoxidáveis possuem em sua composição, em maior proporção, o cromo. Este elemento é responsável pela alta resistência à corrosão pois cria uma camada protetora ao reagir com o oxigênio da atmosfera protegendo o metal de agentes oxidantes. Dependendo do tipo de aço inoxidável, o teor de cromo pode variar, contudo, deve ser mantido um valor de 10,5% como o mínimo para que o aço seja classificado como inoxidável. Este valor mínimo irá produzir um metal capaz de isolar a camada protetora sendo esta aderente e impermeável. Além do cromo, estes aços podem conter níquel, molibdênio, cobre, silício, alumínio, titânio, nióbio entre outros.

Embora seja possível verificar este aumento do uso de aços inoxidável, na construção civil, este material precisa vencer uma barreira cultural devido a ser considerado uma solução dispendiosa. Este fato está relacionado ao seu alto custo para a aquisição de perfis. Em contraste, a Figura 1 mostra uma queda no preço do aço austenítico 304 nos últimos anos. No entanto, o preço do aço carbono permanece constante. Isto pode estar relacionado ao aumento da demanda que resultaria em uma redução dos custos para a fabricação dos aços inoxidáveis. Contudo, esta visão está diretamente relacionada a concepção estrutural do projeto onde, na maioria dos casos, não são levados em consideração os valores relativos as intervenções necessárias para a realização das manutenções periódicas. De fato, pela sua resistência à corrosão, as manutenções necessárias em uma estrutura em aço inoxidável nos seus elementos estruturais são realizadas em períodos maiores em comparação equivalente em aço carbono. Portanto, o ciclo de vida de estruturas usando aço inoxidável é maior se comparado aos outros tipos de aço.

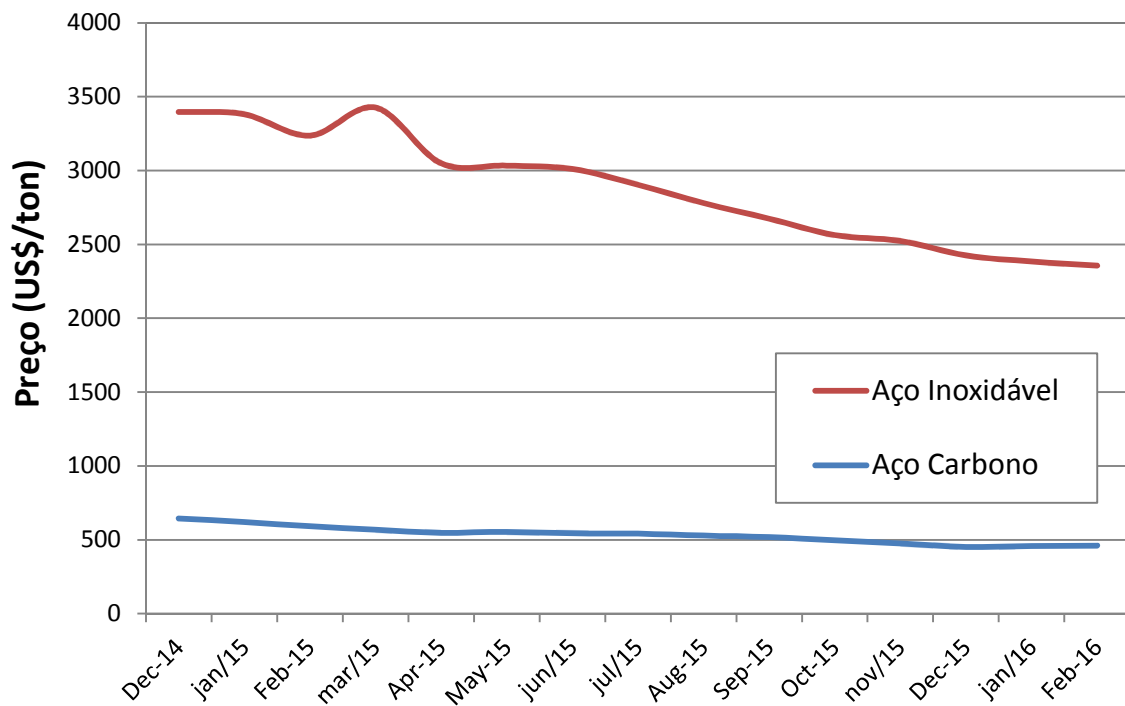


Figura 1: Comparação de preços (<http://www.worldsteelprices.com>, 2016)

Sabe-se que o sistema de distribuição de energia tem um elemento importante que são as torres de transmissão. Com o constante crescimento, que o mundo proporciona, em termos de tecnologia, a exigência de consumo de eletricidade aumenta. Como consequência a este crescimento, os espaços para a construção destas estruturas em zonas urbanas estão diminuindo. Com isto, faz-se necessário recorrer as zonas mais afastadas. No entanto, esta solução resulta em outro problema que seria construir torres de transmissão em zonas com difícil acesso para qualquer intervenção. Para que seja realizada qualquer tipo de manutenção, um alto custo deve ser dispendido pelo proprietário. Portanto, uma solução racional seria construir torres de transmissão com um material com adequada durabilidade e com um número pequeno de possíveis reparos a serem realizados nestas estruturas. Assim, o aço inoxidável torna-se uma solução mais adequada para as torres de transmissão onde há uma redução dos custos referente às manutenções. Além disto, os riscos relacionados a um colapso estrutural devido a processos corrosivos seriam limitados. Neste contexto, há uma diminuição dos riscos relacionados a possíveis blecautes que resultariam em possíveis sanções por parte do órgão regulamentador. A Figura 2 ilustra uma torre de transmissão que ruiu

devido à perda de resistência dos elementos estruturais localizados na base da estrutura. O colapso de torres de transmissão é geralmente caracterizado por uma falha em cascata, o que envolve um certo número de torres adjacentes ao longo da linha. No passado, a falha estrutural de uma torre simplesmente levava à reconstrução ou o redirecionamento da energia transmitida por esta linha para outra durante esta fase. No entanto, esta estratégia já não pode ser utilizada uma vez que o aumento da demanda de energia no sistema não permite uma reserva suficiente para ativar esse redirecionamento de energia levando a vários cortes de energia que têm sido notado ao longo dos últimos anos no Brasil.



Figura 2: Torre de linha de transmissão em colapso

Portanto, esta dissertação apresenta um estudo técnico-econômico do uso de aço inoxidável em torres de transmissão. O foco foi executar uma comparação com as torres de transmissão construídas de aço carbono. Para isso, fez-se o dimensionamento de um conjunto de torres variando a sua altura baseando-se nas premissas do código europeu EN1993-1-1 [1]. Sabe-se que ainda não há nenhuma norma brasileira que englobe o dimensionamento de estrutura em aço inoxidável. Em adição, o estudo econômico foi baseado em custos de construção e manutenções periódicas a serem realizadas durante o ciclo de vida da estrutura. Após estas análises serão apresentadas as vantagens e desvantagens para cada tipo de aço de acordo com os estudos propostos.

Motivação

A presente dissertação tem como principal objetivo investigar o desempenho estrutural e econômico das torres de transmissão usando aço inoxidável em seus elementos estruturais. Estas estruturas são frequentemente construídas em ambientes complexos para que qualquer tipo de intervenção possa ser realizada. Com isto, devem ser levados em conta os riscos e altos custos que possam surgir em estruturas localizadas em regiões com inadequado acesso para a realização de manutenções. Assim, esta atividade desempenha um importante papel na concepção estrutural de torres de transmissão de energia quando o dimensionamento é realizado considerando o ciclo de vida da estrutura. O aço inoxidável foi escolhido devido às propriedades que lhe confere ótimo desempenho em ambientes agressivos e de difícil acesso, tais como: resistência a corrosão, resistência a oxidação em temperaturas elevadas e resistência mecânica. Desta forma, minimizando ou eliminando os custos com manutenções nas torres de transmissão.

Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo fazer um estudo comparativo entre a utilização do aço carbono e o aço inoxidável, envolvendo o dimensionamento e os custos destes materiais ao longo da vida útil da estrutura. A primeira parte do estudo consiste no dimensionamento de seis torres de transmissão de energia variando a altura com base no uso, ou não, de uma extensão. Para cada sistema estrutural, efetuou-se o dimensionamento das torres usando em seus elementos estruturais, aço carbono ou aço inoxidável, assim selecionando três torres para cada tipo de aço. Já a segunda parte contempla a análise comparativa dos custos destes materiais, sob o ponto de vista do investimento inicial e os custos envolvidos com a manutenção da estrutura ao longo de sua vida útil.

Escopo

Neste capítulo introdutório foram apresentadas algumas considerações iniciais sobre as propostas desta dissertação, dando maior ênfase para a utilização do aço inoxidável como elemento estrutural em torres de transmissão de energia e definindo os objetivos que deverão ser atingidos no final do trabalho.

No capítulo um será apresentado um histórico da utilização do aço inoxidável no Brasil e no mundo, dando foco na sua durabilidade mostrando exemplos bem sucedidos sob o ponto de vista ambiental da sua utilização.

No capítulo dois serão apresentado o conceito de uma linha de transmissão, bem como, seus componentes necessários para seu funcionamento. Além disto, os tipos de fundação utilizadas e os tipos de sistemas estruturais utilizados nestas estruturas.

No capítulo três, partindo da descrição da estrutura e critérios de dimensionamento adotados, será apresentado os casos de estudo tendo como base uma torre de transmissão existente. Neste capítulo, o dimensionamento das torres referentes aos casos de estudo é realizado baseado em normas europeias que possuem diretrizes para estruturas em aço inoxidável.

A avaliação dos custos desses casos de estudo será apresentado no capítulo quatro. Desta forma, os custos referentes a construção das torres de transmissão, bem como, os custos para futuras manutenções foram considerados neste capítulo.

Por fim, no capítulo cinco, serão apresentadas as conclusões obtidas nos dimensionamentos estruturais e comparativo de custos entre os tipos de aços utilizados além de propor temas para novos estudos relacionados com o mesmo objeto de estudo da presente dissertação.

1 AÇO INOXIDÁVEL

1.1 Histórico

O ferro existe a mais de cinco mil anos e a partir do século XVIII, várias descobertas a respeito de metais até então desconhecidos foram realizadas. Em 1751, o sueco Axel Frederick Cronstedt descobre o níquel (Ni), posteriormente, o francês Nicolas Louis Vauquelin descobre o cromo (Cr) em 1797 [2].

Com a descoberta destes dois elementos, Eduard Maurer e Baermann Strauss registraram a primeira patente, em 1912 na Alemanha, para produção de aço inoxidável tendo como principais componentes, o cromo e o níquel. Este evento marcou o início da produção dos aços inoxidáveis austeníticos sendo atualmente responsável por cerca de 60% da produção mundial do aço inoxidável.

Em 1913, na cidade de Sheffield (Inglaterra), Harry Brearly desenvolveu ligas de ferro e cromo excepcionalmente duráveis.

Dois anos depois, nos Estados Unidos, Frederic Becket e Christian Dantszen desenvolveram um tipo de aço inoxidável o qual representa cerca de 30% da produção de aço inoxidável mundial, os ferríticos. Em 1920, em menos de uma década, as três famílias de aços inoxidáveis (austeníticos, ferríticos e martensíticos) já haviam sido criadas, e ainda hoje, são empregadas em inúmeras aplicações [2].

Na década de 30, na Suécia, foi desenvolvida uma família de aço inoxidável combinando as estruturas austenítica e ferríticas em uma mesma liga criando o aço inoxidável duplex.

Após um século de sua descoberta, os aços inoxidáveis possuem uma variedade enorme de aplicações, onde na construção civil, funcionam como elemento estrutural e estético.

1.2 O uso do aço inoxidável

O uso do aço inoxidável na construção civil tem aumentado substancialmente devido a sua resistência à corrosão, durabilidade, fácil manutenção, apelo estético e resistência ao fogo. Sem deixar de mencionar o seu apelo ambiental onde basicamente, 100% do material utilizado pode ser reciclado, obtendo-se assim, uma economia na energia primária, nos seus recursos não renováveis e reduzindo consideravelmente o de desperdício.

Sabe-se que uma das primeiras aplicações do aço inoxidável em construção principal ocorreu em 1928, quando foi construído o Edifício Chrysler em Nova York (Figura 3). Na parte superior do edifício há uma estrutura de aço inoxidável com um tamanho equivalente a sete andares. Esta parte da estrutura teve apenas duas lavagens em 1961 e em 1995, caracterizando um exemplo de que quase nenhuma manutenção é requerida pelo aço inoxidável, uma vez que o edifício está localizado em uma área costeira e poluída [3].



Figura 3: Edifício Chrysler em Nova York [3].

Em 2013, a Abinox [4] realizou uma pesquisa quanto ao consumo do aço inoxidável no Brasil que cresceu cerca de 8,7% em relação ao ano de 2012, tendo como consumo cerca de 298 mil toneladas em 2013, o que representa um consumo de 1,98 kg/ por habitante. Cada vez mais o aço inoxidável está presente no dia a dia dos brasileiros. Em São Paulo, por exemplo, há a presença destas ligas metálicas na construção do metrô, pontos de ônibus e até em modernos estádios de futebol (Arena Palmeiras). É possível ter um olhar mais próximo em instalações em formas de placas, chapas, tubos, painéis, parafusos, paredes dentre vários outros itens.

O consumo total e o consumo *per capita* foram considerados em 15 anos os maiores em termos de medição. A Figura 4 ilustra a evolução do consumo do aço nestes últimos anos no Brasil. Nesta figura pode-se observar um crescimento praticamente contínuo, o que dá uma visão que este produto tem sido escolhido cada vez mais pelos profissionais.

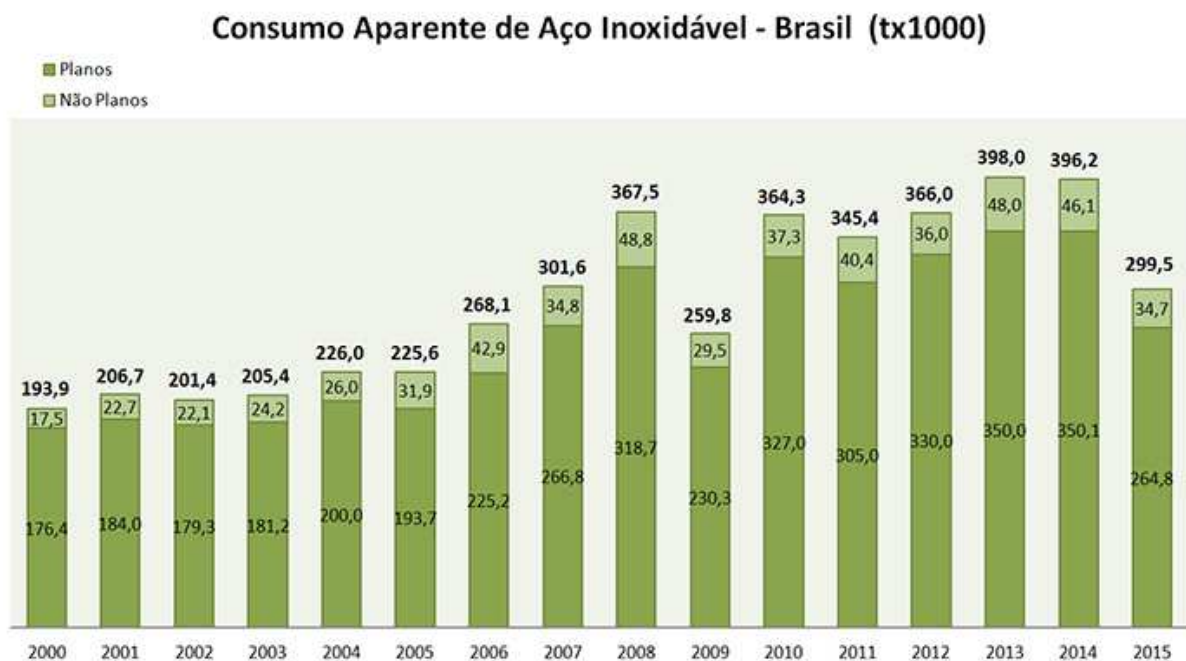


Figura 4: Consumo aparente de aço inoxidável no Brasil [4]

Esta tendência também tem sido vista a nível global. A Figura 5 mostra o consumo de aço inoxidável no mundo entre 2001 e 2012. Como pode ser observado, houve um significativo aumento do consumo de aço inoxidável nos

últimos anos. Em especial, a China teve um importante papel para o aumento do consumo devido ao crescimento de sua economia. Um ano após o último registro do gráfico, a China levou sua produção de aço inoxidável para um recorde. Pode-se observar, que a produção de aço inoxidável mundial totalizou cerca de 9,3 milhões de toneladas, subindo cerca de 5,5%, 28 milhões de toneladas, que por sua vez foi puxada pela alta de 15% na produção chinesa, que representa a metade da produção mundial.

Embora este cenário seja animador para o uso do aço inoxidável, o alto custo inicial acaba sendo uma barreira para os engenheiros e arquitetos. No entanto, sabe-se que devem ser levados em conta os aspectos relacionados a sua resistência à corrosão e durabilidade. Deste modo, os projetos precisam ter uma visão mais ampla considerando os custos referentes as questões relacionadas às intervenções.

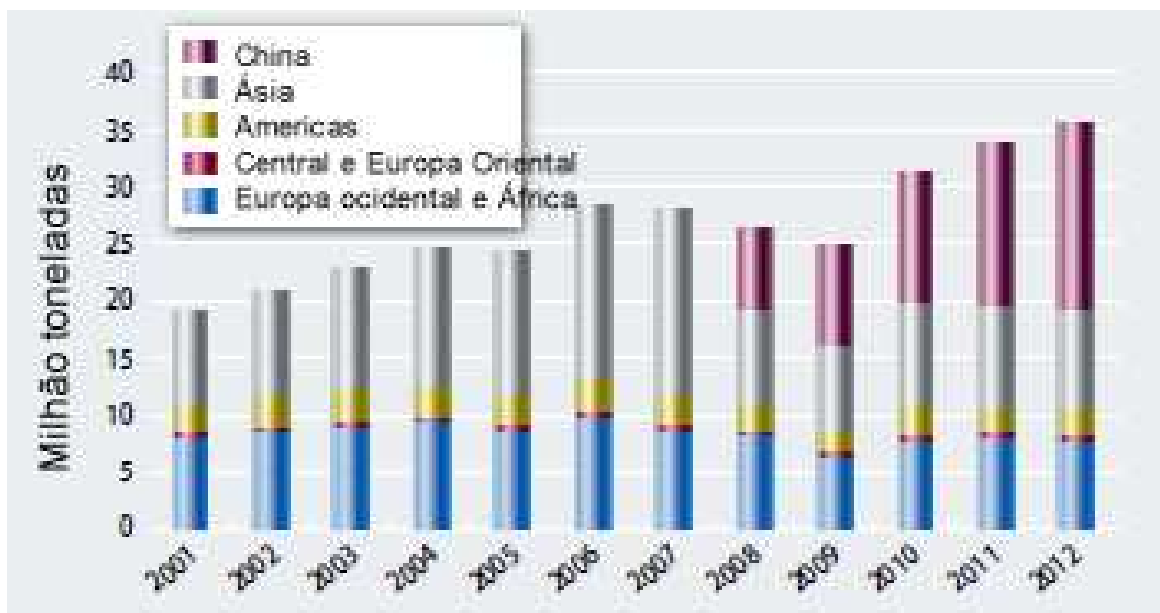


Figura 5: Produção de aço inoxidável global [5]

1.3 Comportamento mecânico e composição química

As principais famílias de aços inoxidáveis, classificados segundo a sua microestrutura, são: ferríticos, austeníticos, martensíticos e duplex.

Os aços inoxidáveis austeníticos são os tipos de aços que são os maiores no que diz respeito a ligas e em utilização em diversas áreas, seja na construção civil ou em utensílios. Assim como os ferríticos, estes aços não podem, através do tratamento térmico, serem endurecidos. Desta forma, possuem um nível de teor de carbono bem restrito. Através da adição de níquel sua estrutura é modificada em temperatura ambiente, tendo assim, uma baixa permeabilidade magnética. Os aços austeníticos através de seu teor de níquel com o aumento de sua resistência mecânica respondem bem ao trabalho a frio.

Os aços tipo 304 (1.4301), tendo em sua composição 17% de cromo e 8% de níquel, são os mais utilizados devido a sua ótima ductilidade, tenacidade e conformabilidade. Em alguns aços austeníticos, com o objetivo de aumentar a sua resistência aos mecanismos de corrosão localizados, é adicionado o molibdênio que possibilita boas propriedades mecânicas, soldabilidade, resistência à corrosão, trabalhabilidade a frio e sendo assim, utilizados em áreas como: refinarias, estruturas e em equipamentos industriais.

Os aços inoxidáveis ferríticos vindo sendo usados cada vez mais em aplicações estruturais. Mesmo existindo há mais de 100 anos, este produto vem ganhando espaço como uma alternativa para o futuro dos aços inoxidáveis no Brasil e também no mundo devido ao seu menor custo quando comparado ao austenítico. Pode-se definir as ligas dos aços inoxidáveis ferrítico como ligas de ferro-cromo possuindo entre 12 a 17% de cromo e com baixo teor de carbono. Suas características específicas diferenciam-se das outras estruturas em aço inoxidável por não serem endurecíveis por meio de tratamento térmico, são magnéticos e possuem uma ótima resistência a corrosão quando instalados em meios agressivos, além de boa ductilidade, e uma considerável soldabilidade. Os aços inoxidáveis ferríticos possuem uma baixa soldabilidade quando comparados aos aços inoxidáveis austeníticos. Como aplicação, estes aços são usados em sistemas de exaustão de veículos automotores, em tanques de combustíveis e até em bancos de capacitores. São utilizados também em decorações automotivas, eletrodomésticos, revestimentos para câmara de combustão de motores a diesel, em portas de cofres, moedas e utensílios domésticos. Mesmo com esta ampla aplicação, o aço inoxidável

ferrítico tem uma pequena participação de mercado quando comparados ao inoxidável austenítico.

Sua composição química consiste em um baixo teor de carbono, possuindo como elemento básico o cromo, também pode ter outros componentes em sua liga como o manganês, silício, fósforo, enxofre e tálio. Por não possuir em sua composição o níquel, torna-se cada vez mais utilizado na produção de inúmeros aparelhos domésticos, fazendo com que tenha um custo menor e tornando assim mais acessível em termos de aquisição do que os aços inoxidáveis austeníticos. Fato este que, devido à escassez de jazidas de níquel, os custos para a produção de aços inoxidáveis austeníticos tornam-se cada vez mais caros.

