ESTUDO E ANÁLISE DE UMA TORRE DE AÇO DE TELECOMUNICAÇÕES PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Luiz Felipe Rodrigues Silva [(1)] (luizfeliperodsl@gmail.com), Matheus de Sousa Borges [(1)] (matheus.dsb151099@gmail.com), Nilson Gabriel Viana Silva [(1)] (nilsongabrielvs@gmail.com), Lucas Nunes Rodrigues [(1)] (lucasrodriguesbr07@gmail.com), José Henrique Costa Lemos [(1)] (josehenrique13br@gmail.com)

(1) Instituto Federal do Piauí (IFPI); Departamento de Engenharia Mecânica; Departamento de Engenharia Mecânica

RESUMO: *Desde a década de 90 o setor de telecomunicações tem expandido de forma exponencial, para atender essa demanda foram construídas torres para suportar as antenas que transmitem os sinais de telefonia móvel. O advento e criação de novas tecnologias possibilitou o desenvolvimento de novos materiais estruturais e um melhor conhecimento de suas propriedades mecânicas, com isso as massas dessas estruturas ficaram cada vez menores, fazendo com que as mesmas sofram uma maior influência das vibrações externas, logo se faz necessário um estudo mais detalhado da influência dessas cargas nas estruturas de aço. Devido a esses fatores, o presente trabalho tem como objetivo a análise dos esforços decorrentes das cargas estáticas provenientes do peso próprio da estrutura e acessórios, bem como as cargas de vento. Para a realização dessas análises será considerado como base o Método dos Elementos Finitos, com o auxílio dos programas. Alguns dos resultados obtidos foram a deformação máxima da torre (78,557 mm) e as frequências naturais, onde a menor foi de 1,95 hertz, logo a estrutura é rígida o suficiente, e pode ser calculada a partir do método exposto no desenvolvimento da pesquisa.*

PALAVRAS-CHAVE: *TELECOMUNICAÇÕES, CARGAS DE VENTO, MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.*

STUDY AND ANALYSIS OF A TELECOMMUNICATION STEEL TOWER BY THE FINITE ELEMENTS METHOD

ABSTRACT: *Since the 90's the telecommunications sector has expanded exponentially, to meet this demand, towers were built to support the antennas that transmit mobile telephony signals. The advent and creation of new technologies allowed the development of new structural materials and a better knowledge of their mechanical properties, with this the masses of these structures became smaller and smaller, causing them to suffer a greater influence from external vibrations. A more detailed study of the influence of these loads on steel structures is needed. Due to these factors, this work aims to analyze the efforts arising from static loads from the weight of the structure and accessories, as well as wind loads. To carry out these analyses, the Finite Element Method will be considered as a basis, with the aid of the programs. Some of the results obtained were the maximum deformation of the tower (78.557 mm) and natural frequencies, where the lowest was 1.95 hertz, so the structure is rigid enough, and can be calculated from the method exposed in the research development.*

KEYWORDS: *TELECOMMUNICATIONS, WIND LOADS, FINITE ELEMENTS METHOD.*

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

1. INTRODUÇÃO

Com a chegada de uma nova tecnologia, é impulsionado também o avanço tecnológico de outras áreas. O desenvolvimento do sistema brasileiro de telecomunicações, bem como a necessidade natural de expansão das linhas de transmissão de energia trouxeram consigo a necessidade da utilização de estruturas de grande porte, como para posicionar as antenas transmissoras de modo a cobrir a maior área possível ou transmitir maiores quantidades de energia à maiores alturas (OLIVEIRA, 2006).

Esse avanço tecnológico é relativamente novo, pois se iniciou na década de 70 e teve seu significativo crescimento no final da década de 90. Devido ao pouco tempo de uso dessas estruturas como meio de transmissão para telecomunicações, ainda existem poucos estudos sobre o assunto, principalmente no Brasil (ROTHIER, 2017).