Os aços inoxidáveis duplex são chamados assim devido a sua microestrutura formada em duas fases (ferrítica e austenítica) onde possuem fases praticamente iguais, obtendo ótimas propriedades mecânicas, alta resistência mecânica, boa ductilidade, tenacidade e soldabilidade. Estas ligas possuem a habilidade de permanecer no estado passivo em vários meios em que possam estar expostos.

Estes apresentam um percentual bem elevado de elementos em sua liga, como cromo, níquel, molibidênio e nitrogênio, os mesmos devem estar balanceados de forma homogênea para que possa se obter frações iguais em todas as fases e conceder a ferrita e austenita, resistência a corrosão e resistência mecânica.

Possuem uma tenacidade e ductilidade bem alta quando comparados aos aços ferríticos e martensíticos, têm alta resistência a corrosão sob tensão e corrosão inter granular, quando comparados aos aços austeníticos. Apresentam um limite de escoamento até duas vezes maior que o aço inoxidável austenítico. Além disso, tem vantagem de possuir menor teor de níquel, dando uma resistência a corrosão bastante similar aos aços austeníticos. Esta combinação de baixo teor de níquel torna assim o aço inoxidável duplex uma ótima alternativa quanto ao quesito custo-benefício devido ao alto custo do níquel no mercado. Os aços inoxidáveis duplex possuem uma alta resistência ao meio ambiente e ótima tenacidade que está limitada a fração volumétrica quanto a distribuição da ferrita.

Com relação a curva tensão-deformação, a Figura 6 faz uma comparação com os aços carbonos e os aços inoxidáveis. Como pode ser notado, os aços inoxidáveis possuem uma curva completamente não linear sem um patamar de escoamento bem definido em comparação com os outros aços. Desta forma, a tensão de escoamento é obtida através de uma reta paralela ao início elástico da

curva com uma deformação de 0,2%. Em termos de ductilidade, pode ser observada uma maior deformação para a tensão máxima para os aços austeníticos como havia sido mencionado anteriormente. Esta é uma característica dos aços inoxidáveis, principalmente, para os austeníticos.

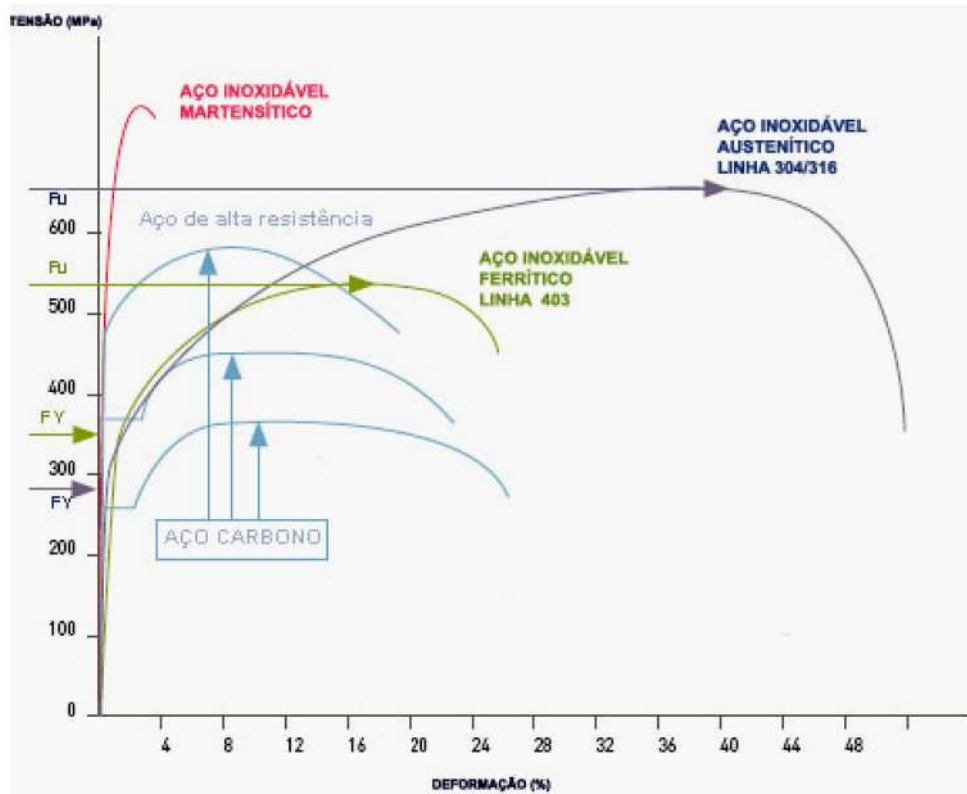


Figura 6: Curvas tensão *versus* deformação [6]

1.4 Arquitetura sustentável com aço inoxidável

Com o conhecimento adequado e a melhor utilização das várias aplicações do aço inoxidável pode-se criar um mundo cada vez mais limpo ajudando assim, o meio ambiente. O aço inoxidável possui uma característica de ser um material em que ao ser usado na construção civil nos proporciona menos agressão ao meio ambiente colaborando na economia de energia, no fornecimento de ar limpo, na preservação da água, evitando que substâncias químicas perigosas venham a contaminar e por fim limitando qualquer tipo de substância metálica em contaminar o meio ambiente, principalmente os aterros sanitários. Se for escolhido adequadamente e tendo uma manutenção atrelada ao nível de agressividade

ambiental, o aço inoxidável poderá garantir uma beleza que se manterá durante toda a vida útil da estrutura. Ainda que o aço inoxidável seja utilizado por muitos anos é possível recuperar a sua aparência original e até mesmo reutilizá-lo para outras aplicações.

Existem várias características para classificar um material como ecologicamente correto, sendo estas, relacionadas diretamente ou indiretamente, à sua capacidade de resistência à corrosão. Esta característica influencia no aspecto relacionado a reciclagem onde o aço inoxidável possui baixa taxa de corrosão resultando em uma sucata valorizada principalmente pela sua aparência. Portanto, pode ser utilizado, algumas vezes, o mesmo perfil ao longo dos anos. A longa vida útil do aço inoxidável maximiza a vida útil de outros materiais, evitando falhas prematuras de sistemas projetados com pedras, alvenaria ou madeira.

O interesse em se executar construções cada vez mais ecológicas vem crescendo consideravelmente nestes últimos anos, tendo em vista que as construções estão sendo finalizadas através da especificação e uso destes materiais ecológicos. Através do “LEED™ – Green Building Rating System” tem-se a avaliação destas construções ecológicas e sua avaliação está diretamente ou indiretamente ligada a escolha do material a ser utilizado. Nestas avaliações estão incluídas a taxa de reciclagem, a taxa de reutilização de material, o consumo de energia e água, a qualidade do ar, o controle térmico, sua durabilidade, os métodos de manutenção e o que poderia ser usado em termos de iluminação interior.

Como a preocupação voltada ao meio ambiente a cada dia vem tomando grandes proporções, é muito importante selecionar materiais, como aço inoxidável, que não venham necessitar de revestimentos, mas oferecendo ainda um nível de proteção contra corrosão significativo. Sendo assim, estes materiais não necessitarão de substituição durante a sua vida útil e não afetam de forma alguma outros materiais de construção devido a sua durabilidade. O aço inoxidável sendo mais resistente aos agentes corrosivos que qualquer outro tipo de aço existente na construção civil não é afetado por agentes provenientes de chuvas ácidas como o ácido nítrico, o ácido carbônico e a amônia. Dentre os agentes considerados nocivos no que diz respeito a corrosão do aço inoxidável pode-se citar o ácido sulfúrico, os altos índices de partículas atmosféricas contendo ou não sais marítimos e de degelo (os cloretos). Porém, independente do alto índice de resistência a corrosão, deve-se prezar sempre por uma boa qualidade de fabricação, realizar a melhor técnica de

instalação e por fim executar as manutenções necessárias para que o aço inoxidável possa obter sua melhor funcionalidade durante toda a sua vida útil. Pode-se observar este fato em Loureiro [7] onde foi avaliado o efeito da chuva ácida em aços inoxidáveis. Os resultados obtidos mostraram que, independentemente do tempo de contato do aço inoxidável com a solução de chuva ácida, houve preservação da aparência do material, sem alteração das condições superficiais, e o teor de cromo hexavalente na solução apresentou-se em níveis muito inferiores aos estabelecidos pelo Conselho de Política Ambiental de Minas Gerais – COPAM.

2 TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Toda a transmissão de energia elétrica é caracterizada pela utilização de linhas de transmissão de alta potência, normalmente usando corrente alternada onde pode ser simplificada como a interligação de uma usina com o consumidor. Para viabilizar estas ligações, as linhas de transmissão devem possuir estruturas apropriadas para cada extensão necessária. Estas estruturas são denominadas como torres das linhas de transmissão de energia. Sua função consiste em sustentar todos os esforços necessários que possam existir na realização do transporte desta energia. A Figura 7 ilustra uma torre de transmissão de energia onde se observam as linhas de transmissão e os equipamentos que a compõem, localizados na parte superior da torre.



Figura 7: Exemplo de uma linha de transmissão [8]

Divide-se a transmissão de energia em duas partes: a transmissão propriamente dita, para potências mais elevadas ligando grandes centros e grandes consumidores, e a distribuição, usada dentro de centros urbanos, residências,

prédios comerciais e etc. Cada linha de transmissão possui um nível de tensão nominal, onde se encontram valores de até 750kV, com diversas linhas de pesquisa em 1,0 a 1,2MV. As linhas de distribuição são usualmente na faixa de 13,8 kV, 25 kV no Brasil e 15kV em Portugal continental. Para a conversão entre os níveis de tensão, é utilizado como equipamento fundamental, o transformador. Os transformadores de grande porte (para grandes elevações ou diminuições na tensão do sistema) encontram-se nas subestações. Em sistemas de grande porte, é usual a interligação redundante entre sistemas, ou ainda a ligação em anel, formando uma rede.

Quanto maior o número de interligações em um sistema tem-se um aumento de sua confiabilidade, no entanto, este aumento resulta em uma maior complexidade do sistema. Assim, estas interligações podem fornecer um ótimo suprimento de energia, mas também, uma maior propagação de falhas. De fato, caso um problema venha ocorrer em algum ponto desta rede, poderá acarretar em um afundamento de tensão nos pontos a sua volta, acelerando assim, os geradores, tornando-se necessário o desligamento de vários pontos ou até mesmo o sistema global, incluindo centros consumidores, provocando assim um blecaute.

Com o crescimento populacional e industrial tem-se hoje o maior desafio destas torres de linhas de transmissão que é a sua construção. Cada vez mais são construídas longe dos grandes centros, e conseqüentemente, encontrando terrenos montanhosos e espaços cada vez menores para viabilizar qualquer projeto de construção, recondução e manutenção.

2.1 Sistema de transmissão de energia elétrica

Pode-se dividir o sistema de transmissão de energia elétrica em três categorias:

- **Torres:** Tem o papel principal no sistema, pois são responsáveis por sustentar os cabos mantendo uma distância segura do solo, para que possa assim, evitar o chamado "fase-terra" que ocorreria no caso de algum contato elétrico com pessoas, vegetação e veículos que eventualmente possam transitar na região.

Devem suportar os cabos em suas piores condições, de acordo com cada especificação de cabo, as cargas de ventos da região, terremotos, entre outros eventos;

- **Isoladores:** Tem como responsabilidade a sustentação dos cabos nas torres, fazendo com que não haja uma descarga da energia pela estrutura. Devem sempre garantir a rigidez dielétrica e suportar o peso dos cabos. São geralmente constituídos de cerâmica, vidro ou polímeros;
- **Subestação:** Local onde há a conexão das linhas de transmissão.

2.1.1 Torres de linhas de transmissão

A maior parte da energia que alimenta as residências aqui no Brasil, conforme apresentado na Figura 8, são provenientes das usinas hidrelétricas, que transforma a energia em subestações elétricas em diversos níveis de tensão, que são por sua vez, definidos no SEP – Sistema Elétrico de Potência. Após a geração, estas energias são transportadas por meio de cabos elétricos, que é onde entram as estruturas metálicas conhecidas como Torre de Transmissão.

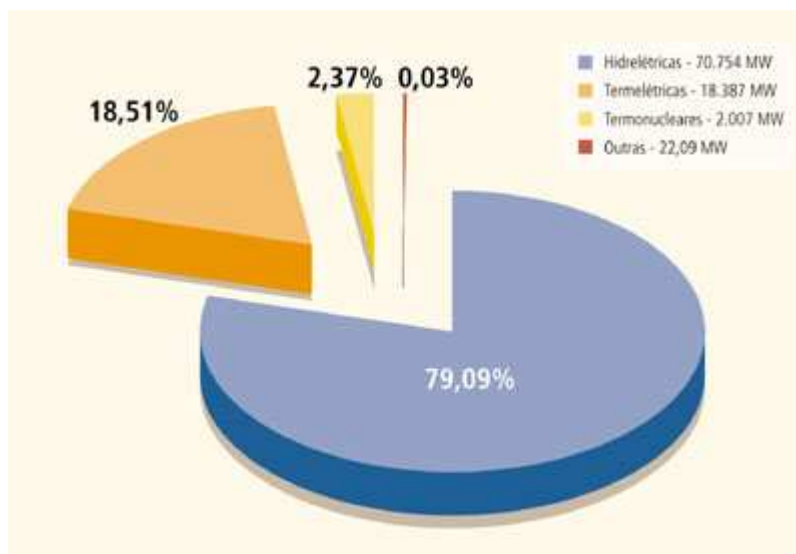


Figura 8: Principais fontes de geração de energia elétrica no Brasil [9]

Uma característica comum destas torres de transmissão de energia elétrica é possuir uma grande extensão linear que em sua maioria estão em condições de difícil acesso.

A base para todos estes tipos de torres são suas fundações, onde usualmente são adotadas fundações, como grelhas metálicas, estacas, tubulão e sapata em obras.

Para os projetos de fundação devem ser consideradas uma sucessão de cargas a fim de dimensioná-las com segurança e economia como: o vão gravante, vão de vento, altura da torre, o ângulo da torre e no caso, a torre terminal. As provas de cargas devem ser executadas nas fundações a fim de se obter uma garantia de execução, durabilidade da estrutura e uma redução de custos para as obras de linhas de transmissão, pois o foco principal será sempre o fornecimento de energia elétrica.

2.1.2 Tipos de torres

As torres de linhas de transmissão podem ser divididas em dois grupos, torres autoportantes ou torres estaiadas. As torres metálicas autoportantes são executadas em estruturas metálicas galvanizadas a fogo, compostas por uma parte reta superior e uma parte piramidal na base. São formadas por módulos treliçados e possuem diversos tipos onde todas as ligações são feitas através de parafusos, porcas e “pall nuts”.

- **Torre metálica autoportante de cantoneira quadrada:** possuem colunas diagonais com travamentos e perfis laminados planos e de abas iguais, geralmente possuem uma escada frontal à esteira vertical de cabos, conforme apresentado na Figura 9. No caso de torres para antenas podem possuir plataformas de trabalho no topo para dar possibilidade de alguma manutenção ou instalação de equipamentos e até mesmo de sua estrutura;



Figura 9: Torre metálica autoportante de cantoneira quadrada [10].

- **Torre metálica autoportante de chapa dobrada triangular:** possuem colunas em chapa plana dobrada, suas diagonais e seus travamentos são em perfis "L" laminados planos e também de abas iguais, possuem escada frontal à esteira vertical de cabos, conforme apresentado na Figura 10. No caso de torres para antenas podem possuir plataformas de trabalho no topo para dar possibilidade de alguma manutenção ou instalação de equipamentos e até mesmos de sua estrutura;



Figura 10: Torre metálica autoportante de chapa dobrada triangular [11].

- **Torre metálica autoportante de tubo triangular:** possuem em suas estruturas colunas em tubo estrutural, com diagonais e travamentos em perfis "L" laminados planos do tipo de abas iguais, tem como diferencial uma escada central, além da esteira vertical de cabos instaladas internamente na parte de trás da escada, conforme apresentado na Figura 11. Por se tratar de uma escada central além do guarda-corpo, esta estrutura possui um trava-queda em cabo de aço 5/16". Da mesma forma, em caso de torres para antenas podem possuir plataformas de trabalho no topo para dar possibilidade de alguma manutenção ou instalação de equipamentos e até mesmo de sua estrutura.



Figura 11: Torre autoportante de tubo triangular [10].

A Figura 12 apresenta um conjunto de torres autoportantes que formam entre si circuitos de linhas de transmissão que alimentam uma cidade através de uma faixa [portal metálica].



Figura 12: Torres de linhas de transmissão autoportantes [12]

O outro grupo de torres são as estaiadas, que por sua vez, possuem uma economia maior em relação às autoportantes devido a facilidade de construção, mas necessitam de uma área de aproximadamente dez vezes a área utilizada na construção das torres autoportantes de mesma altura devido aos seus estais.

Estas torres possuem um corpo metálico modulado, onde sua fixação é feita por estais ao longo de sua extensão. Cada módulo de sua estrutura varia em cerca de cinco a seis metros cada. Possuem colunas diagonais, travessas, barras de travamento (diafragmas), ligações são parafusadas, soldadas e seção transversal quadrada ou triangular.

Os estais mais utilizados são as cordoalhas de aço fixadas ao longo da torre e às fundações que tem como função a ancoragem da estrutura.

Os perfis estruturais mais utilizados nas torres estaiadas são cantoneiras simples de abas iguais de aço ASTM A36, que possui tensão de ruptura de 400MPa a 500Mpa, tensão de escoamento de 250 MPa e módulo de elasticidade igual a 205GPa [13].

As fundações mais utilizadas nas torres estaiadas são: Estai – bloco de concreto (tronco cônico e prismático) e mastro central – tubulão e sapata. As fundações dos estais são estruturas que estão submetidas apenas a esforços de tração (na direção do estai). Na fundação do mastro central atuam esforços de compressão verticais e horizontais. Para os estais que possuem a fundação em bloco tronco cônico, recomenda-se que a profundidade destas estruturas não ultrapasse quatro metros, devido ao custo da haste-âncora embutida em cada fundação. É de fundamental importância para a estabilidade das fundações dos estais que seja executado um controle da qualidade de compactação de cada uma das cavas.

As torres estaiadas possuem sua estrutura em aço galvanizado que podem ser divididas em dois tipos:

- **Torre metálica estaiada em aço na forma triangular:** possuem uniformidade em sua extensão, são construídas através de módulos sem montantes tubulares, sendo seu treliçamento em aço maciço soldados em módulos obtendo assim alturas variáveis, conforme apresentado na Figura 13. Através da união de seus módulos é que se consegue executar a sua montagem, utilizando parafusos, porcas e *pall-nuts*, instalando também seus triângulos estabilizadores (anti-torção). Este tipo de estrutura não necessita de escada, pois a própria serve como uma em caso de necessidade. A definição da torre dá-se através de sua capacidade nominal em função da altura e da área máxima permitida a ser utilizada para a construção e é claro, quanto ao vento mais desfavorável;



Figura 13: Torre estaiada em aço triangular [13].

- **Torre metálica estaiada irradiante:** possuem extensão uniforme, são construídas também através de módulos com montantes tubulares. Seu treliçamento em aço maciço soldado em módulos obtendo assim alturas variáveis, conforme apresentado na Figura 14. Através da união dos módulos executa-se a sua montagem, utilizando parafusos, porcas e *pall-nuts*, instalando também triângulos estabilizadores (anti-torção). De forma igual a torre estaiada em aço triangular, por si só esta estrutura funciona como escada. A definição da torre dá-se através de sua capacidade nominal em função da altura e da área máxima permitida a ser utilizada para a construção e, é claro, quanto ao vento mais desfavorável. Um isolador de cerâmica é instalado em sua base e nos cabos de estai, definidos conforme projeto.



Figura 14: Torre metálica estaiada irradiante [15]

2.2 Manutenção em linhas de transmissão de energia elétrica

Existem duas formas de se executar as inspeções nestas estruturas, onde na primeira tem-se uma inspeção feita de forma visual ou muitas vezes com binóculos através de um electricista que vai a campo e detecta todas as anomalias possíveis, registrando as mesmas em relatórios de inspeção, ou em planilhas de acordo com cada padrão adotado. Neste tipo de inspeção o electricista chega a subir nas torres de linhas de transmissão e consegue verificar em que estado encontra-se cada componente para determinar quais precisam ser trocados ou recuperados.

A segunda forma é a mais utilizada nos dias atuais sendo denominada de aero inspeção (inspeção com o uso de helicópteros), sendo este método o principal instrumento para que se possa executar inspeções preventivas sendo uma ótima opção para eventos emergenciais. Por utilizar um meio aéreo para a inspeção tem-se uma vantagem que o mesmo permite além de transportar pessoas, acoplar equipamentos que vão melhorar ainda mais as inspeções como a termografia computadorizada em que se instala um termo visor de raios infravermelhos no

veículo e permite que o operador faça uma verificação da temperatura nos equipamentos instalados na estrutura, sem a necessidade de desligamentos que reduzem consideravelmente os custos operacionais destes tipos de falhas que podem ocasionar fadiga e até mesmo ruptura nos cabos destas linhas de transmissão. Dentro desta forma de inspeção aérea pode-se dividir em algumas atividades que são: A inspeção termográfica dos cabos e junções, a verificação do efeito corona nos cabos e nos isoladores, a confirmação ou ajustes nos espaçadores, a verificação do cabo OPGW, os para-raios, e finalmente, a verificação estrutural.

2.2.1 Tipos de inspeções em torres de linhas de transmissão

A combinação de todas as técnicas, sendo elas administrativas ou executivas, incluindo a supervisão através de todos os processos, diretos ou indiretos nos equipamentos, estruturas, obras ou instalações é realizada, tendo como objetivo garantir as condições de segurança e eficiência, funções das quais a estrutura construída ou equipamento fabricado durante a sua vida útil, sempre levando em consideração as condições econômicas, operativas e de segurança, chama-se manutenção.

Através de dados obtidos por meios estatísticos e analisando o sistema como um todo, pode-se obter um cronograma de manutenção, que assume o papel principal para que se possa mitigar qualquer caso de uma manutenção emergencial. Com o crescimento exponencial de produtividade, tem-se uma preocupação entre as empresas de cada vez mais se obter a satisfação do cliente, reduzindo ao máximo qualquer tipo de falha e toda a atividade referente a manutenção nas linhas de transmissão no Brasil. Estas são regulamentadas e administradas pela ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), que se define através de seus "Procedimentos de Rede" para o "Acompanhamento da Manutenção dos Sistemas Elétricos", que padroniza todas essas operações e manutenções necessárias ao sistema. Para se proporcionar um serviço com qualidade de fornecimento com confiabilidade que são requeridos pela ANEEL para seus consumidores aprovados nos serviços de fornecimento de energia elétrica é necessária a regulamentação.

A inspeção regular das linhas de transmissão é um dos fatores preponderantes para um bom desempenho do sistema de transmissão. Ele tem como finalidade detectar qualquer anormalidade presente, seja nas linhas propriamente ditas (inclusive estruturas) ou nas faixas de segurança.

Na inspeção terrestre, devem ser realizadas programações de grande porte para que em no máximo dois dias, toda a linha e suas estruturas sejam vistoriadas, sem que com isto seja necessário qualquer tipo de desligamento. É uma inspeção rápida, pois trata de uma verificação visual em um trecho ou em toda a extensão da linha de transmissão aérea, sendo sempre realizada por eletricitas, que a percorrem pelo interior da faixa de segurança. Limita-se a uma inspeção visual, isto é, sem que seja necessário subir na estrutura, evitando assim o desligamento da linha.

Caso seja verificada a necessidade de se aproximar mais das partes energizadas, isto poderá ser feito, porém sempre deverão ser mantidas as devidas distâncias de segurança com relação as partes "vivas", ou seja, 1,50m para LTA a 138 kV e 2,00m para LTA a 230kV.

Dentre as principais anormalidades que podem ser observadas nas inspeções, podem ser citadas:

Nas Estruturas:

- estrutura fora do prumo;
- peças de galvanização danificadas e seu estado quanto à corrosão;
- aperto insuficiente dos parafusos;
- peças deformadas;
- falta de parafusos e degraus (pedarolas);
- conexão frouxa ou oxidada de contrapeso (cabo enterrado);
- falta de placas de numeração das torres, de circuitos, faseamentos e de advertência de perigo de vida;
- existência de casa de abelhas, marimbondos, ninhos, etc.;
- evidência de esforços anormais nas fundações e montantes devidos a aterros, depósito de lixo e outros materiais;
- sinais de erosão próximo às fundações;

- formigueiro próximo às fundações;
- vegetação trepando nas estruturas;
- objetos estranhos nas estruturas;

Nas Cadeias de Isoladores:

- peças com galvanização danificada, com pontos de ferrugem ou fundidas por descargas;
- falta de contra pino, porcas, arruelas, etc.
- isolador trincado, queimado, perfurado, partido, com sinais de descargas ou de poluição.

Cabos condutores e para-raios:

- jumper com problema no terminal;
- jumper com fios partidos ou sinal de descarga;
- acessório da cadeia do isolador corroída;
- chifres com sinal de descarga ou furados;
- talas de união desapertadas ou com sinal de descarga;
- amortecedor com fios partidos ou com sinal de descarga;
- altura insuficiente do condutor em relação ao solo;
- emendas com defeito;
- problemas no paralelismo dos condutores e na regulagem das flechas;
- problemas no espaçamento dos jumpers;
- cabo para-raios e respectivas ferragens com oxidação ou fios partidos;
- vibração eólica;
- conexões frouxas;
- conectores faltando ou queimados;
- escoriações ou abrasões;
- cabos com fios partidos ou sinal de descarga;
- corpo estranho preso no cabo (arame, balão, etc);
- cabo com mais de duas emendas;
- esfera de sinalização com defeito ou desapertada no cabo para-raios.

Há um outro tipo de inspeção dita como especial onde há uma programação de médio porte que é executada de maneira cuidadosa. Ela pode ser executada com a linha energizada ou não, sendo realizada de maneira que, ao longo do ano, todas as linhas de transmissão do sistema tenham sido inspecionadas pelo menos uma vez. Dentre as principais anormalidades que podem ser observadas nessas inspeções, podem ser citadas:

Nas Estruturas:

- falta de proteção especial contra abalroamento por veículo;
- falta de sinalização com vistas a inspeções aéreas;
- estrutura fora do prumo;
- peças com a galvanização danificada e seu estado quanto à corrosão;
- aperto insuficiente dos parafusos;
- peças deformadas;
- falta de parafusos e degraus (pedarolas);
- conexão frouxa ou oxidada do cabo contrapeso;
- falta de placas de numeração das torres, de circuitos, faseamentos e de advertência de perigo de vida;
- existência de abelhas, marimbondos, aves, etc.;
- evidência de esforços anormais nas fundações e montantes devido a aterros, depósito de lixo e outros materiais;
- sinais de erosão próximo às fundações;
- formigueiro próximo às fundações;
- vegetação dentro das estruturas;
- objetos estranhos nas estruturas;
- postes quebrados ou com ferragens expostas.

Nas Cadeias de Isoladores:

- peças com galvanização danificada, pontos de ferrugem ou fundidas por descargas;
- falta de contrapino, porcas, arruelas, etc.;
- isolador trincado, queimado, perfurado, partido, com sinais de descargas ou de poluição.

Cabos condutores e para-raios:

- jumper com trincas ou amassamento no terminal;
- jumper com fios partidos ou sinal de descarga;
- acessório da cadeia de isoladores corroído;
- chifres com sinal de descarga ou furado;
- talas de união desapertadas ou com sinal de descarga;
- amortecedor do tipo festão com fios partidos ou com sinal de descarga;
- amortecedor do tipo stockbridge frouxo ou com sinal de descarga;
- altura insuficiente do condutor em relação ao solo;
- emendas com defeito;
- falta de paralelismo dos condutores e na regulagem das flechas;
- espaçamento insuficiente dos jumpes em relação à torre;
- cabos para-raios e respectivas ferragens com oxidação ou fios partidos;
- vibração eólica;
- conexões frouxas;
- conectores faltando ou queimados;
- escoras ou abrasões;
- cabos com fios partidos ou sinal de descarga;
- corpo estranho preso no cabo (arame, balão, etc.);
- cabo com mais de duas emendas no mesmo vão;
- esfera de sinalização com defeito ou desapertada no cabo para-raios.

3 ESTUDOS DE CASOS

3.1 Descrição da estrutura

Com o objetivo de investigar o comportamento estrutural e a eficiência econômica do uso de aço inoxidável em torres de transmissão de energia, seis estudos de casos foram selecionados onde houve a variação da altura da torre. Cada caso de estudo tem sido dimensionado para dois tipos de aço: aço inoxidável e aço carbono. No que diz respeito as vantagens econômicas, a comparação foi baseada nos custos totais da torre de transmissão utilizando aço carbono ou inoxidável austenítico em todos os membros estruturais. Os casos de estudo foram baseados em uma torre existente localizada no Rio de Janeiro - Brasil, com uma capacidade de 138kV identificados no presente documento como TE6-Figura 15. Esta torre foi selecionada devido ao acesso do autor aos valores referentes aos custos que a concessionária teve para a sua concepção, fabricação e montagem. Com isto foi possível obter os dados reais com os custos de construção e manutenção da torre. A Figura 16 mostra a torre de transmissão utilizada neste trabalho como base os casos estudados. Esta torre tem uma altura total de 54,3m sendo dividida em três partes, nomeadamente, o pé, a extensão e a parte superior comum. A construção da torre no Brasil foi baseada na variação da extensão mantendo o pé da torre e a parte superior comum constantes. A torre foi construída usando cantoneiras em aço carbono galvanizado a quente. Todos os elementos estruturais são ASTM A36 com tensão de escoamento e última de 253MPa e 407MPa, respectivamente [13]. Todas as cantoneiras são ligadas entre si através de parafusos. No que diz respeito à sua localização geográfica, esta torre foi construída em uma região montanhosa com um nível médio de agressividade ambiental. Além disto, a torre está localizada em uma área de difícil acesso dificultando qualquer inspeção ou manutenção que possa ser realizada.

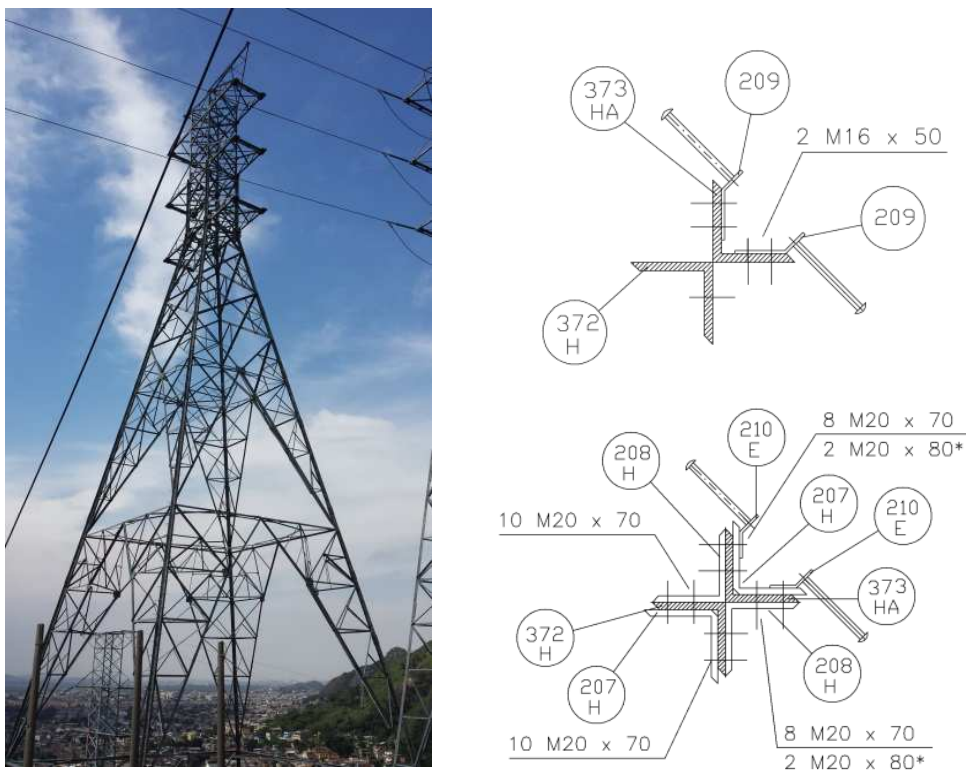
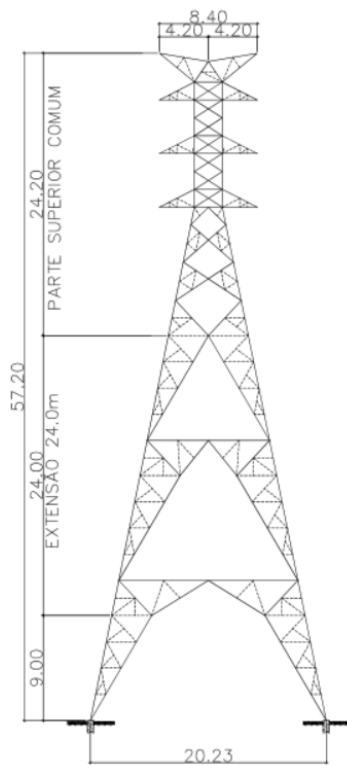
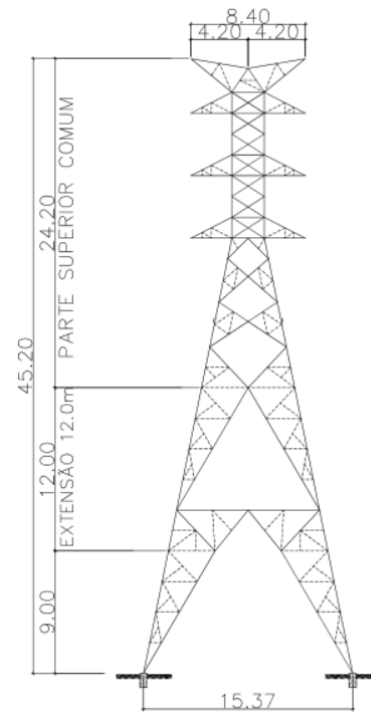


Figura 15: Torre de transmissão TE6.

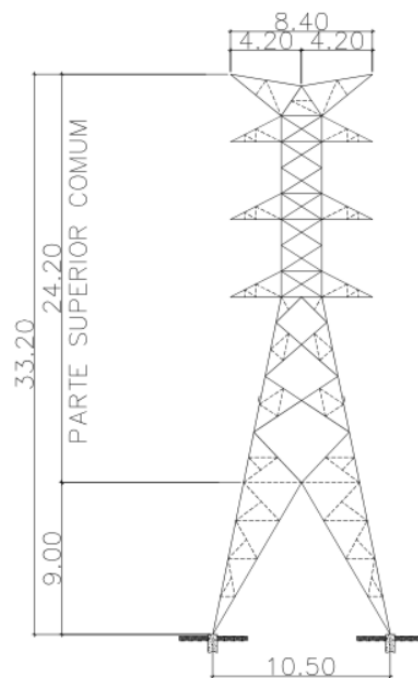
Como mencionado anteriormente, a torre de transmissão é dividida em três partes, portanto, o estudo foi centrado na variação da altura de extensão. Três torres foram selecionadas, a saber: com 24m contendo 1119 perfis, 12m com 851 perfis e por fim a sem extensão possuindo 583 perfis.. A Figura 16 ilustra os três esquemas estruturais utilizados neste trabalho. Cada tipo estrutural foi projetado para dois tipos de aço: aço carbono (ASTM A436) e aço inoxidável austenítico (1.4401). O aço inoxidável adotado tem como valores nominais para tensão de escoamento e tensão limite de resistência, 240MPa e 530MPa, respectivamente, de acordo com a norma europeia EN1993-1-4 [19].



a) Estudo de caso 1



b) Estudo de caso 2



c) Estudo de caso 3

Figura 16: Esquema estrutural dos estudos de caso.

3.2 Análise estrutural

A análise estrutural de torres de transmissão tem sido discutida em diversos trabalhos para caracterizar o real comportamento destes sistemas estruturais. Na verdade, é possível encontrar algumas investigações sobre o uso de elementos finitos de treliça ou viga. De fato, o comportamento das ligações das torres de transmissão torna-se significativo para a obtenção dos esforços. Alguns estudos foram realizados para categorizar as ligações sendo flexível, rígida ou semirrígida. Robert [16] realizou análises não-lineares comparando os dois tipos de elementos finitos para representar os elementos estruturais considerando as ligações como rígidas. Vale ressaltar que os contraventamentos secundários também foram levados em consideração nesta análise. Os resultados mostram que ambos os modelos geraram resultados semelhantes, mas o modelo com elementos de viga apresentou resultados mais adequados. Além disso, Prasad Rao *et al.* [17] mostrou por análises não-lineares que o uso de elementos finitos de viga resultou em uma adequada resposta em comparação com os ensaios experimentais em escala real.

Partindo destes estudos, todos os elementos estruturais foram modelados como elementos finitos de viga onde as ligações aparafusadas foram consideradas como rígidas. Por outro lado, o dimensionamento destas ligações não foi objeto de estudo nesta dissertação. Com o objetivo de analisar os casos de estudo, foram realizadas análises lineares utilizando o programa de elementos finitos Autodesk Robot Structural Analysis Professional [18]. Este programa é bem conhecido por suas capacidades em análise de estruturas, particularmente estruturas de aço, oferecendo vários tipos de análise, ter boa solução de dados de importação/exportação e oferecendo pós-processamento empregando várias normas de dimensionamento. Todos os casos de estudo foram modelados com elementos finitos possuindo seis graus liberdade em cada nó. A malha de elementos finitos foi refinada até se obter uma boa convergência dos resultados. Cada elemento foi dividido em dez elementos finitos. Todas as seções transversais foram definidas utilizando a base de dados do programa. Além disto, todos os membros da torre

foram modelados na análise, incluindo os contraventamentos secundários. Os três modelos em elementos finitos desenvolvidos para todos os casos de estudo podem ser observados na Figura 17.

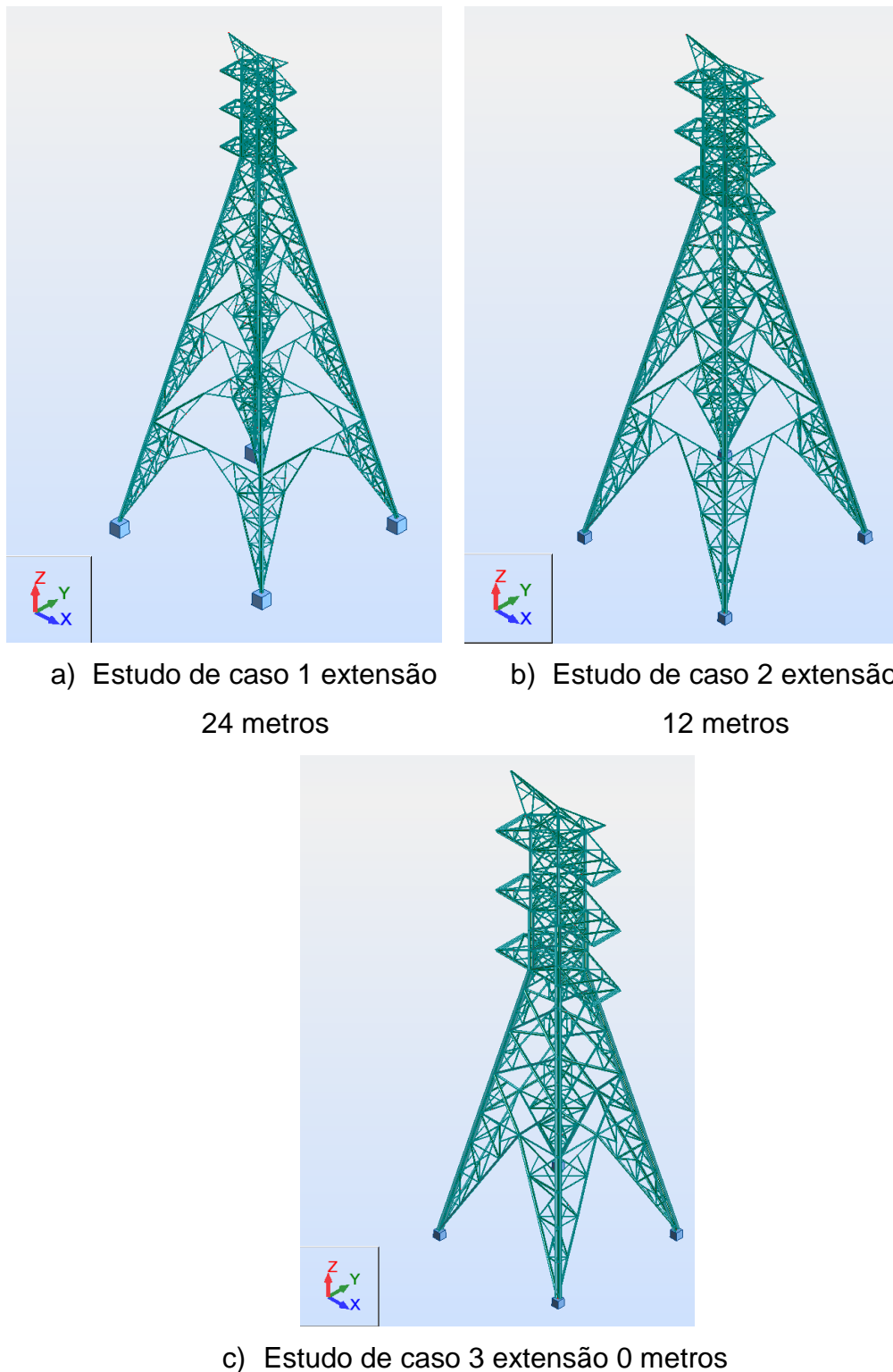


Figura 17: Estudos de casos modelados no Autodesk Robot

Structural Analysis

As torres de transmissão foram modeladas num plano 3D tendo como origem o ponto (0,0,0). Como pode ser observado na Figura 17, os casos de estudos são estruturas simétricas sendo foi diferenciadas uma da outra pela sua extensão possuindo uma parte superior comum a todas onde os carregamentos foram aplicados. As torres estudadas são simétricas em relação ao eixo x/z , z/y , x/y , tanto em carregamento como em dimensões.

O dimensionamento estrutural dos casos de estudo foi realizado considerando as premissas dos códigos europeus, EN1993-1-1 [1] e EN1993-1-4 [19] preconizando recomendações para estruturas em aço carbono e em aço inoxidável, respectivamente. Embora pareça inicialmente contraditório utilizar códigos europeus em dimensionamento de torres localizadas no Brasil, ainda não há códigos brasileiros disponíveis para o projeto de estruturas em aço inoxidável. Portanto, fez-se necessário, para garantir uma análise mais consistente dos custos totais, adotar ambos os códigos europeus para todos os casos de estudo.

3.3 Carregamento e combinações de carga

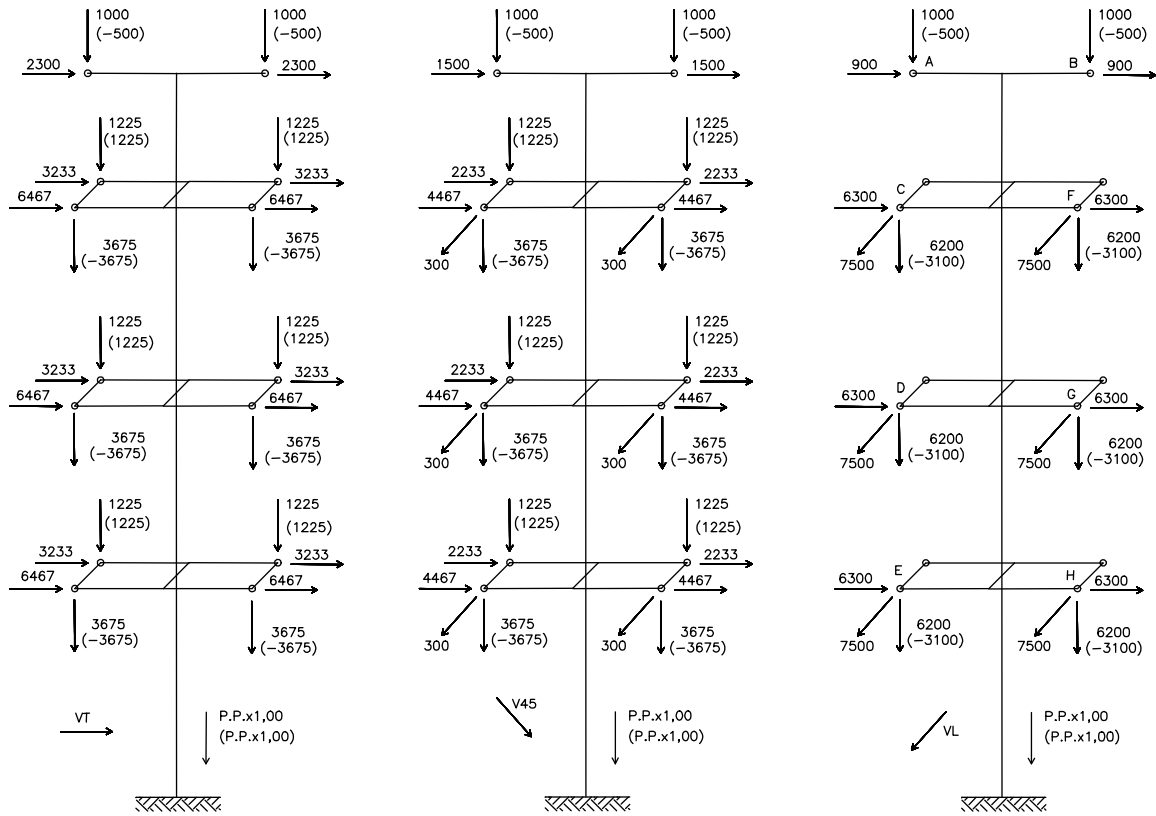
Para este tipo de estrutura devem ser consideradas as cargas provenientes das escadas, plataformas internas, transportadoras verticais, antenas e cabos. Além destas cargas, o vento deve ser considerado desempenhando um importante papel no dimensionamento das torres de transmissão.