Neste contexto, se faz necessário uma análise crítica e profunda acerca das tensões impostas sobre essas estruturas de transmissão, bem como foi dito acima, os fatores necessários a se definir o melhor tipo de estrutura a ser utilizado, são bem extensos, e por conta da falta de literatura brasileira desse setor, é necessário adaptar normas e procedimentos internacionais. Com isso, o objetivo do trabalho é utilizar dessas normas para detectar as possíveis falhas estruturais desses tipos de torres, levando em consideração as diversas cargas impostas sobre a estrutura, sendo elas permanentes (Peso próprio da estrutura, peso das antenas, peso dos equipamentos) e de vento (Cargas frontais e diagonais). O software *Ansys* (2020), auxiliará na análise desses esforços e suas respectivas causas na estrutura, a fim de obter os pontos críticos, onde a estrutura pode falhar. Enquanto para os cálculos de forças aerodinâmicas, utilizaremos a planilha do Google, por ser de fácil manuseio e não possuir custos monetários.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, a metodologia da pesquisa foi dividida em várias etapas, iniciando pelas pesquisas bibliográficas a cerca das normas, dos tipos de torres e seus acessórios para melhor desenvolvimento do artigo, logo em seguida é realizado as análises que podem ser vistas abaixo, e são subdivididas em algumas etapas, por fim apresentamos os resultados e conclusões. O fluxograma apresentado na Figura 1, ilustra os passos que foram tomados para o desenvolvimento do projeto.

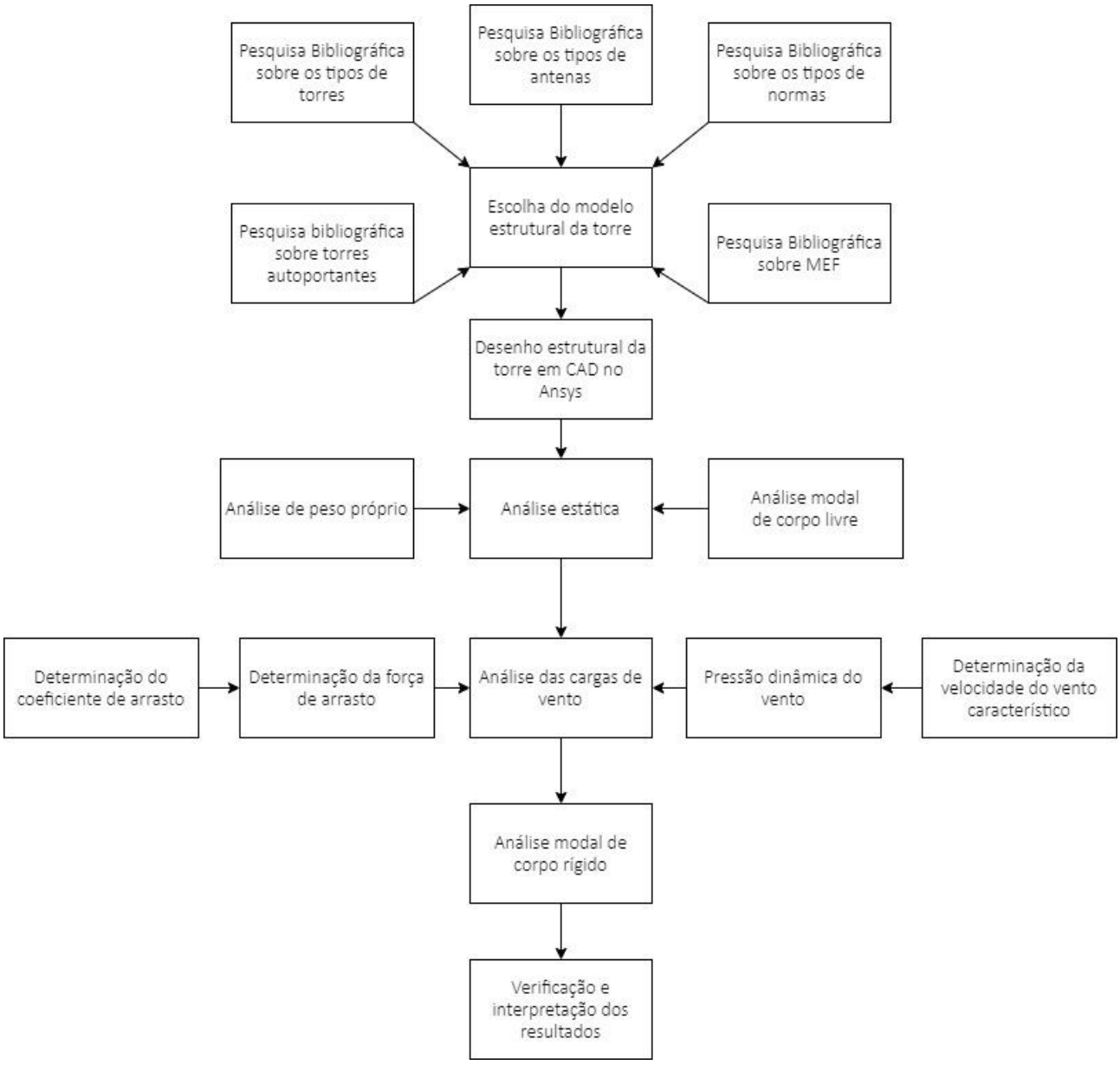


FIGURA 1. Fluxograma do projeto de pesquisa. Fonte: Autores (2021).