As combinações de cargas foram selecionadas de acordo com os equipamentos instalados e as possíveis hipóteses para a carga de vento e curtos-circuitos combinados com as cargas que atuam sobre a estrutura. Para o cálculo das pressões de vento foi adotada a norma NBR-IEC [20], onde o esforço de vento é calculado aplicando esta carga no centro de gravidade de cada "painel" da estrutura,

que seriam os quatros lados da torre considerados como um painel fechado onde se tem um esforço maior do que se considerado somente os perfis.

Com todas as cargas determinadas, o estudo foi direcionado para todas as hipóteses de carregamento que as torres de transmissão possam ter. Neste estudo, todas as combinações de carga na torre de transmissão resultaram em nove hipóteses considerando a variação do vento. Nas Figuras 18, 19 e 20, podem ser observadas todas as hipóteses consideradas neste trabalho. Deve ser levado em consideração, a variação do carregamento baseada na existência ou não de vento e sua respectiva direção.

A partir destas hipóteses conforme Figuras 18, 19 e 20 pôde-se obter todo o carregamento que a estrutura está submetida de acordo com o peso próprio, de seus equipamentos e assim, pôde-se montar todo o seu processo de construção até a sua configuração final. Algumas hipóteses também foram calculadas sem a aplicação da carga de vento, pois nem sempre se tem esta situação na estrutura, lembrando que o processo de montagem e carregamentos são iguais para os três casos de estudos diferenciando apenas pela altura final de cada torre.

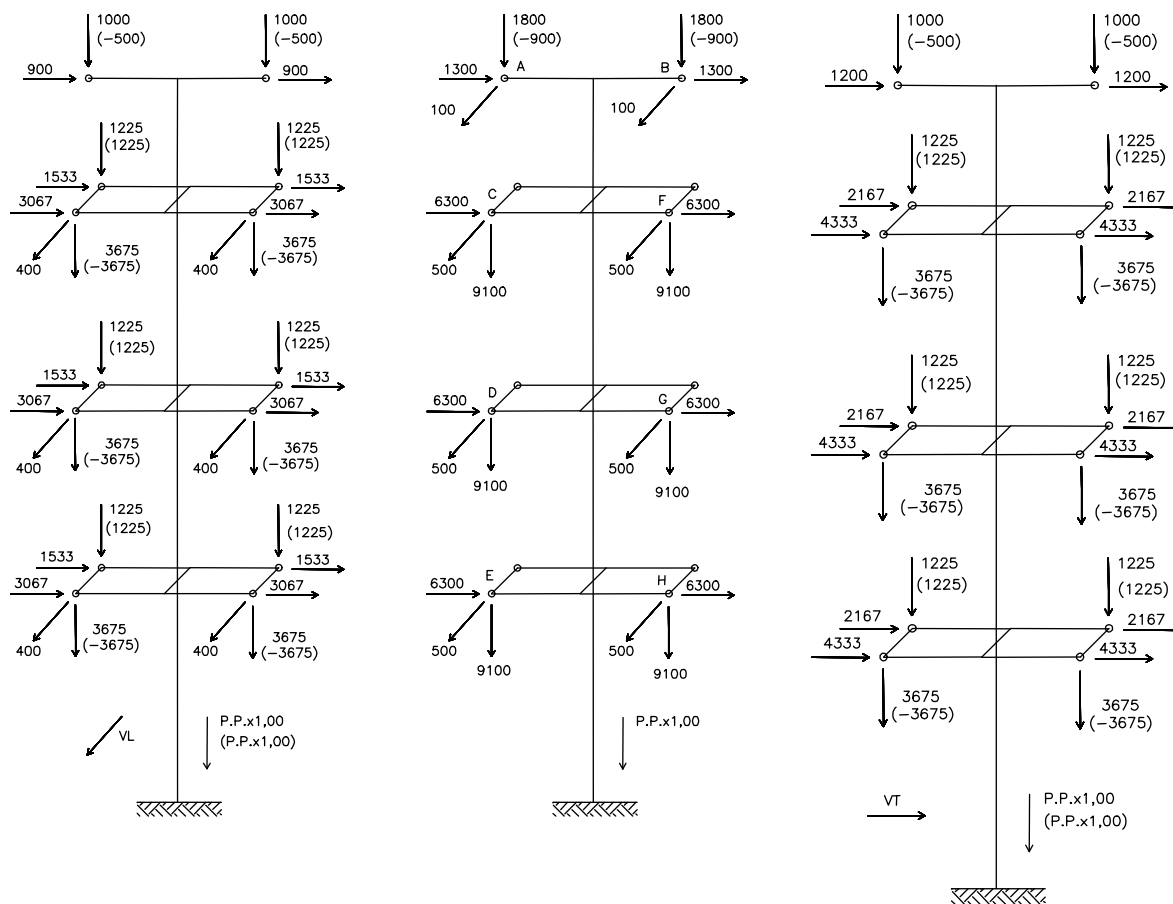


Hipótese 1 - Vento
transversal extremo

Hipótese 2 - Vento
extremo a 45°

Hipótese 3 - Vento
longitudinal extremo

Figura 18: Hipóteses de carregamento 1, 2, 3.

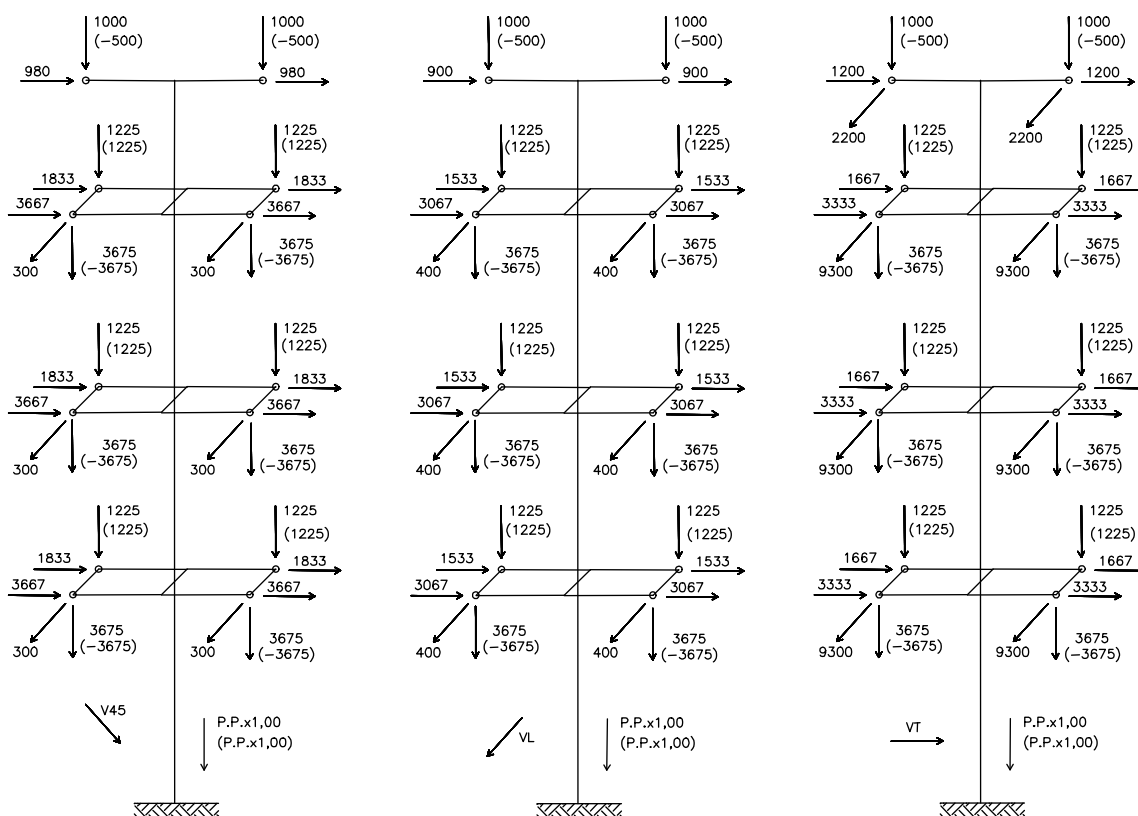


Hipótese 4 - Vento longitudinal em qualquer fase sem vento

Hipótese 5 - Construção e montagem sem vento

Hipótese 6 - Terminal, - Vento transversal extremo

Figura 19: Hipóteses de carregamento 4, 5, 6.



Hipótese 7 - Ventos de
tormentas elétricas a 45°

Hipótese 8 - Ventos de
tormentas elétricas
longitudinais

Hipótese 9 - Ventos de
tormenta elétricas
longitudinais

Figura 20: Hipóteses de carregamento 7, 8, 9.

3.4 Dimensionamento estrutural

Para o dimensionamento estrutural foi utilizado a norma europeia EN1993-1-4 [19], devido a inexistência de critérios específicos para estruturas em aço inoxidável nas normas brasileiras. Porém, foram adotados os perfis nacionais em todos os casos de estudo para se obter os custos referentes a construção.

O cálculo estrutural foi fundamentado no estado limite último da estrutura e no estado limite de serviço, aplicando as combinações possíveis para cada caso juntamente com o carregamento do vento. Os perfis foram verificados com base nos esforços máximos, nomeadamente momento fletor, cortante e normal. O

dimensionamento das ligações não foi realizado pois não fez parte do escopo deste trabalho, ficando para trabalhos futuros.

As combinações de carregamentos foram feitas de acordo com a necessidade da concessionária de responsável pela distribuição de energia para a cidade do Rio de Janeiro a Light Serviços de Eletricidade S.A, com relação aos equipamentos instalados e as possíveis hipóteses quanto a carga de vento e curto-circuito combinados com as cargas atuantes na estrutura.

Para o dimensionamento da estrutura fez-se uso de cantoneiras em todos os elementos estruturais. Os pés da torre foram compostos por quatro cantoneiras devido aos esforços solicitados nestes elementos estruturais, que são os *stubs* que ficam na parte interna da fundação onde são concretados junto com a base. Como base para este estudo, partiu-se das mesmas cantoneiras utilizadas na torre existente. Com relação ao material empregado nos elementos estruturais, foi utilizado o aço ASTM A-36 com as seguintes propriedades: tensão de escoamento (f_y) de 253MPa, tensão última (f_u) de 407MPa, módulo de elasticidade transversal (G) de 81 GPa, módulo de elasticidade longitudinal (E) de 210 GPa e coeficiente de Poisson no regime elástico (ν) de 0,3. Para os perfis em aço inoxidável foi utilizado o autêntico grau 1.4401 com as seguintes propriedades: tensão de escoamento (f_y) de 298MPa, tensão última (f_u) de 588MPa, módulo de elasticidade transversal (G) de 84,6 GPa, módulo de elasticidade longitudinal (E) de 220 GPa e coeficiente de Poisson no regime elástico (ν) de 0,3.

3.4.1 Estruturas em aço carbono

Utilizando os dados das combinações e hipóteses de cálculo da torre tipo TE6 mencionados acima, foi executado o dimensionamento dos perfis conforme prescrição do EN1993-1-1 [1] conforme descrito a seguir:

- 1) Classificação das seções transversais.

De posse das características dos perfis e fórmulas descritas abaixo, foram realizadas as classificações das seções das cantoneiras escolhidas para o dimensionamento da estrutura.

$$h/t \leq 15 \varepsilon \quad (1)$$

onde:

ε é o parâmetro = $\sqrt{235 / f_y}$;

t é a espessura das abas da cantoneira;

h é a altura das abas das cantoneiras;

2) Verificação da resistência da seção transversal das cantoneiras

Após a classificação das seções foi realizada a verificação da resistência da seção transversal das cantoneiras, utilizando as prescrições do EN1993-1-1 [1] e EN1993-1-8 [21], através das fórmulas descritas abaixo. Sendo as torres constituídas por cantoneiras de abas iguais foi seguido o valor de cálculo da resistência última da seção útil que foi determinado por:

1) Compressão

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1 \quad (2)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3)$$

onde:

N_{Ed} é o valor de cálculo do esforço normal atuante;

$N_{c,Rd}$ é o valor de cálculo do esforço normal resistente de compressão;

A é a área da seção transversal;

f_y é a tensão de escoamento do aço;

II) Verificação da resistência das cantoneiras à compressão

Conforme prescrito em 6.3.1.1(1) do EN1993-1-1 [1], um elemento comprimido deverá ser verificado em relação à flambagem através da Equação 4. Em detalhes, o cálculo da resistência $N_{b,Rd}$ é obtido pela Equação 5.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1 \quad (4)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5)$$

Como pode ser observado, o valor da carga de dimensionamento deve ser reduzida devido ao fenômeno de flambagem aplicando o coeficiente de redução que pode ser obtido pela Equação 6.

$$\chi = \frac{1,0}{\phi + \sqrt{\phi^2 + \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad (6)$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (7)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}} \quad (8)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \quad (9)$$

onde:

λ_1 é o valor da esbelteza de referência para determinar a esbelteza normalizada;

α é o fator de imperfeição para a flambagem de elementos comprimidos;

ϕ é um valor adotado para determinar o coeficiente de redução χ ;

χ é o coeficiente de redução.

Com isto, deve ser definida a curva de flambagem para a obtenção do coeficiente de redução. Conforme o Quadro 6.2 do EN1993-1-1 [1], a curva b deve ser utilizada resultando em um coeficiente, α , igual a 0,34.

III) Verificação da resistência à estabilidade

As cláusulas 6.3.3 (1) e (4) do EN1993-1-1 [1], estabelecem que a estabilidade deverá ser verificada para seções transversais duplamente simétricas solicitadas à flexão composta com compressão e não sujeitas à distorção, onde se faz uma distinção entre:

– elementos não suscetíveis às deformações por torção, por exemplo, secções tubulares circulares ou secções travadas em relação à torção;

– elementos suscetíveis às deformações por torção, por exemplo, elementos com secções transversais abertas e não travadas em relação à torção.

onde estes elementos deverão satisfazer as seguintes condições:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \times \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \times \frac{M_{y,Rk}}{Y_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{Y_{M1}}} \leq 1 \quad (10)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \times \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \times \frac{M_{y,Rk}}{Y_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{Y_{M1}}} \leq 1 \quad (11)$$

sendo:

χ_y , χ_z são os coeficientes de redução devido à flambagem por flexão no eixo considerado;

$N_{Rk} = M_{y,Ed} = M_{z,Ed}$ são os valores de cálculo do esforço de compressão e dos momentos máximos no elemento, em relação aos eixos y-y e z-z;

χ_{LT} é o coeficiente de redução devido à flambagem lateral;

k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} são os fatores de interação.

Nos anexos do EN1993-1-1 [1] são apresentados dois métodos para o cálculo dos fatores de interação k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} e k_{zz} : o método 1, desenvolvido por um grupo de estudiosos Franco-Belgas e o método 2, desenvolvido por um grupo de estudiosos Austros-Alemães. O anexo do EN1993-1-1 [1] permite a utilização de qualquer um dos métodos citados [1].

Neste trabalho, para a verificação da estabilidade dos perfis de cantoneira de abas iguais foi utilizado o método 1 utilizando as equações do anexo A do EN1993-1-1 [1], com os respectivos coeficientes de redução devido à flambagem lateral (χ_{LT}) conforme cláusula 6.3.2 e fatores de interação (k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} e k_{zz}).

$$\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha (\overline{\lambda}_{LT} - 0,2) + \overline{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (12)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1,0}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 + \overline{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0 \quad (13)$$

onde:

α é o fator de imperfeição para a flambagem de elementos comprimidos;

χ_{LT} é o coeficiente de redução para a flambagem lateral;

ϕ_{LT} é um valor adotado para determinar o coeficiente de redução χ_{LT} ;

α_{LT} é o fator de imperfeição para a flambagem lateral;

$\overline{\lambda}_{LT}$ é a esbelteza normalizada para a flambagem lateral.

Com base na Tabela A.2 do EN1993-1-1 [1], os fatores de interação (k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} e k_{zz}) podem ser obtidos aplicando as equações:

$$K_{yy} = K_{zy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - N_{Ed}/N_{cr,y}} \quad (14)$$

$$K_{zz} = K_{yz} = C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - N_{Ed}/N_{cr,z}} \quad (15)$$

$$\mu_y = \frac{1}{1 - \chi_y N_{Ed}/N_{cr,y}} \quad (16)$$

$$\mu_z = \frac{1}{1 - \chi_z N_{Ed}/N_{cr,z}} \quad (17)$$

sendo,

C_{My} e C_{Mz} são os coeficientes de momentos uniformes equivalentes.

μ_y e μ_z são os termos auxiliares.

3.4.2 Estruturas em aço inoxidável

Utilizando os dados dos perfis utilizados para a torre em aço carbono, foi executado o dimensionamento dos perfis conforme prescrição do EN1993 1-4 [19] e passos descritos a seguir.

I) Classificação das seções transversais.

De posse das características dos perfis e fórmulas descritas abaixo foram realizados as classificações das seções das cantoneiras escolhidas para o dimensionamento da estrutura .

$$h/t \leq 11,9 \epsilon \quad (18)$$

II) Verificação da resistência da seção transversal das cantoneiras

Após a classificação das seções foi realizada a verificação da resistência da seção transversal das cantoneiras, utilizando as prescrições do EN1993-1-4 [19]. Vale ressaltar que as fórmulas são as mesmas que as prescritas para o aço carbono.

III) Verificação da resistência das cantoneiras à compressão

A resistência à flambagem de elementos uniformes sob compressão foi verificado conforme prescrição do EN1993-1-1 [1], pois o EN1993-1-4 [19], não prescreve uma fórmula específica. Este apenas estipula uma fórmula distinta para o parâmetro Φ para determinar o coeficiente de redução χ , conforme equação 20.

$$\varphi = 0,5 \left[1 + \alpha \left(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0 \right) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (19)$$

onde, conforme Tabela 5.3 do EN1993-1-4 [19]: $\lambda_0 = 0,20$ e $\alpha = 0,49$

Para o cálculo das resistência a flambagem lateral do perfil para o aço inoxidável, o parâmetro Φ_{LT} e o coeficiente de redução χ_{LT} são obtidos através das expressões abaixo conforme EN1993-1-4 [19].

$$\chi_{LT} = \frac{1,0}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0 \quad (20)$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} \left(\bar{\lambda}_{LT} - 0,4 \right) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (21)$$

sendo, $\alpha_{LT} = 0,76$ conforme Tabela 5.3 do EN1993-1-4 [19].

IV) Verificação da resistência à estabilidade

Para a verificação da resistência à compressão para os perfis de aço inoxidável, o EN1993-1-4 [19] adota os mesmos critérios de avaliação que o aço carbono, porém a mudança é dada na expressão utilizada para a verificação da resistência a estabilidade e deve satisfazer as seguintes condições:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min}} + k_y \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} \times W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M1}} \right) + k_z \left(\frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} \times W_{pl,z} \times f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (22)$$

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} + k_{LT} \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) + k_z \left(\frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} \times W_{pl,z} \times f_y} \right) \leq 1 \quad (23)$$

onde:

e_{Ny} e e_{Nz} são os deslocamentos nos eixos neutros quando a secção transversal é sujeita a compressão uniforme;

N_{Ed} , $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ são os valores de cálculo da força de compressão e os momentos máximos sobre o eixo y-y e z-z ao longo do elemento, respectivamente;

$(N_{b,Rd})_{\min}$ é o menor valor de $N_{b,Rd}$ para os seguintes quatro modos de flambagem : flexão flambagem sobre o y eixo, flexão flambagem em torno do eixo z, flambagem de torção e flambagem de torção - flexão;

$(N_{b,Rd})_{\min 1}$ é o menor valor de $N_{b,Rd}$ para os três seguintes modos de flambagem:

$\beta_{w,y}$ e $\beta_{w,z}$ são os valores de β_w determinado para a y e z respectivamente, nos quais:

$\beta_w = 1,0$ para secções de classe 1 e 2

$\beta_w = W_{el}/W_{pl}$ para secções de classe 3

$\beta_w = W_{eff}/W_{pl}$ para secções de classe 4

$W_{pl,y}$ e $W_{pl,z}$ são os módulos de plástico para a Y e Z respectivamente;

$N_{b,Rd}$ é a resistência à flambagem lateral;

k_y , k_z , k_{LT} são os fatores de interação;

Segundo o EN1993-1-4 [19] são recomendados os seguintes condições para os valores dos fatores k_y , k_z , k_{LT} :

$$k_y = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \quad 1,2 \leq k_y \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}}$$

$$k_z = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_z - 0,5) \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} \quad 1,2 \leq k_z \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}}$$

$$k_{LT} = 1,0$$

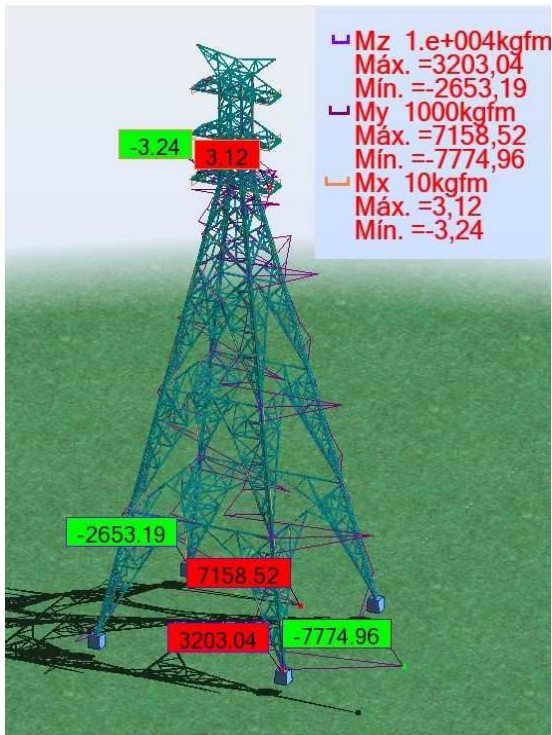
A metodologia para a realização da verificação dos perfis como elemento composto em aço inoxidável foi a mesma utilizada para os em aço carbono, divergindo apenas nos valores de resistência dada a diferença nos valores da tensão de escoamento (f_y) e módulo de elasticidade (E).

3.5 Resultados

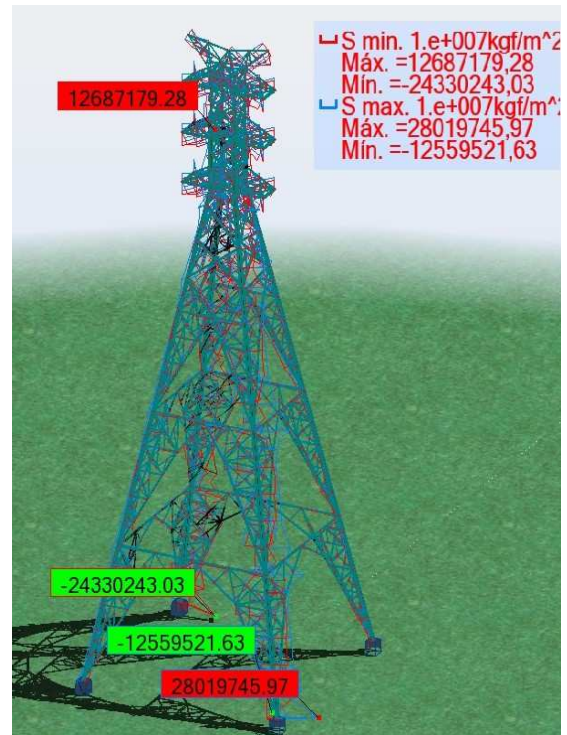
Analisando todos os casos de carregamento considerando a variação do vento, o dimensionamento foi baseado na hipótese mais gravosa à estrutura em termos de esforços. Em outras palavras, os máximos esforços obtidos em uma determinada combinação foi considerado para o dimensionamento dos perfis. Da Figura 21 a Figura 23 são apresentados os máximos esforços obtidos para momento fletor, cortante e esforço normal.

Embora o programa Autodesk Robot Structural Analysis Professional [18] tenha sido usado para realizar as análises com o objetivo de se obter os esforços, este programa possui uma importante característica que é dimensionamento baseado em normas. Como o Autodesk Robot [18] não possui em sua biblioteca norma referente às estruturas em aço inoxidável a verificação dos perfis foi realizada o uso do Excel[®] [22]. No ANEXO I apresenta a planilha desenvolvida via Excel para o dimensionamento de cantoneiras de abas iguais usando aço inoxidável.

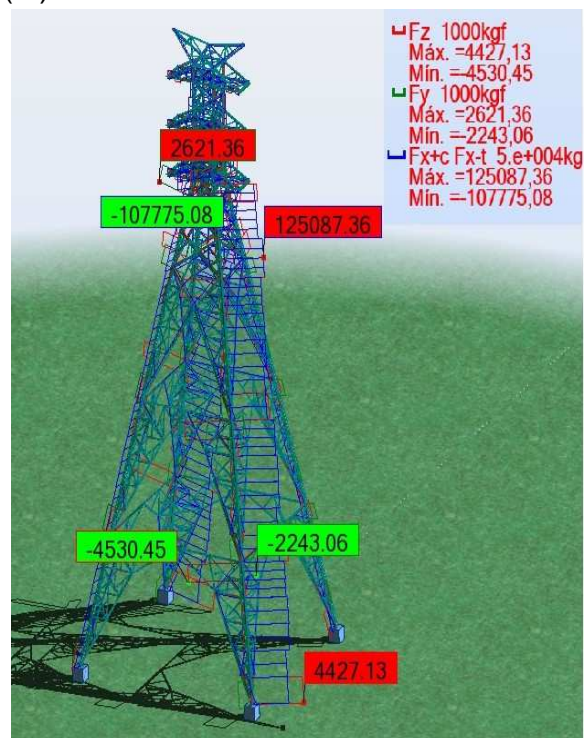
Portanto, as estruturas dos três casos de estudo foram dimensionadas conforme descrito acima. O peso total de cada torre é referido na Tabela 1. Pode-se observar que, as torres em aço inoxidável são mais pesadas que as de aço carbono, devido à falta de variedades de perfis nacionais e, em muitos casos, por não possuir perfil equivalente, adotou-se um perfil de maior bitola. Este fato foi atribuído ao número limitado de perfis brasileiros em aço inoxidável. Na concepção estrutural, foi realizada uma variedade de iterações, a fim de obter o melhor perfil de aço com uma relação de trabalho reduzida (diferença entre a carga de concepção e capacidade de resistência). A diferença encontrada para o esquema estrutural entre as três foram: 23%, 22% e 7% para os casos 1, 2 e 3, respectivamente.



a) Diagrama de momentos fletores (M).

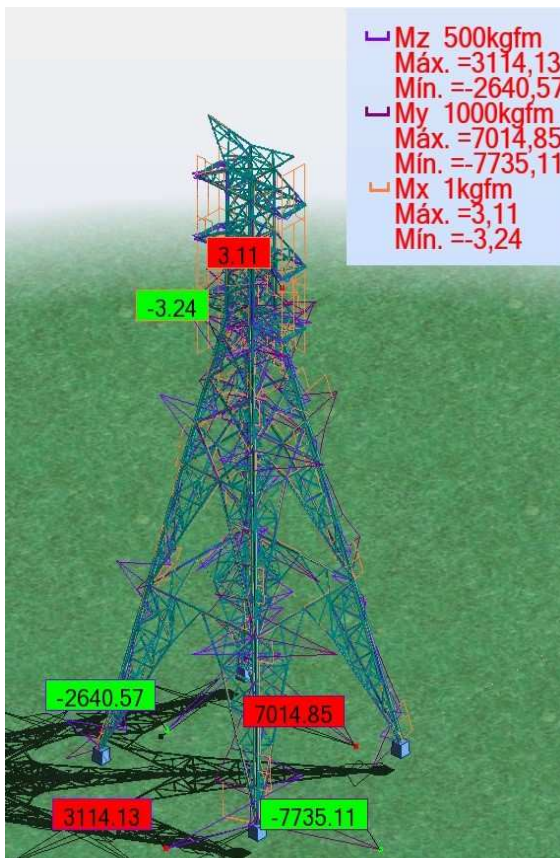


b) Diagrama de esforços normais (N).

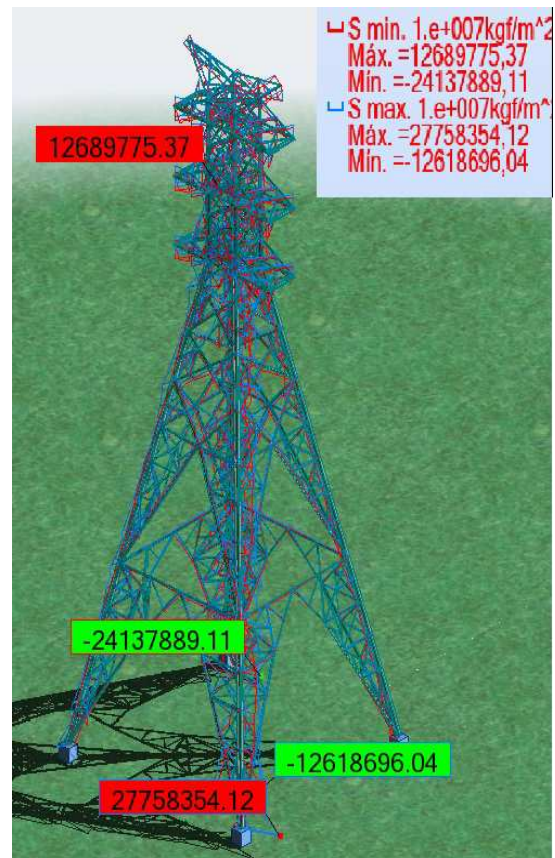


c) Diagrama de esforços cortantes (Q).

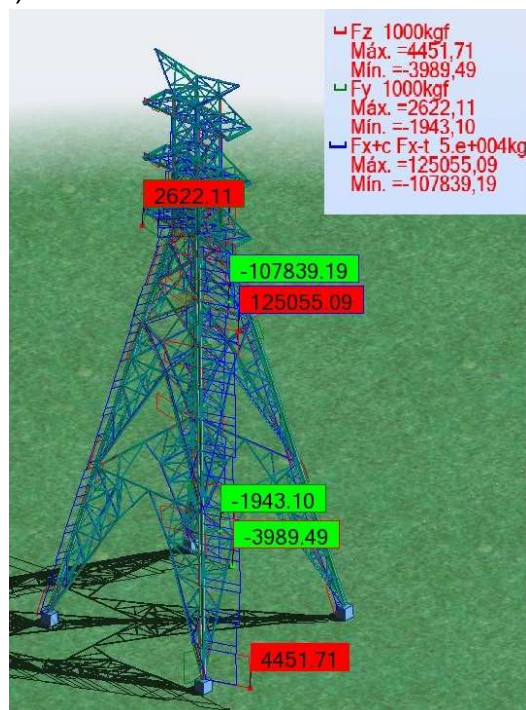
Figura 21: Resultados estudo de caso 1.



a) Diagrama de momentos fletores (M).

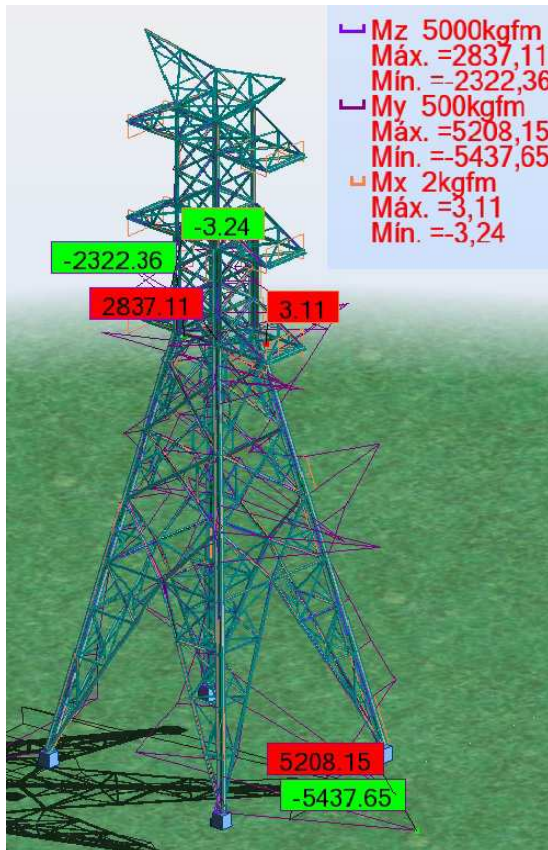


b) Diagrama de esforços normais (N).

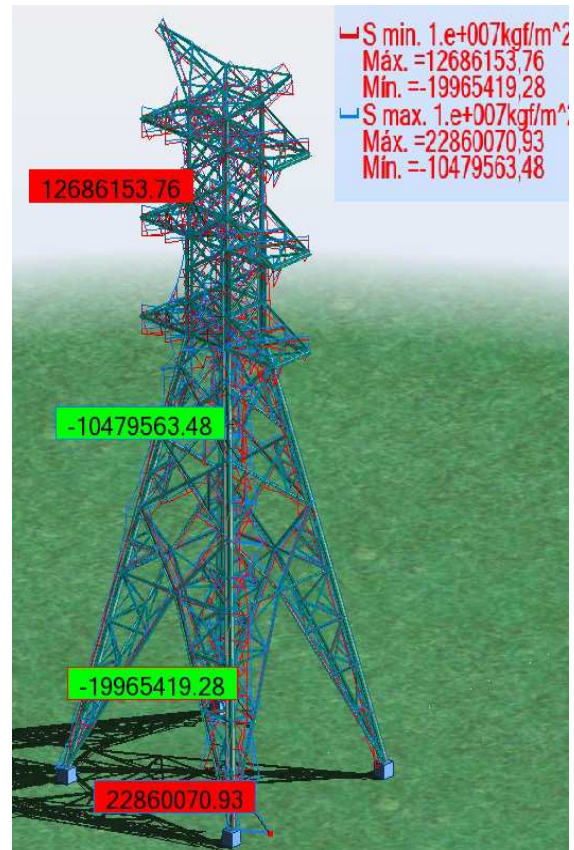


c) Diagrama de esforços cortantes (Q).

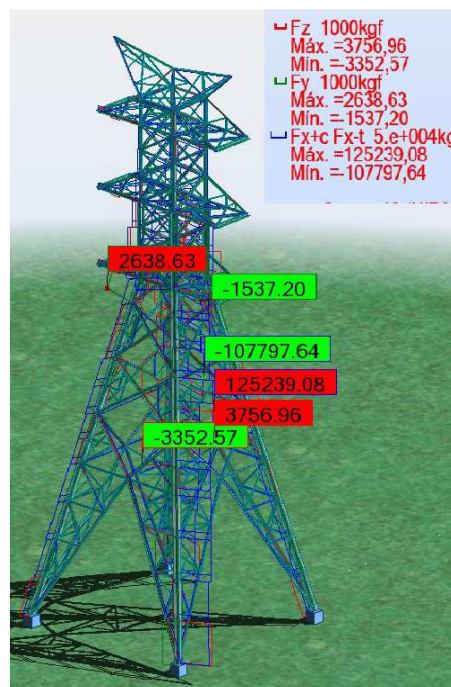
Figura 22: Resultados estudo de caso 2.



a) Diagrama de momentos fletores (M).



b) Diagrama de esforços normais (N).



c) Diagrama de esforços cortantes (Q).

Figura 23: Resultados estudo de caso 3.

Tabela 1: Peso Total das Torres

| Estudo de Caso | Altura da Torre (m) | Aço Carbono (t) | Aço Inoxidável (t) |
|-----------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------|
| 1 | 57,2 | 40,8 | 49,9 |
| 2 | 45,2 | 30,0 | 36,5 |
| 3 | 13,2 | 21,5 | 22,9 |

4 ANÁLISE ECONÔMICA

Um dos primeiros estudos relacionados a avaliação do ciclo de vida foi realizado por Harold Smith, em 1963 [22], na "World Energy Conference", onde foram apresentadas as necessidades de energia para a fabricação de produtos químicos e foi onde se obteve o primeiro marco para estes tipos de análise levando em conta o ciclo de vida.

A MRI Midwest Research Institute realizou em 1969, um estudo comparativo de diferentes tipos de refrigerantes, que por sinal foi contratado pela "The Coca-Cola Company" e apresentou o melhor desempenho ambiental relacionado a conservação de recursos naturais e emissão de resíduos de garrafas pet [24].

Este instituto realizou diversos estudos neste sentido sempre focando na análise de ciclo de vida, considerando-se desde a extração da matéria-prima até a disponibilização final dos seus resíduos, passando desde as produções, uso e a reciclagem dos produtos.

LEVY [25] em 1995 verificou que os estudos realizados anteriormente envolviam apenas os aspectos quantitativos relativos a medição de recursos, o uso da energia, a produção e a geração de resíduos, foi então que ele teve a ideia de adicionar duas novas etapas que seriam a avaliação de impactos e a avaliação de melhorias para a análise de ciclo de vida.

Aqui no Brasil toda a análise de ciclo de vida é normatizada pelas ISO 1404, 1401, 1402 e 1403, que foram traduzidas e adaptadas às terminologias brasileiras pela ABNT. Sendo assim hoje tem-se as normas NBR ISO 14040 [26], ABNT NBR ISO 14041 [27], ABNT NBR ISO 14042 [28] e a ABNT NBR ISO 14043 [29].

Os custos das torres de transmissão foram avaliadas com base nos custos do ciclo de vida (CCV), onde outros importantes fatores devem ser considerados, partindo do custo de construção, manutenções e etc. Este tipo de estudo teve-se como verdade que o aço inoxidável é reconhecido como um material custo elevado para a engenharia estrutural quando os custos a longo prazo não são considerados. Na verdade foi necessário considerar a durabilidade e facilidade de manutenção a partir dos tipos de aços inoxidáveis que, às vezes, pode compensar o elevado custo inicial, e muitas vezes, é a opção mais eficiente em comparação ao aço carbono. Portanto, o CCV é uma metodologia que fornece parâmetros para analisar o

desempenho a longo prazo considerando um mínimo de tempo de inatividade e os custos associados à manutenção comparando diversos materiais. Esta técnica é capaz de identificar e quantificar todos os custos, inicial e permanente, associados com a implementação e uso da estrutura.

Todos os custos durante as diferentes fases da análise do ciclo de vida do projeto são considerados: estudo, projeto, transporte, instalação, manutenção programada e corretiva até o fim da vida da estrutura. Os resultados da análise CCV devem fornecer uma alternativa adequada para ser considerada entre os dois materiais investigados. De modo a obter resultados satisfatórios na análise CCV, todos os passos envolvidos no processo devem ser tomados com antecedência, isto é, a sua característica, e principalmente, das propriedades dos materiais que forem empregados na estrutura. Neste trabalho, estas informações foram obtidas através dos fornecedores e de experiências do autor desta dissertação em torres de transmissão de energia.

Em geral, CCV permite que potenciais benefícios a longo prazo possam ser avaliados considerando o custo inicial, manutenção e sua frequência, os efeitos de inatividade, as perdas de produção, reparação, substituição, e outros custos operacionais. A expressão a seguir pode ser empregue na avaliação da CCV [30]:

$$CCV = AC + IC + \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{(1+r)^i} + \sum_{j=1}^a \frac{(A_j \quad R_j)}{(1+r)^{i(j)}} \quad (24)$$

onde,

- AC é o custo do material
- IC é o custo de fabricação e montagem
- C é o custo de operação e manutenção para um certo (ano)
- A_j é o custo de reposição
- R_j corresponde ao valor de vida para a instalação, em anos
- N é o tempo do ciclo de vida para a instalação, em anos
- r é o custo de capital, % dividida por 100
- i é o ano do evento

a é o número de reposições da unidade durante o ciclo de vida do sistema

O AC é o custo do material, neste caso, é o valor dos perfis de aço. O custo de fabricação (IC) consiste no valor gasto para construir a torre levando-se em conta, todos os fatores para a construção da torre. Este valor foi obtido pela construção do TE6 em 2014, por conseguinte, a experiência, neste caso, é um fator essencial para evitar erros na avaliação dos dados. O parâmetro C corresponde aos custos de manutenção programados a serem realizados ao longo dos anos incluindo os custos das inspeções, manutenções e receitas perdidas durante tal tempo de inatividade. Os custos de substituição (A_j) são a soma do custo calculado para reparar e substituir os membros estruturais. O valor residual (R_j) é o valor da sucata de material após a sua desativação.

Em relação à correção monetária, o custo do capital (r) foi calculado a partir da taxa nominal (n) e da inflação (q) esperada para o período considerado (N), utilizando a seguinte expressão [30] :

$$r = \frac{(n - q)}{(1 + q)} \quad (25)$$

Na prática, a utilização do CCV para avaliar o investimento de uma solução estrutural dada foi realizada por meio do cálculo do custo de cada fator considerado no estudo sobre o tempo de avaliação usando a inflação e, em seguida, estes fatores de custo fixo serão trazidos a valor presente (VP) de acordo com as taxas de oportunidades para avaliar se as unidades em estudo são financeiramente mais vantajosas.

Foi estudado por SANTOS [30] em sua tese de doutorado, a avaliação do ciclo de vida de evaporadores para usinas de açúcar onde se realizou uma análise de custo de vida útil entre tubos de aço carbono e aço inoxidável, desde a fabricação, transporte, avaliação ambiental, até o descarte que por sinal obteve resultados mais satisfatórios quando comparado com a maioria dos tubos em aço carbono para estas estruturas.

4.1 Estimativa do ciclo de vida

A vida útil estimada para a torre estudada baseou-se na durabilidade de seus perfis. A torre em aço carbono, resiste ao ambiente onde está instalada devido, principalmente, ao seu tratamento de galvanização a quente que é feito após a sua fabricação.

A Tabela 2 mostra o fator de deterioração considerado neste estudo para todos os estudos de caso. Como pode ser observado, após 30 anos, a torre de transmissão deve ser sujeito a substituição de 100% dos seus perfis, devido ao elevado nível de corrosão observado nos seus elementos estruturais.

Tabela 2: Ciclo de vida dos materiais [31]

| Tipo de Aço | % Falha | | |
|-------------|---------|---------|---------|
| | 10 anos | 20 anos | 30 anos |
| Carbono | 30 | 70 | 100 |
| Inoxidável | - | 5 | 10 |

4.2 Preços dos Perfis

O preço dos perfis em aço carbono adotado para este estudo foi utilizado através alguns fornecedores que atualmente fornecem estes perfis para as prestadoras de serviço da concessionária, que são medidos em kg de aço independentemente do tipo de perfil a ser instalado na estrutura. Neste valor já está incluso o preço de transporte até o canteiro da obra.

Para os tubos de aço inoxidável foi adotado o valor de um fabricante I que possuía a maior variedade de perfis para serem fornecidos nacionalmente. A Tabela 3 relaciona o preço/kg para cada tipo de aço utilizado para realizar a comparação de

custos da estrutura estudada. Como esperado, o preço do aço inoxidável é superior ao aço carbono chegando a uma diferença de aproximadamente 70%.

Tabela 3: Preço unitário po kg de aço.

| Tipo Aço | Custo Unitário |
|--------------------|----------------|
| | R\$/kg |
| Aço Carbono | 7,35 |
| Aço Inoxidável 304 | 12,74 |

4.3 Comparação de custos

Nesta seção, serão abordados os custos das torres de transmissão dimensionadas no capítulo anterior, para os dois tipos de aço utilizados. Esta comparação tem como objetivo apresentar os custos para a construção de torres novas tanto para aço carbono quanto para aço inoxidável e a manutenção de ambos os materiais no decorrer do tempo. A proposta foi verificar se o investimento inicial será compensado pelo ponto de vista da manutenção propriamente dita, ao longo da vida útil dos materiais envolvidos. O aço inoxidável tem um custo menor porque possui um custo de manutenção muito reduzido, já sendo suficiente para justificar sua utilização, de acordo com o plano de manutenção em estruturas de aço carbono utilizado pelas concessionárias que é de 3 em 3 anos até o limite de 30 anos. Para demonstrar estes custos serão apresentados os valores das estruturas dimensionadas no capítulo anterior, os gastos com as manutenções das estruturas de aço carbono galvanizado e aço inoxidável.

4.3.1 Custos para a construção

O custo de construção baseia-se nos valores a serem atribuídos as seguintes tarefas: projeto estrutural, perfis de aço, transporte e montagem. Em geral, os custos

estão associados ao peso global das estruturas dos estudos de casos. Nesta fase, cada tarefa é atribuída para o valor a ser considerado tendo como referência a torre existente localizada no Rio de Janeiro - TE6. Os custos a serem gastos nesta torre foram tomados como referência porque correspondem a valores reais e atuais. É importante notar que a fundação também foi considerada nesta fase. Por outro lado, houve uma ligeira diferença entre as duas soluções em termos de peso global resultante em soluções similares. Em geral, a soma de todos os valores incluídos neste passo é empregue na expressão CCV como parâmetros de corrente alternada e IC.

A Tabela 4 apresenta os valores para a construção dos três estudos de caso. Todos os valores foram calculados considerando a moeda local (R\$) e dólar com uma taxa de câmbio de R\$ 3,54. Como esperado, as torres de transmissão usando o aço inoxidável foram responsáveis pelos valores mais elevados devido ao preço dos perfis. É interessante notar que a diferença entre as duas soluções reduz para as torres mais baixas. Isso está relacionado a dois fatores: o primeiro está relacionado ao nível de segurança do código de dimensionamento e o segundo está relacionado ao número limitado dos perfis de aço inoxidável comerciais. Na verdade, a torre menor e dimensionada para carga menores, principalmente, para a ação do vento, resultando em perfis mais leves. Em suma, a diferença encontrada para os esquemas estruturais foi de 53%, 50% e 30% para os estudos de caso 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 4: Custos de construção para os três estudos de caso. 1 US\$ = R\$ 3,54

| Estudo de Caso | Altura (m) | Aço Carbono | Aço Inoxidável |
|----------------|------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 57.2 | R\$ 726.705,80 (US\$ 205.284,12) | R\$ 1.115.023,27 (US\$ 314.978,32) |
| 2 | 45.2 | R\$ 587.715,63 (US\$ 165.173,90) | R\$ 887.309,85 (US\$ 250.652,50) |
| 3 | 13.2 | R\$ 476.253,11 (US\$ 134.534,77) | R\$ 619.147,84 (US\$ 17.490,05) |

O ANEXO II é apresentado os valores abertos contendo cada tipo de serviço necessário para a construção de cada torre.

4.3.2 Custos de manutenção

Uma consideração essencial para elaboração de um projeto consistente de torres de transmissão é a escolha do tipo de proteção à corrosão ideal para cada tipo de agressividade. As torres de transmissão que estão sendo investigadas estão localizadas no Estado do Rio de Janeiro, mais precisamente nas regiões Centro, Oeste, Baixada Fluminense e Vale do Paraíba, e ficam na sua grande maioria, localizadas em altos relevos recebendo assim, uma grande ação de agentes agressivos provenientes de maresias e o próprio local de acesso que por inúmeras vezes é possível apenas por transporte aéreo devido as dificuldades impostas pelo terreno, logo se torna um ambiente muito propício a corrosão.

Não se pode deixar de mencionar que o melhor combate à corrosão chama-se manutenção preventiva, onde independente do material utilizado, esta programação deve ser mantida afim de garantir a vida útil da estrutura. A vida útil de estruturas em aço carbono para os casos de estudo passa por processo de galvanização por imersão a quente como proteção superficial obtendo assim, uma vida útil de 10 a 30 anos dependendo da região onde foi instalada. Tal proteção tem um papel muito importante no projeto pelo seu alto custo comparado ao custo de construção, em seguida, estes perfis recebem uma nova proteção superficial através de pintura, que para efeito de vida útil, pode variar de 7 a 10 anos impactando no custo final da estrutura.

Em geral não é possível obter uma especificação de vida útil das estruturas, pois varia em função de vários agentes causadores como ambientes, fenômenos naturais, condições de solo e equipamentos que a estrutura está sustentando.

As intempéries para o caso estudado foram observadas no dimensionamento das torres, sendo assim a estimativa de vida útil econômica para esta estrutura foi de 30 anos para as torres de linhas de transmissão. Para efeito de cálculo foram adotados os custos de manutenção conforme preços utilizados pela concessionária, para um período de 3 em 3 anos para a estrutura em aço carbono, foi considerado o limite de 30 anos, onde para o aço carbono foi considerado além dos itens administrativos que são comuns aos dois materiais como projeto, seguros, os serviços de recuperação estrutural, reforço e troca de peças e pintura. Para o aço inoxidável, além dos itens comuns foi considerado apenas o hidrojateamento que é o

único serviço de manutenção que deve ser executado durante este período de vida útil da estrutura conforme foi estudado por Cardoso [31].

A Tabela 5 apresenta um resumo dos custos comparativos das estruturas no período de estudo onde pode-se observar os valores da manutenção que cada tipo de aço resultaria de acordo com a necessidade de troca e reparo para o aço carbono e o hirojateamento para o aço inoxidável e os serviços administrativos que são comuns aos dois tipos. Como pode ser observado no primeiro instante, tem-se uma diferença de aproximadamente 2,4 vezes a mais no custo de manutenção de uma estrutura em aço carbono devido ao forte ataque de agentes de corrosão na mesma, em média 20 % dos perfis são recuperados e 15 % precisam de reforço e/ou troca de suas peças.

Tabela 5: Custos manutenção torres. 1 US\$ = R\$ 3,54

| Estudo de Caso | Altura (m) | Aço Carbono | Aço Inoxidável |
|----------------|------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 57.2 | R\$ 148.627,67 (US\$ 41.985,21) | R\$ 61.599,75 (US\$ 17.401,05) |
| 2 | 45.2 | R\$ 110.017,72 (US\$ 31.078,45) | R\$ 41.588,33 (US\$ 11.748,11) |
| 3 | 13.2 | R\$ 98.917,97 (US\$ 27.942,92) | R\$ 49.599,75 (US\$ 14.011,22) |

No ANEXO III é apresentado os valores abertos contendo cada tipo de serviço necessário para a manutenção das torres avaliadas.

4.4 Análise monetária

Como o custos estudados acontecem ao longo de trinta anos, e em intervalos de 3 em 3 anos, tem-se a manutenção dos casos de estudo. Neste caso, os mesmos devem ser corrigidos pela taxa de juros. Foi necessário trazer todos gastos para o valor presente para que a análise fosse realizada considerando gastos futuros mas trazendo-os para valores atuais.

Em janeiro de 2016, o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) sinalizou uma estimativa de variação de Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) onde a inflação para 2016 ficaria próximo dos 7,59%. A taxa nominal de juros, a Selic, estabelecida pelo Comitê de Política Monetária (Copom), do Banco Central em 14,25% anuais.

Na Tabela 6, os Fatores de Juros do Valor Futuro - FJVF foram calculados através da expressão $FJVF_{i,n} = (1 + i)^n$, onde "i" é a inflação sendo 7,59% e "n" o número de anos considerado. Os Fatores de Juros do Valor Presente - FJVP foram calculados através da expressão $FJVP_{i,n} = 1/(1 + i)^n$, onde "i" é a taxa nominal de juros igual a 14,25% e "n" o número de anos aplicado.

Tabela 6: Valores calculados para os FJVF e FJVP para uma manutenção Periódica de 3 em 3 anos.

| n | FJVF | FJVP |
|----|--------|-------|
| 1 | 1,0759 | 0,875 |
| 3 | 1,245 | 0,671 |
| 6 | 1,551 | 0,450 |
| 9 | 1,932 | 0,302 |
| 12 | 2,406 | 0,202 |
| 15 | 2,996 | 0,136 |
| 18 | 3,732 | 0,091 |
| 21 | 4,647 | 0,061 |
| 24 | 5,788 | 0,041 |
| 27 | 7,208 | 0,027 |
| 30 | 8,978 | 0,018 |

Partindo destes cálculos para determinar o valor presente (FJVP), estes devem ser multiplicados pelos valores que são apresentados para todos os três casos estudados conforme as Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9. No segundo momento, em um período de 3 em 3 anos tem-se o FJVF aplicado ao custo de manutenção conforme Tabela 6 apresentadas até o período de estudo de CCV que é de 30 anos obtemos o custo total de cada tipo de material estrutural conforme as Tabelas 10, 11, 12.

Em seguida para melhor visualização será apresentado em forma de gráfico nas Figuras 24, 25 e 26, para cada caso de estudo demonstrando a aplicação do FJVP, onde pode-se concluir que o aço inoxidável mostrou ser vantajoso, em termos econômicos, em relação ao aço carbono devido a sua alta resistência a corrosão. De fato, o aço inoxidável proporciona, em 30 anos, nenhuma troca ou reforço nos elementos estruturais onde apenas o hidrojateamento faz-se necessário para manter a vida útil da estrutura.

Nota-se que em um determinado tempo, o aço inoxidável já recupera todo o seu investimento inicial em relação ao aço carbono, e para as concessionárias de distribuição de energia com níveis de tensão de 138 kV, isto torna-se muito vantajoso. Como pode ser observado, quanto maior é a torre menor seria o ganho econômico que o aço inoxidável poderá proporcionar. Este fato pode estar associado ao nível de conservadorismo da norma que preconiza as regras para o dimensionamento de estruturas em aço inoxidável. Em adição, não há no mercado brasileiro uma variedade de perfis com aço inoxidável austenítico ocasionando num nível menor para a taxa de trabalho dos elementos estruturais. Em detalhes, as torres menores conseguem uma taxa de retorno depois de 15 anos.

Pode-se observar que antes dos 10 anos da vida útil da estrutura o aço inoxidável já recupera o seu investimento inicial, devido ao seu baixo investimento em sua manutenção como que o aço carbono a cada 3 anos tem-se um acréscimo de 10% para a troca de sua estrutura que ao atingir os 30 anos toda a sua estrutura é comprometida chegando assim ao valor inicial de uma torre nova.

Tabela 7: Custos contábeis e valor presente relativo ao CCV estudo de caso 1.

| Valor Presente (R\$) | Ano Ciclo de Vida | | | | | | | | | | | Custos Contábeis (R\$) |
|--|-------------------|------------|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|
| | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | |
| Torre TE6 com 24 Metros de Extensão em Aço Carbono Custo (R\$) | | | | | | | | | | | | |
| | 726.705,80 | 185.104,24 | 343.249,63 | 567.870,02 | 882.068,73 | 1.316.285,26 | 1.910.504,63 | 2.717.109,31 | 3.804.556,06 | 5.262.110,75 | 7.205.939,12 | 24.921.503,54 |
| 1.184.165,72 | 726.705,80 | 99.662,55 | 99.504,19 | 53.859,49 | 59.432,95 | 49.704,58 | 24.422,53 | 26.778,79 | 20.926,89 | 16.024,31 | 7.143,63 | |
| Torre TE6 com 24 Metros de Extensão em Aço Inoxidável Custo (R\$) | | | | | | | | | | | | |
| | 1.115.023,27 | | | 118.994,29 | | | 229.865,23 | | | 444.038,32 | | 1.907.921,11 |
| 1.140.883,96 | 1.115.023,27 | | | 18.572,62 | | | 5.599,73 | | | 1.688,35 | | |

Tabela 8: Custos contábeis e valor presente relativo ao CCV estudo de caso 2.

| Valor Presente (R\$) | Ano Ciclo de Vida | | | | | | | | | | | Custos Contábeis (R\$) |
|--|-------------------|------------|------------|--------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|
| | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | |
| Torre TE6 com 12 Metros de Extensão em Aço Carbono Custo (R\$) | | | | | | | | | | | | |
| | 587.715,63 | 137.018,23 | 261.804,02 | 2.483.144,61 | 688.863,85 | 1.034.019,12 | 1.507.099,35 | 2.150.106,14 | 3.017.952,15 | 4.182.268,49 | 5.736.303,37 | 21.786.294,97 |
| 1.343.498,65 | 587.715,63 | 73.772,42 | 75.894,03 | 387.568,94 | 57.888,99 | 46.785,02 | 36.714,35 | 28.201,32 | 21.312,66 | 15.902,04 | 11.743,26 | |
| Torre TE6 com 12 Metros de Extensão em Aço Inoxidável Custo (R\$) | | | | | | | | | | | | |
| | 887.309,85 | | | 80.337,56 | | | 155.190,74 | | | 299.787,13 | | 1.422.625,29 |
| 904.769,39 | 887.309,85 | | | 12.539,08 | | | 3.780,59 | | | 1.139,87 | | |

Tabela 9: Custos contábeis e valor presente relativo ao CCV estudo de caso 3.

| Valor Presente (R\$) | Ano Ciclo de Vida | | | | | | | | | | | Custos Contábeis (R\$) |
|---|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|
| | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | |
| Torre TE6 com 0 Metros de Extensão em Aço Carbono Custo (R\$) | | | | | | | | | | | | |
| | 476.253,11 | 123.194,39 | 227.298,91 | 375.081,94 | 581.712,29 | 867.173,45 | 1.257.713,18 | 1.787.714,61 | 2.502.108,51 | 3.459.479,54 | 4.736.061,90 | 16.393.791,82 |
| 849.743,49 | 476.253,11 | 66.329,48 | 65.891,39 | 58.542,75 | 48.884,46 | 39.235,96 | 30.639,07 | 23.448,10 | 17.669,79 | 13.153,81 | 9.695,58 | |
| Torre TE6 com 0 Metros de Extensão em Aço Inoxidável Custo (R\$) | | | | | | | | | | | | |
| | 619.147,84 | | | 95.813,49 | | | 185.086,11 | | | 357.537,00 | | 1.257.584,44 |
| 639.970,71 | 619.147,84 | | | 14.954,56 | | | 4.508,87 | | | 1.359,45 | | |

Tabela 10: Custos contábeis e valor presente relativo ao CCV estudo de caso 1, equivalentes em US\$.

| Valor Presente (US\$) | Ano Ciclo de Vida | | | | | | | | | | | Custos Contábeis (US\$) |
|--|-------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|
| | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | |
| Torre TE6 com 24 Metros de Extensão em Aço Carbono Custo (R\$) | | | | | | | | | | | | |
| | 205.284,12 | 52.289,33 | 96.963,17 | 160.415,26 | 249.171,96 | 371.831,99 | 539.690,57 | 767.545,00 | 1.074.733,35 | 1.486.471,96 | 2.035.576,02 | 7.039.972,75 |
| 334.510,09 | 205.284,12 | 28.153,26 | 28.108,53 | 15.214,55 | 16.788,97 | 14.040,84 | 6.899,02 | 7.564,63 | 5.911,55 | 4.526,64 | 2.017,97 | |
| Torre TE6 com 24 Metros de Extensão em Aço Inoxidável Custo (R\$) | | | | | | | | | | | | |
| | 314.978,32 | | | 33.614,21 | | | 64.933,68 | | | 125.434,55 | | 538.960,77 |
| 323.495,02 | 314.978,32 | | | 5.246,50 | | | 1.581,85 | | | 1.688,35 | | |

Tabela 11: Custos contábeis e valor presente relativo ao CCV estudo de caso 2, equivalentes em US\$.

| Valor Presente (US\$) | Ano Ciclo de Vida | | | | | | | | | | | Custos Contábeis (US\$) |
|--|-------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|--------------|-------------------------|
| | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | |
| Torre TE6 com 12 Metros de Extensão em Aço Carbono Custo (R\$) | | | | | | | | | | | | |
| | 166.021,36 | 38.705,72 | 73.955,94 | 84.168,34 | 194.594,31 | 292.095,80 | 425.734,28 | 607.374,62 | 852.528,86 | 1.181.431,78 | 1.620.424,68 | 5.537.035,68 |
| 379.519,39 | 166.021,36 | 20.839,67 | 21.438,99 | 109.482,75 | 16.352,82 | 13.216,11 | 10.371,28 | 7.966,47 | 6.020,52 | 4.492,10 | 3.317,30 | |
| Torre TE6 com 12 Metros de Extensão em Aço Inoxidável Custo (R\$) | | | | | | | | | | | | |
| | 250.652,50 | | | 22.694,23 | | | 43.839,19 | | | 84.685,63 | | 401.871,55 |
| 255.584,57 | 250.652,50 | | | 3.542,11 | | | 1.067,96 | | | 322,00 | | |

Tabela 12: Custos contábeis e valor presente relativo ao CCV estudo de caso 3, equivalentes em US\$.

| Valor Presente (US\$) | Ano Ciclo de Vida | | | | | | | | | | | Custos Contábeis (US\$) |
|---|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------------------|
| | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | |
| Torre TE6 com 0 Metros de Extensão em Aço Carbono Custo (R\$) | | | | | | | | | | | | |
| | 134.534,78 | 34.800,67 | 49.236,16 | 68.661,07 | 94.654,97 | 129.272,17 | 175.179,72 | 235.834,33 | 315.709,39 | 420.585,79 | 557.924,20 | 2.216.393,26 |
| 204.396,61 | 134.534,78 | 18.737,14 | 14.273,01 | 10.716,61 | 7.954,37 | 5.849,02 | 4.267,54 | 3.093,26 | 2.229,53 | 1.599,17 | 1.142,17 | |
| Torre TE6 com 0 Metros de Extensão em Aço Inoxidável Custo (R\$) | | | | | | | | | | | | |
| | 174.900,52 | | | 27.065,96 | | | 52.284,21 | | | 100.999,15 | | 355.249,84 |
| 180.782,69 | 174.900,52 | | | 4.224,45 | | | 1.273,69 | | | 384,02 | | |

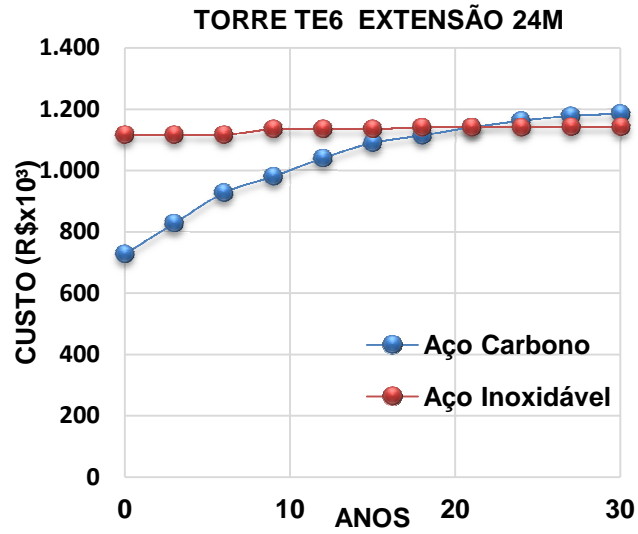


Figura 24: Gráfico custos FJVP estudo de caso 1

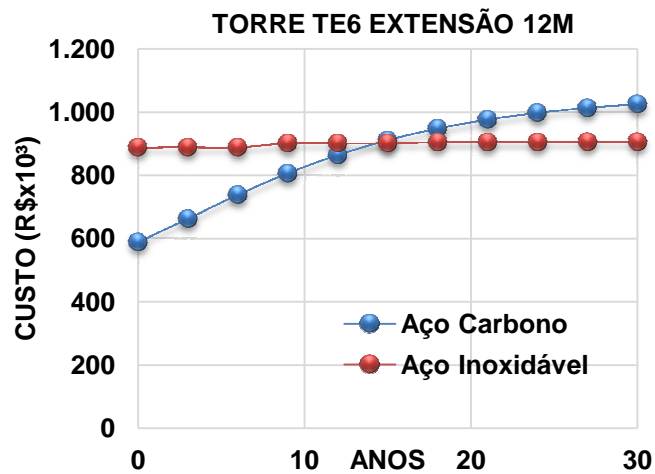


Figura 25: Gráfico custos FJVP estudo de caso 2

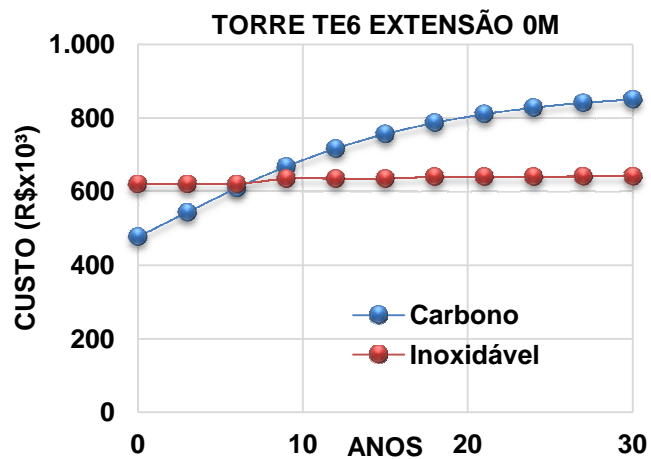


Figura 26: Gráfico custos FJVP estudo de caso 3

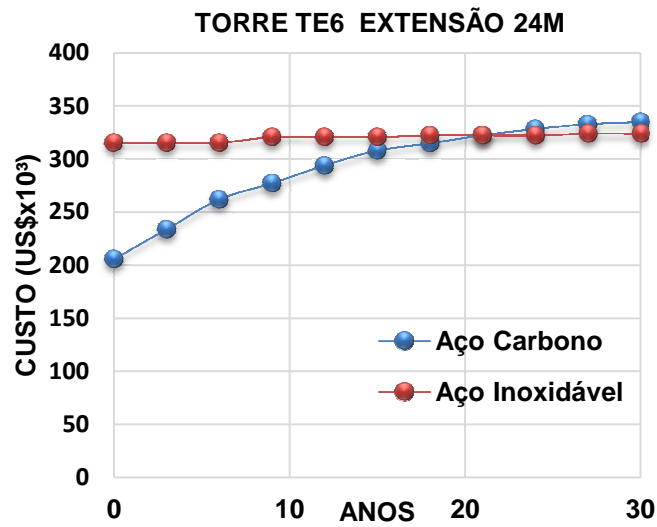


Figura 27: Gráfico custos FJVP estudo de caso 1, equivalente em US\$

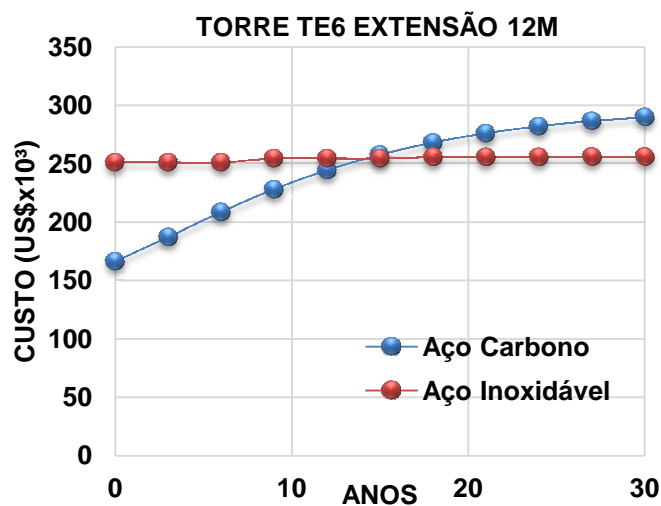


Figura 28: Gráfico custos FJVP caso de estudo 2, equivalente em US\$

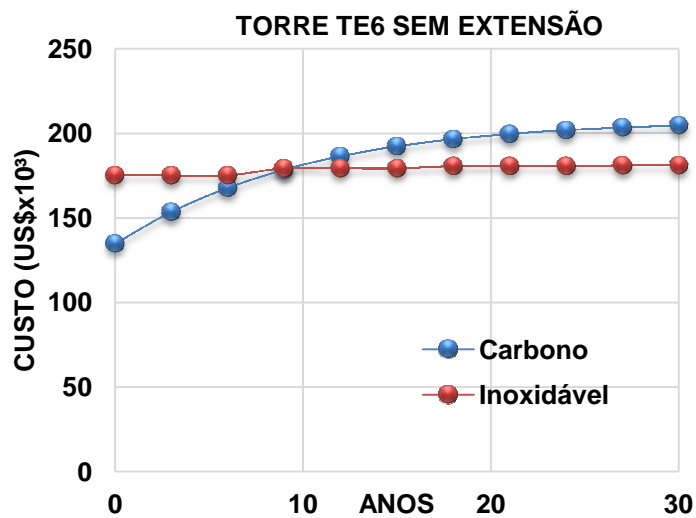


Figura 29: Gráfico custos FJVP estudo de caso 3, equivalente em US\$

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Introdução

De forma geral, os profissionais de engenharia tem como principal meta desenvolverem projetos que atendam as funções da estrutura buscando a solução mais econômica. De fato, o principal intuito de todo estudo técnico é simplesmente obter uma construção econômica onde os menores custos totais devem ser considerados inclusive aqueles que serão obtidos ao longo de sua vida útil da estrutura. No entanto, este cenário não é algo que pode ser visto no dia-a-dia em escritórios de cálculos. Assim, a construção que por sinal tem um custo inicial mais barato pode não ser a mais econômica.

As linhas de transmissão desempenham um papel muito importante no fornecimento de energia. Elas são as estruturas responsáveis pelo suporte dos condutores que saem das usinas e, chegam as grandes cidades ou a grandes clientes. Dada a complexidade da realização de paradas para manutenção, onde só é permitido caso haja recurso para mesma, caso contrário, é impossível realizar uma parada nas LTs, as mesmas devem ser construídas com equipamentos e materiais que eliminem qualquer tipo de desligamento. As estruturas de uma torre de LTA são elementos sujeitos às intempéries muito nocivas, cujas paradas ou qualquer tipo de colapso, podem gerar comprometimento enorme deixando, desde cidades, ou até, estados sem energia.

Os materiais empregados como elementos estruturais sofrem os efeitos das intempéries. Dada sua ótima resistência aos agentes corrosivos, neste trabalho foi investigado as vantagens técnicas e econômicas da utilização do aço inoxidável como elemento estrutural. Assim, é possível reduzir as manutenções periódicas das estruturas possibilitando maior confiabilidade e qualidade no fornecimento de energia elétrica. Para fins comparativos foi escolhido o projeto de uma LTA existente, cuja estrutura, foi construída usando cantoneiras de aço carbono galvanizado por imersão a quente. Todos os dimensionamentos foram realizados de acordo com as prescrições normativas do Eurocódigo 3, sendo parte 1.1 [1] para o aço carbono e parte 1.4 [19] para o aço inoxidável.

Após a realização do dimensionamento, foram apresentadas as análises comparativas dos custos envolvidos para os tipos de aços utilizados. Desde o investimento inicial, considerando também, os gastos com manutenção ao longo da vida útil da estrutura. Para a avaliação financeira foi utilizada a técnica do Custeio do Ciclo de Vida (CCV) de forma que foi possível apresentar conclusões reais e futuras no quesito financeiro para a estrutura estudada.

5.2 Principais contribuições

Desde as primeiras LTAs construídas no Brasil, o aço carbono vêm sendo utilizado como elemento estrutural. Pode ser destacado como contribuição desta dissertação, a proposta de utilização do aço inoxidável como elemento estrutural da LTAs obtendo assim uma inovação que trará grandes benefícios no âmbito da vida útil da estrutura.

O principal ganho seria no aspecto financeiro que por sinal pode-se conseguir uma economia com a utilização do aço inoxidável principalmente pelo ponto de vista das manutenções que serão otimizadas mitigando estes custos, e é claro, a confiabilidade da estrutura em dar continuidade da energia fornecida.

5.3 Custos

Foi verificada a análise dos custos através do VP das torres em estudo, onde o valor atual de um montante futuro, que poderia ser investido hoje, a uma dada taxa de juros, durante o período de trinta anos, ou seja, o VP mede a oportunidade de investimento para um dado período de tempo. Sendo assim quanto menor for o VP de um projeto, mais favorável é para investimento.

Para otimizar a avaliação foi analisado o VP para cada tipo de torre;

- O VP para a construção de uma estrutura nova, para as torres com 24 e 12 metros de extensão, apresentaram valores 60% maior em relação ao aço carbono. Já a torre com 12 metros de extensão apresentou um VP menor em relação ao aço carbono, já que o maior gasto acontece exatamente no tempo zero da construção;
- O reparo e a substituição dos perfis são etapas de custo elevado na manutenção das torres. O maior número de perfis e a alta frequência de substituição fazem com que a torre em aço carbono fique em desvantagem em relação a uma torre em aço inoxidável considerando o custo do dinheiro no tempo;
- O custo de limpeza dos perfis foi um item que favoreceu financeiramente o custo de manutenção das torres em aço inoxidável. Contribuíram para estes resultados desfavoráveis ao aço carbono.
- Há também a vantagem em relação ao meio ambiente onde o aço inoxidável não gera nenhum resíduo durante os anos estudados, já o aço carbono mesmo que a concessionária venda como sucata o mesmo não deixa de agredir ao meio ambiente causando assim mais poluição ao nosso meio.

5.4 Conclusões

O presente trabalho de dissertação de mestrado teve como objetivo as comparações de custos relativos a construção e manutenção das torres TE6 com suas respectivas extensões, entre dois tipos de materiais, aço carbono e aço inoxidável.

Para esta avaliação financeira foi utilizada a técnica do Custeio do Ciclo de Vida (CCV). Para estes fatores de custos estudados levando em consideração as condições econômicas e financeiras atuais pode-se concluir que:

1. Os perfis em aço inoxidável foram mais pesados em relação ao carbono, devido ao estudo ater-se somente aos perfis nacionais;
2. O custo inicial para a construção de uma torre em aço inoxidável austenítico é em média 60% mais caro em relação a uma estrutura em aço carbono;
3. A manutenção proporcionou um caminho inverso quando comparado a construção, pois apresentou uma economia de aproximadamente 47% do aço inoxidável para o aço carbono;
4. Na análise do custo de vida em 30 anos da estrutura pôde ser concluído que no custo final o aço inoxidável nos trará um retorno financeiro bastante favorável em relação ao aço carbono;
5. Tem-se com o aço inoxidável devido a sua alta durabilidade menos poluição ao meio ambiente, pois devido a sua baixa troca de perfis nos possibilita menos produção destes aços obtendo assim menos emissão de gases nocivos a atmosfera da fábricas durante a sua confecção..
6. Estes valores apresentados, são bastantes superficiais, pois praticamente se levou em consideração apenas o material, não contabilizando o custo da mão de obra para tais serviços, onde seria necessário serviços em linha viva que demanda profissionais especializados bem como equipamentos e técnicas mais apuradas, que reduziria ainda mais este tempo de retorno quanto ao aço inoxidável, podendo vir a acontecer em 5 anos de utilização.

5.5 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para a continuidade e desenvolvimento de trabalhos futuros através do estudo apresentado, pode-se citar:

- a) Desenvolver estudos sobre os tipos de ligações em aço inoxidável para a estrutura apresentada;
- b) Realizar análises não lineares para investigar o comportamento das torres de telecomunicação;

- c) Desenvolver a estrutura otimizando seus perfis reduzindo o peso da mesma;
- d) Realizar estudos de viabilidade estrutural e econômica para torres de transmissão com tensão maior que 138 kV.

REFERÊNCIAS

- [1] EUROCODE 3, ENV - 1993-1-1: Design of Steel Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, European Committee for Standardisation, Brussels, 2003.
- [2] Prodwebdigital. 100 anos do Aço Inoxidável [base de dados na Internet]. San Bruno (CA): You Tube. c2005 [acesso em 2012 Out 6]. Disponível em: http://www.youtube.com/watch?v=AhuHvGUR9Xc&feature=player_embedded
- [3] The timeless allure of art deco [base de dados na internet]. [acesso em 2015 Novembro]. Disponível em : <http://www.gia.edu/art-deco>.
- [4] Estatísticas anuais Abinox. [base de dados na Internet]. [acesso em 2016 Junho1].Disponívelem: <https://www.abinox.com.br/> (gráfico consumo aparente).
- [5] Especificações técnicas, Vol. 6. <http://www.kobelco-welding.jp/portuguese/education-center/technical-highlight/vol06.html>.
- [6] João de Jesus dos Santos. Comportamento estrutural de elementos em aço inoxidável. Dissertação Mestrado em Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- [7] LOUREIRO,C. R. O. Efeito da chuva ácida em aços inoxidáveis coloridos,Revista Escola de Minas, Vol. 60, Nº 1, p. 45-48. Janeiro, 2007.
- [8] FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS SA, *Construção de Subestações*: Noções de Projetos e Construção. rev. jul 2006.
- [9] ANEEL. [base de dados na Internet]. [acesso em 2016 Junho 1]. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/>.
- [10] Portal Metálica. [base de dados nainternet]. [acesso em 2016 Junho 3]. Disponível em : <http://wwwo.metallica.com.br/torres-de-transmissao-de-energia>.
- [11] Towercom. [base de dados na internet]. [acesso em 2016 Junho 3]. Disponível em : <http://towercom.com.br/>.

- [12] Electricity Distribution Automation...The hidden Cleantech revolution [base de dados na Internet]. [acesso em 2016 Jan 28]. Disponível em: http://cdn2.hubspot.net/hub/574662/hubfs/distribution_line.jpg?t=1454510084599&width=632&height=414.
- [13] Memória de cálculo. Torre tipo “TE6” Ancoragem/Terminal. LT 138 kV – Circuito duplo Santacruz – Jacarépaguá 1.
- [14] STR do Brasil. [base de dados nainternet]. [acesso em 2016 Junho 3]. Disponível em : <http://strdobrasil.com.br/estaiadas.html>.
- [15] Nova Torre de transmissão Estaiada 500kV [base de dados na Internet]. [acesso em 2016 fev 09]. Disponível em: <https://www.google.com.br/imgres>.
- [16] Robert V. and Lemelin D.R., “Flexural considerations in steel transmission tower design”, *Electrical Transmission in a New Age*, 148-155, 2002.
- [17] Prasad Rao N., Samuel Knight G., Lakshmanan N. and Iyer N., “Investigation of transmission line tower failuers”, *Engineering Failure Analysis*, 17, 1127-1141, 2010
- [18] Robot: RobotStructuralAnalysis Professional [programa de computador]. Versão 2015. Copyright 2015 Autodesk inc.; 2015.
- [19] EUROCODE 3, prEN 1993-1-4, Design of steel structures – Part 1.4: General rules – Stainless steel .CEN, EuropeanCommittee for Standardisation, Brussels, 2003.
- [20] NBR-IEC: Atmosferas explosivas, proteção de equipamentos por segurança aumentada "e". Versão corrigida: 2010.
- [21] EUROCODE 3, prEN 1993-1-8, Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints. CEN, EuropeanCommittee for Standardisation, Brussels, 2003.
- [22] Excel 2013. Microsoft Office 2013.
- [23] FAVA, J.A. (Ed.). A technical framework for life cycle assessment. Washington: SETAC, 191.
- [24] SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY. Aconceptual framework for life cycle impact assessment. Pensacola: SETAC, 1993.
- [25] LEVY, M. Applications of LCA impact assessment. Canadá, 1995. Documento técnico apresentado para o ISO/ TC 207 / SC 5 / WG-01: lifecycleimpactassessment.

- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 1404: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura. Rio de Janeiro 2001.
- [27] NBR ISO 14041: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: definição de objetivo e escopo e análise de inventário. Rio de Janeiro, 2004.
- [28] NBR ISO 14042 gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: avaliação do impacto do ciclo de vida. Rio de Janeiro, 2005.
- [29] NBR ISO 14043: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: interpretação do ciclo de vida. Rio de Janeiro, 2004.
- [30] SANTOS ,L.J.C. Avaliação do ciclo de vida e custeio do ciclo de vida de evaporadores para usinas de açúcar. São Paulo, 2007. 225 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, USP.
- [31] Gardner L., “The use of stainless steel in structures”, Progress in Structural Engineering and Materials, 7 (2), 2005.
- [32] CARDOSO,R.P. Avaliação do comportamento estrutural de subestações de energia elétrica com o uso do aço inoxidável. Rio de Janeiro, 2013. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, UERJ.

| Verificação à Estabilidade | | | | Verificação à Estabilidade | | | |
|---|------------------|------|--|----------------------------|------|--|--|
| $\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$ | | OK | $\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min}} + k_y \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) + k_z \left(\frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1$ | | OK | | |
| $\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$ | | OK | $\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min1}} + k_{LT} \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) + k_z \left(\frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1$ | | OK | | |
| Ned | 598.388.000,00 | 0,78 | Ned | 598.388.000,00 | 0,63 | | |
| NRk | 4.228.000.000,00 | | Nb,Rd | 1.943.624.736,01 | | | |
| kyy | 1,15 | | MyEd | 557.000,00 | | | |
| My,Ed | 557.000,00 | | MzEd | 1.642.000,00 | | | |
| ΔMy,Ed | 0,00 | 0,78 | eNz | 0,00 | 0,78 | | |
| My,Rk | 4.328.800,00 | | eNy | 0,00 | | | |
| kyz | 1,15 | | wpl,z | 30.593,32 | | | |
| ΔMz,Ed | 0,00 | | wpl,y | 30.593,32 | | | |
| Mz,Rk | 4.228.000.000,00 | | βw,z | 0,90 | | | |
| kzy | 1,15 | | ky | 1,52 | | | |
| kzz | 1,15 | | kz | 1,52 | | | |
| Mz,Ed | 1.642.000,00 | | kLt | 1,00 | | | |
| | | | γm1 | 1,10 | | | |
| | | | Mc,Rd | 58.405.425.423,40 | | | |
| | | | Mb,Rd | 57.594.646.568,94 | | | |

ANEXO II – CUSTOS DE CONSTRUÇÃO

Custos de construção para estudo de caso 1. (1 US\$ = R\$ 3,54)

| TORRE NOVA 24 Metros de Extensão | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|----------------|---------|----------------------------------|----------------------------------|---------|----------------------------------|----------------------------------|
| ITEM | DESCRIÇÃO | Un. | QUANT. | AÇO CARBONO | | QUANT. | AÇO INOX | |
| | | | | PREÇOS | | | PREÇOS | |
| | | | | Unitário | Total | | Unitário | Total |
| 1 | PROJETOS | | | | | | | |
| 1.1 | Elaboração todos os projetos necessários, Projeto de Topografia, Fundações, Perfil, Estruturas Metálicas. | unid | 1,00 | R\$ 17.276,68 (US\$ 4.880,41) | R\$ 17.276,68 (US\$ 4.880,41) | 1,00 | R\$ 17.276,68 (US\$ 4.880,41) | R\$ 17.276,68 (US\$ 4.880,41) |
| 2 | CANTEIRO DE OBRAS | | | | | | | |
| 2.1 | Montagem, desmontagem e remoção do canteiro de obras, incluindo a manutenção necessária ao seu funcionamento durante a obra. | unid | 1,00 | R\$ 14.900,00 (US\$ 4.209,03) | R\$ 14.900,00 (US\$ 4.209,03) | 1,00 | R\$ 14.900,00 (US\$ 4.209,03) | R\$ 14.900,00 (US\$ 4.209,03) |
| 3 | SEGUROS | | | | | | | |
| 3.1 | Riscos de Engenharia, projetos, acidentes pessoais, responsabilidade civil e de veículos. | unid | 1,00 | R\$ 13.270,31 (US\$ 3.748,67) | R\$ 13.270,31 (US\$ 3.748,67) | 1,00 | R\$ 13.270,31 (US\$ 3.748,67) | R\$ 13.270,31 (US\$ 3.748,67) |
| 4 | FAIXA DE SERVIDÃO | | | | | | | |
| 4.1 | Serviços de roçada, limpeza e remoção de árvores. | m ² | 1125,00 | R\$ 3,73 (US\$ 1,05) | R\$ 4.196,25 (US\$ 1.185,38) | 1125,00 | R\$ 3,73 (US\$ 1,05) | R\$ 4.196,25 (US\$ 1.185,38) |

Custos de construção para estudo de caso 1. (1 US\$ = R\$ 3,54) - (continuação)

| TORRE NOVA 24 Metros de Extensão | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|------|----------|----------------------------------|------------------------------------|----------|----------------------------------|------------------------------------|
| ITEM | DESCRIÇÃO | Un. | QUANT. | AÇO CARBONO | | QUANT. | AÇO INOX | |
| | | | | PREÇOS | | | PREÇOS | |
| | | | | Unitário | Total | | Unitário | Total |
| 5 | TOPOGRAFIA | | | | | | | |
| 5.1 | Levantamento Planialtimétrico Cadastral Georeferenciado, de toda área destinada a instalação das estruturas. | km | 0,38 | R\$ 12.986,49 (US\$ 3.668,50) | R\$ 4.934,87 (US\$ 1.394,03) | 0,38 | R\$ 12.986,49 (US\$ 3.668,50) | R\$ 4.934,87 (US\$ 1.394,03) |
| 5.2 | Locação de Estrutura | unid | 1,00 | R\$ 1.329,82 (US\$ 375,65) | R\$ 1.329,82 (US\$ 375,65) | 1,00 | R\$ 1.329,82 (US\$ 375,65) | R\$ 1.329,82 (US\$ 375,65) |
| 5.3 | Demarcação de Faixa | km | 0,38 | R\$ 12.986,49 (US\$ 3.668,50) | R\$ 4.934,87 (US\$ 1.394,03) | 0,38 | R\$ 12.986,49 (US\$ 3.668,50) | R\$ 4.934,87 (US\$ 1.394,03) |
| 6 | FUNDAÇÕES | | | | | | | |
| 6.1 | Custo para execução de fundação por quilograma de estrutura de torre | kg | 40827,18 | R\$ 5,62 (US\$ 1,58) | R\$ 229.366,32 (US\$ 64.792,74) | 49992,62 | R\$ 5,62 (US\$ 1,67) | R\$ 280.857,59 (US\$ 79.338,30) |

Custos de construção para estudo de caso 1. (1 US\$ = R\$ 3,54)- (continuação)

| TORRE NOVA 24 Metros de Extensão | | | | | | | | |
|----------------------------------|---|------|--------------|-----------------------------------|---|----------|-----------------------------------|---|
| ITEM | DESCRIÇÃO | Un. | QUANT. | AÇO CARBONO | | QUANT. | AÇO INOX | |
| | | | | PREÇOS | | | PREÇOS | |
| | | | | Unitário | Total | | Unitário | Total |
| 7 | ESTRUTURAS | | | | | | | |
| 7.1 | Fornecimento de estruturas para torres TE6. | kg | 40827,18 | R\$ 7,35 (US\$ 2,07) | R\$ 300.079,77 (US\$ 84.768,29) | 49992,62 | R\$ 12,74 (US\$ 3,59) | R\$ 636.905,98 (US\$ 179.916,94) |
| 7.2 | Montagem de torres | unid | 1,00 | R\$ 66.068,55 (US\$ 18.663,43) | R\$ 66.068,55 (US\$ 18.663,43) | 1,00 | R\$ 66.068,55 (US\$ 18.663,43) | R\$ 66.068,55 (US\$ 18.663,43) |
| 7.3 | Pintura e sinalização aeronáutica | unid | 1,00 | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) | 1,00 | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) |
| 8 | SERVIÇOS COMPLEMENTARES | | | | | | | |
| 8.1 | Transporte de material/pessoal por helicóptero <u>helicóptero</u> leve | hr | 1,00 | R\$ 10.710,00 (US\$ 3.025,42) | R\$ 10.710,00 (US\$ 3.025,42) | 1,00 | R\$ 10.710,00 (US\$ 3.025,42) | R\$ 10.710,00 (US\$ 3.025,42) |
| 8.2 | Transporte de material por helicóptero <u>helicóptero</u> pesado | hr | 1,00 | R\$ 37.749,60 (US\$ 10.663,72) | R\$ 37.749,60 (US\$ 10.663,72) | 1,00 | R\$ 37.749,60 (US\$ 10.663,72) | R\$ 37.749,60 (US\$ 10.663,72) |
| | | | TOTAL | | R\$ 726.705,80 (US\$ 205.284,12) | | | R\$ 1.115.023,27 (US\$ 314.978,32) |

Custos de construção estudo de caso 2. (1 US\$ = R\$ 3,54)

| TORRE NOVA 12 Metros de Extensão | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|----------------|---------|----------------------------------|----------------------------------|---------|----------------------------------|----------------------------------|
| ITEM | DESCRIÇÃO | Un. | QUANT. | AÇO CARBONO | | QUANT. | AÇO INOX | |
| | | | | PREÇOS | | | PREÇOS | |
| | | | | Unitário | Total | | Unitário | Total |
| 1 | PROJETOS | | | | | | | |
| 1.1 | Elaboração todos os projetos necessários, Projeto de Topografia, Fundações, Perfil, Estruturas Metálicas. | unid | 1,00 | R\$ 17.276,68 (US\$ 4.880,41) | R\$ 17.276,68 (US\$ 4.880,41) | 1,00 | R\$ 17.276,68 (US\$ 4.880,41) | R\$ 17.276,68 (US\$ 4.880,41) |
| 2 | CANTEIRO DE OBRAS | | | | | | | |
| 2.1 | Montagem, desmontagem e remoção do canteiro de obras, incluindo a manutenção necessária ao seu funcionamento durante a obra. | unid | 1,00 | R\$ 14.900,00 (US\$ 4.209,03) | R\$ 14.900,00 (US\$ 4.209,03) | 1,00 | R\$ 14.900,00 (US\$ 4.209,03) | R\$ 14.900,00 (US\$ 4.209,03) |
| 3 | SEGUROS | | | | | | | |
| 3.1 | Riscos de Engenharia, projetos, acidentes pessoais, responsabilidade civil e de veículos. | unid | 1,00 | R\$ 13.270,31 (US\$ 3.748,67) | R\$ 13.270,31 (US\$ 3.748,67) | 1,00 | R\$ 13.270,31 (US\$ 3.748,67) | R\$ 13.270,31 (US\$ 3.748,67) |
| 4 | FAIXA DE SERVIDÃO | | | | | | | |
| 4.1 | Serviços de roçada, limpeza e remoção de árvores. | m ² | 1125,00 | R\$ 3,73 (US\$ 1,05) | R\$ 4.196,25 (US\$ 1.185,38) | 1125,00 | R\$ 3,73 (US\$ 1,05) | R\$ 4.196,25 (US\$ 1.185,38) |

Custos de construção estudo de caso 2. (1 US\$ = R\$ 3,54)- (continuação)

| TORRE NOVA 12 Metros de Extensão | | | | | | | | |
|----------------------------------|---|------|----------|----------------------------------|------------------------------------|----------|----------------------------------|------------------------------------|
| ITEM | DESCRIÇÃO | Un. | QUANT. | AÇO CARBONO | | QUANT. | AÇO INOX | |
| | | | | PREÇOS | | | PREÇOS | |
| | | | | Unitário | Total | | Unitário | Total |
| 5 | TOPOGRAFIA | | | | | | | |
| 5.1 | Levantamento Planialtimétrico Cadastral Georeferenciado, de toda área destinada a instalação <u>instalação</u> das estruturas. | km | 0,38 | R\$ 12.986,49 (US\$ 3.668,50) | R\$ 4.934,87 (US\$ 1.394,03) | 0,38 | R\$ 12.986,49 (US\$ 3.668,50) | R\$ 4.934,87 (US\$ 1.394,03) |
| 5.2 | Locação de Estrutura | unid | 1,00 | R\$ 1.329,82 (US\$ 375,65) | R\$ 1.329,82 (US\$ 375,65) | 1,00 | R\$ 1.329,82 (US\$ 375,65) | R\$ 1.329,82 (US\$ 375,65) |
| 5.3 | Demarcação de Faixa | km | 0,38 | R\$ 12.986,49 (US\$ 3.668,50) | R\$ 4.934,87 (US\$ 1.394,03) | 0,38 | R\$ 12.986,49 (US\$ 3.668,50) | R\$ 4.934,87 (US\$ 1.394,03) |
| 6 | FUNDAÇÕES | | | | | | | |
| 6.1 | Custo para execução de fundação por kilograma <u>quilograma</u> de estrutura de torre | kg | 30098,89 | R\$ 5,62 (US\$ 1,58) | R\$ 169.094,99 (US\$ 47.766,94) | 37581,26 | R\$ 5,62 (US\$ 1,58) | R\$ 211.130,80 (US\$ 59.641,46) |

Custos de construção estudo de caso 2. (1 US\$ = R\$ 3,54)- (continuação)

| TORRE NOVA 12 Metros de Extensão | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|------|----------|-----------------------------------|------------------------------------|----------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| ITEM | DESCRIÇÃO | Un. | QUANT. | AÇO CARBONO | | QUANT. | AÇO INOX | |
| | | | | PREÇOS | | | PREÇOS | |
| | | | | Unitário | Total | | Unitário | Total |
| 7 | ESTRUTURAS | | | | | | | |
| 7.1 | Fornecimento de estruturas para torres TE6. | kg | 30098,89 | R\$ 7,35 (US\$ 2,07) | R\$ 221.226,84 (US\$ 62.493,45) | 37581,26 | R\$ 12,74 (US\$ 3,59) | R\$ 478.785,25 (US\$ 135.250,07) |
| 7.2 | Montagem de torres | unid | 1,00 | R\$ 66.068,55 (US\$ 18.663,43) | R\$ 66.068,55 (US\$ 18.663,43) | 1,00 | R\$ 66.068,55 (US\$ 18.663,43) | R\$ 66.068,55 (US\$ 18.663,43) |
| 7.3 | Pintura e sinalização aeronáutica | unid | 1,00 | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) | 1,00 | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) |
| 8 | SERVIÇOS COMPLEMENTARES | | | | | | | |
| 8.1 | Transporte de material/pessoal por helicóptero helicóptero leve | hr | 1,00 | R\$ 10.710,00 (US\$ 3.025,42) | R\$ 10.710,00 (US\$ 3.025,42) | 1,00 | R\$ 10.710,00 (US\$ 3.025,42) | R\$ 10.710,00 (US\$ 3.025,42) |
| 8.2 | Transporte de material por helicóptero helicóptero pesado | hr | 1,00 | R\$ 37.749,60 (US\$ 10.663,72) | R\$ 37.749,60 (US\$ 10.663,72) | 1,00 | R\$ 37.749,60 (US\$ 10.663,72) | R\$ 37.749,60 (US\$ 10.663,72) |

| | | |
|--------------|---|---|
| TOTAL | R\$ 587.715,63 (US\$ 166.021,36) | R\$ 887.309,85 (US\$ 250.652,50) |
|--------------|---|---|

Custos de construção estudo de caso 3. (1 US\$ = R\$ 3,54)

| TORRE NOVA 0 Metros de Extensão | | | | | | | | |
|---------------------------------|--|----------------|---------|----------------------------------|----------------------------------|---------|----------------------------------|----------------------------------|
| ITEM | DESCRIÇÃO | Un. | QUANT. | AÇO CARBONO | | QUANT. | AÇO INOX | |
| | | | | PREÇOS | | | PREÇOS | |
| | | | | Unitário | Total | | Unitário | Total |
| 1 | PROJETOS | | | | | | | |
| 1.1 | Elaboração todos os projetos necessários, Projeto de Topografia, Fundações, Perfil, Estruturas Metálicas. | unid | 1,00 | R\$ 17.276,68 (US\$ 4.880,41) | R\$ 17.276,68 (US\$ 4.880,41) | 1,00 | R\$ 17.276,68 (US\$ 4.880,41) | R\$ 17.276,68 (US\$ 4.880,41) |
| 2 | CANTEIRO DE OBRAS | | | | | | | |
| 2.1 | Montagem, desmontagem e remoção do canteiro de obras, incluindo a manutenção necessária ao seu funcionamento durante a obra. | unid | 1,00 | R\$ 14.900,00 (US\$ 4.209,03) | R\$ 14.900,00 (US\$ 4.209,03) | 1,00 | R\$ 14.900,00 (US\$ 4.209,03) | R\$ 14.900,00 (US\$ 4.209,03) |
| 3 | SEGUROS | | | | | | | |
| 3.1 | Riscos de Engenharia, projetos, acidentes pessoais, responsabilidade civil e de veículos. | unid | 1,00 | R\$ 13.270,31 (US\$ 3.748,67) | R\$ 13.270,31 (US\$ 3.748,67) | 1,00 | R\$ 13.270,31 (US\$ 3.748,67) | R\$ 13.270,31 (US\$ 3.748,67) |
| 4 | FAIXA DE SERVIDÃO | | | | | | | |
| 4.1 | Serviços de roçada, limpeza e remoção de árvores. | m ² | 1125,00 | R\$ 3,73 (US\$ 1,05) | R\$ 4.196,25 (US\$ 1.185,38) | 1125,00 | R\$ 3,73 (US\$ 1,05) | R\$ 4.196,25 (US\$ 1.185,38) |

Custos de construção estudo de caso 3. (1 US\$ = R\$ 3,54)- (continuação)

| TORRE NOVA 0 Metros de Extensão | | | | | | | | |
|---------------------------------|--|------|----------|----------------------------------|------------------------------------|----------|----------------------------------|------------------------------------|
| ITEM | DESCRIÇÃO | Un. | QUANT. | AÇO CARBONO | | QUANT. | AÇO INOX | |
| | | | | PREÇOS | | | PREÇOS | |
| | | | | Unitário | Total | | Unitário | Total |
| 5 | TOPOGRAFIA | | | | | | | |
| 5.1 | Levantamento Planialtimétrico Cadastral Georeferenciado, de toda área destinada a instalação das estruturas. | km | 0,38 | R\$ 12.986,49 (US\$ 3.668,50) | R\$ 4.934,87 (US\$ 1.394,03) | 0,38 | R\$ 12.986,49 (US\$ 3.668,50) | R\$ 4.934,87 (US\$ 1.394,03) |
| 5.2 | Locação de Estrutura | unid | 1,00 | R\$ 1.329,82 (US\$ 375,65) | R\$ 1.329,82 (US\$ 375,65) | 1,00 | R\$ 1.329,82 (US\$ 375,65) | R\$ 1.329,82 (US\$ 375,65) |
| 5.3 | Demarcação de Faixa | km | 0,38 | R\$ 12.986,49 (US\$ 3.668,50) | R\$ 4.934,87 (US\$ 1.394,03) | 0,38 | R\$ 12.986,49 (US\$ 3.668,50) | R\$ 4.934,87 (US\$ 1.394,03) |
| 6 | FUNDAÇÕES | | | | | | | |
| 6.1 | Custo para execução de fundação por <u>kilogramaquilograma</u> de estrutura de torre | kg | 21503,68 | R\$ 5,62 (US\$ 1,58) | R\$ 120.807,27 (US\$ 34.126,34) | 22973,88 | R\$ 5,62 (US\$ 1,58) | R\$ 129.066,82 (US\$ 36.459,55) |

Custos de construção estudo de caso 3. (1 US\$ = R\$ 3,54) - (continuação)

| TORRE NOVA 0 Metros de Extensão | | | | | | | | |
|---------------------------------|---|------|--------------|-----------------------------------|---|----------|-----------------------------------|---|
| ITEM | DESCRIÇÃO | Un. | QUANT. | AÇO CARBONO | | QUANT. | AÇO INOX | |
| | | | | PREÇOS | | | PREÇOS | |
| | | | | Unitário | Total | | Unitário | Total |
| 7 | ESTRUTURAS | | | | | | | |
| 7.1 | Fornecimento de estruturas para torres TE6. | kg | 21503,68 | R\$ 7,35 (US\$ 2,07) | R\$ 158.052,05 (US\$ 44.647,47) | 22973,88 | R\$ 12,74 (US\$ 3,64) | R\$ 292.687,23 (US\$ 82.680,00) |
| 7.2 | Montagem de torres | unid | 1,00 | R\$ 66.068,55 (US\$ 18.663,43) | R\$ 66.068,55 (US\$ 18.663,43) | 1,00 | R\$ 66.068,55 (US\$ 18.663,43) | R\$ 66.068,55 (US\$ 18.663,43) |
| 7.3 | Pintura e sinalização aeronáutica | unid | 1,00 | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) | 1,00 | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) |
| 8 | SERVIÇOS COMPLEMENTARES | | | | | | | |
| 8.1 | Transporte de material/pessoal por helicóptero leve | hr | 1,00 | R\$ 10.710,00 (US\$ 3.025,42) | R\$ 10.710,00 (US\$ 3.025,42) | 1,00 | R\$ 10.710,00 (US\$ 3.025,42) | R\$ 10.710,00 (US\$ 3.025,42) |
| 8.2 | Transporte de material por helicóptero pesado | hr | 1,00 | R\$ 37.749,60 (US\$ 10.663,72) | R\$ 37.749,60 (US\$ 10.663,72) | 1,00 | R\$ 37.749,60 (US\$ 10.663,72) | R\$ 37.749,60 (US\$ 10.663,72) |
| | | | TOTAL | | R\$ 476.253,11 (US\$ 134.534,77) | | | R\$ 619.147,84 (US\$ 174.900,51) |

ANEXO III – CUSTOS DE MANUTENÇÃO

Comparativo de custo para manutenção estudo de caso 1. (1 US\$ = R\$ 3,54)

| MANUTENÇÃO EM TORRES 3 Em 3 ANOS | | | | | | | |
|----------------------------------|---|----------------|---------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| ITEM | DESCRIÇÃO | Un. | QUANT. | AÇO CARBONO | | AÇO INOX | |
| | | | | PREÇOS | | PREÇOS | |
| | | | | Unitário | Total | Unitário | Total |
| 1 | PROJETOS | | | | | | |
| 1.1 | Elaboração todos os projetos necessários para a reforço, troca e pintura das estruturas. | unid | 1,00 | R\$ 8.638,34 (US\$ 2.440,20) | R\$ 8.638,34 (US\$ 2.440,20) | R\$ 8.638,34 (US\$ 2.440,20) | R\$ 8.638,34 (US\$ 2.440,20) |
| 2 | SEGUROS | | | | | | |
| 2.1 | Riscos de Engenharia, projetos, acidentes pessoais, responsabilidade civil e de veículos. | unid | 1,00 | R\$ 8.742,31 (US\$ 2.469,57) | R\$ 8.742,31 (US\$ 2.469,57) | R\$ 8.742,31 (US\$ 2.469,57) | R\$ 8.742,31 (US\$ 2.469,57) |
| 3 | FAIXA DE SERVIDÃO | | | | | | |
| 3.1 | Serviços de roçada, limpeza e remoção de árvores. | m ² | 1125,00 | R\$ 3,73 (US\$ 1,05) | R\$ 4.196,25 (US\$ 1.185,38) | R\$ 3,73 (US\$ 1,05) | R\$ 4.196,25 (US\$ 1.185,38) |

Comparativo de custo para manutenção estudo de caso 1. (1 US\$ = R\$ 3,54) - (continuação)

| MANUTENÇÃO EM TORRES 3 Em 3 ANOS | | | | | | | |
|----------------------------------|--|------|--------------|----------------------------------|--|----------------------------------|---|
| ITEM | DESCRIÇÃO | Un. | QUANT. | AÇO CARBONO | | AÇO INOX | |
| | | | | PREÇOS | | PREÇOS | |
| | | | | Unitário | Total | Unitário | Total |
| 4 | ESTRUTURAS | | | | | | |
| 4.1 | Recuperação da estrutura, estrut. Metálica | kg | 8165,44 | R\$ 7,35 (US\$ 2,07) | R\$ 60.015,95 (US\$ 16.953,65) | - | - |
| 4.2 | Reforço torres incluindo troca de peças e pintura de revitalização | kg | 6124,08 | R\$ 7,35 (US\$ 2,07) | R\$ 45.011,97 (US\$ 12.715,24) | - | - |
| 4.3 | Pintura e sinalização aeronáutica | unid | 1,00 | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) |
| 4.4 | Hidrojateamento | unid | 1,00 | - | - | R\$ 18.000,00 (US\$ 5.084,74) | R\$ 18.000,00 (US\$ 5.084,74) |
| | | | TOTAL | | R\$ 148.627,67 (US\$ 41.985,21) | | R\$ 61.599,75 (US\$ 17.401,05) |

Comparativo de custo para manutenção estudo de caso 2. (1 US\$ = R\$ 3,54)

| MANUTENÇÃO EM TORRES 3 Em 3 ANOS TORRE 12 METROS | | | | | | | |
|--|---|----------------|---------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| ITEM | DESCRIÇÃO | Un. | QUANT. | AÇO CARBONO | | AÇO INOX | |
| | | | | PREÇOS | | PREÇOS | |
| | | | | Unitário | Total | Unitário | Total |
| 1 | PROJETOS | | | | | | |
| 1.1 | Elaboração todos os projetos necessários para a reforço, troca e pintura das estruturas. | unid | 1,00 | R\$ 8.638,34 (US\$ 2.440,20) | R\$ 8.638,34 (US\$ 2.440,20) | R\$ 8.638,34 (US\$ 2.440,20) | R\$ 8.638,34 (US\$ 2.440,20) |
| 2 | SEGUROS | | | | | | |
| 2.1 | Riscos de Engenharia, projetos, acidentes pessoais, responsabilidade civil e de veículos. | unid | 1,00 | R\$ 8.742,31 (US\$ 2.469,57) | R\$ 8.742,31 (US\$ 2.469,57) | R\$ 8.742,31 (US\$ 2.469,57) | R\$ 8.742,31 (US\$ 2.469,57) |
| 3 | FAIXA DE SERVIDÃO | | | | | | |
| 3.1 | Serviços de roçada, limpeza e remoção de árvores. | m ² | 1125,00 | R\$ 3,73 (US\$ 1,05) | R\$ 4.196,25 (US\$ 1.185,38) | R\$ 3,73 (US\$ 1,05) | R\$ 4.196,25 (US\$ 1.185,38) |

Comparativo de custo para manutenção estudo de caso 2. (1 US\$ = R\$ 3,54)- (continuação)

| MANUTENÇÃO EM TORRES 3 Em 3 ANOS TORRE 12 METROS | | | | | | | |
|--|--|--------------|---------|----------------------------------|--|----------------------------------|---|
| ITEM | DESCRIÇÃO | Un. | QUANT. | AÇO CARBONO | | AÇO INOX | |
| | | | | PREÇOS | | PREÇOS | |
| | | | | Unitário | Total | Unitário | Total |
| 4 | ESTRUTURAS | | | | | | |
| 4.1 | Recuperação da estrutura, estrut. Metálica | kg | 6019,78 | R\$ 7,35 (US\$ 2,07) | R\$ 44.245,37 (US\$ 12.498,69) | - | - |
| 4.2 | Reforço torres incluindo troca de peças e pintura de revitalização | kg | 4514,83 | R\$ 7,35 (US\$ 2,07) | R\$ 33.184,03 (US\$ 9.374,01) | - | - |
| 4.3 | Pintura e sinalização aeronáutica | unid | 1,00 | R\$ 11.011,43 (US\$ 3.110,57) | R\$ 11.011,43 (US\$ 3.110,57) | R\$ 11.011,43 (US\$ 3.110,57) | R\$ 11.011,43 (US\$ 3.110,57) |
| 4.4 | Hidrojateamento | unid | 1,00 | - | - | R\$ 9.000,00 (US\$ 2.542,37) | R\$ 9.000,00 (US\$ 2.542,37) |
| | | TOTAL | | | R\$ 110.017,72 (US\$ 31.078,45) | | R\$ 41.588,33 (US\$ 11.748,11) |

Comparativo de custo para manutenção estudo de caso 3. (1 US\$ = R\$ 3,54)

| MANUTENÇÃO EM TORRES 3 Em 3 ANOS TORRE 0 METROS | | | | | | | |
|---|---|----------------|---------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| ITEM | DESCRIÇÃO | Un. | QUANT. | AÇO CARBONO | | AÇO INOX | |
| | | | | PREÇOS | | PREÇOS | |
| | | | | Unitário | Total | Unitário | Total |
| 1 | PROJETOS | | | | | | |
| 1.1 | Elaboração todos os projetos necessários para a reforço, troca e pintura das estruturas. | unid | 1,00 | R\$ 8.638,34 (US\$ 2.440,20) | R\$ 8.638,34 (US\$ 2.440,20) | R\$ 8.638,34 (US\$ 2.440,20) | R\$ 8.638,34 (US\$ 2.440,20) |
| 2 | SEGUROS | | | | | | |
| 2.1 | Riscos de Engenharia, projetos, acidentes pessoais, responsabilidade civil e de veículos. | unid | 1,00 | R\$ 8.742,31 (US\$ 2.469,57) | R\$ 8.742,31 (US\$ 2.469,57) | R\$ 8.742,31 (US\$ 2.469,57) | R\$ 8.742,31 (US\$ 2.469,57) |
| 3 | FAIXA DE SERVIDÃO | | | | | | |
| 3.1 | Serviços de roçada, limpeza e remoção de árvores. | m ² | 1125,00 | R\$ 3,73 (US\$ 1,05) | R\$ 4.196,25 (US\$ 1.185,38) | R\$ 3,73 (US\$ 1,05) | R\$ 4.196,25 (US\$ 1.185,38) |

Comparativo de custo para manutenção estudo de caso 3. (1 US\$ = R\$ 3,54)- (continuação)

| MANUTENÇÃO EM TORRES 3 Em 3 ANOS TORRE 0 METROS | | | | | | | |
|---|--|------|--------------|----------------------------------|---|----------------------------------|---|
| ITEM | DESCRIÇÃO | Un. | QUANT. | AÇO CARBONO | | AÇO INOX | |
| | | | | PREÇOS | | PREÇOS | |
| | | | | Unitário | Total | Unitário | Total |
| 4 | ESTRUTURAS | | | | | | |
| 4.1 | Recuperação da estrutura, estrut. Metálica | kg | 4300,74 | R\$ 7,35 (US\$ 2,07) | R\$ 31.610,41 (US\$ 8929,49) | - | - |
| 4.2 | Reforço torres incluindo troca de peças e pintura de revitalização | kg | 3225,55 | R\$ 7,35 (US\$ 2,07) | R\$ 23.707,81 (US\$ 6.697,12) | - | - |
| 4.3 | Pintura e sinalização aeronáutica | unid | 1,00 | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) | R\$ 22.022,85 (US\$ 6.221,14) |
| 4.4 | Hidrojateamento | unid | 1,00 | - | - | R\$ 6.000,00 (US\$ 1.694,91) | R\$ 6.000,00 (US\$ 1.694,91) |
| | | | TOTAL | | R\$ 98.917,97 (US\$ 27.942,92) | | R\$ 49.599,75 (US\$ 13.163,77) |