2.1 Escolha do material e modelo da torre

Foi utilizado um modelo pré-dimensionado encontrado na literatura estudada, trata-se de uma torre autoportante dimensionada por Rothier (2017). Dessa forma, para o respectivo projeto foi escolhido o modelo de base geométrica quadrangular, bem como o tipo de reticulado "XBX". Junto com o modelo foi considerado também o mesmo tipo de material utilizado pelo autor citado, assim como o tipo de perfil utilizado na estrutura.

Os perfis de aço usados na estrutura são cantoneiras com abas iguais. Estes perfis foram pré-dimensionados e padronizados em intervalos de altura da torre. As 31 dimensões dos perfis foram diminuídas de acordo com a altura de cada elemento para reduzir as solicitações de peso próprio e diminuir a área efetiva exposta, reduzindo também a carga de vento e economizando em material.
O tipo de aço estrutural do projeto foi selecionado de acordo com a norma americana ASTM A-36 (Aço-carbono). Na Tabela 1 abaixo podemos ver as propriedades mecânicas do aço adotado no projeto.

TABELA 1. Propriedades mecânicas do aço adotado no projeto.

Tensão de Escoamento (MPa)	fy = 250,00
Tensão de Ruptura (MPa)	fu = 400,00 a 550,00
Módulo de deformação longitudinal (GPa)	E = 210,00
Coeficiente de Poisson	V = 0,30
Coeficiente de dilatação térmica (° C)	β = 1,1 × 10−5
Peso específico (kN/m³)	ρ = 77,01

Fonte: Autores (2021).

2.2 Ações atuantes nas estruturas

No primeiro momento, para a análise estática o projeto se manteve somente nas cargas permanentes, ou seja, a ação do peso próprio e dos acessórios que acompanham a estrutura, sendo elas antenas, plataformas e escadas.

2.2.1 Ações permanentes

O peso próprio da estrutura será calculado diretamente pelo programa computacional Ansys student, a partir da massa específica e do volume encontrado pelo software baseado no modelo 3D.

Simplificadamente, o peso das plataformas será aplicado pontualmente na parte superior dos módulos, que são partes da estrutura. O aço utilizado nas plataformas é o mesmo aço da estrutura e o perfil adotado é cantoneira L 4x1/2”. A estimativa do comprimento do perfil consumido na plataforma é de 18,0 m, calculado no programa Ansys, na aba de design modeler. Portanto, o peso total da plataforma é 3,37 kN, distribuído em oito cargas concentradas, sendo quatro nos nós de montantes e quatro no meio de cada horizontal principal.

Sabendo que antenas parabólicas cheias necessitam de um tipo de suporte para serem acopladas a torre, que distribui a força nos dois montantes de uma face da torre. A localização e

apoio de antenas ao longo da torre pode ser visualizada no desenho da Figura 3, que foi definido de acordo com o procedimento (SDT-240-410-600, 1997). Após ser definido o tipo de antena, foi necessário encontrar um modelo adequado para a análise, de forma que de acordo com o manual do fabricante. Assim, será aplicada uma força vertical de 2,06 kN em cada montante de uma face onde os suportes estão apoiados.

A escada por não possuir função estrutural não será representada no Ansys, no entanto seu peso será considerado como um carregamento concentrado, aplicando-se quatro cargas concentradas no ponto médio das horizontais principais de cada módulo. Sendo adotado para o projeto o aço tubular (aço ASTM A500) utilizado nas escadas, tem como propriedade para as mesmas.

TABELA 2. Propriedades do aço tubular utilizado na escada.

Diâmetro externo (mm)	101,60
Espessura (mm)	4,50
Massa (kg/m)	10,78
Área (cm2)	13,73

Fonte: Os autores (2021).

2.2.2 Ações de carga de vento

Tendo em vista esse ser o principal causador das falhas estruturais nessas torres, por ser a carga mais acentuada, deve-se ter uma boa análise quanto a essas cargas, para isso a norma (NBR 6123, 1988) define três formas de calcular essas cargas, sendo elas: coeficientes de pressão, coeficientes de fora e coeficientes de força. Para este trabalho foi adotado o procedimento onde a força global do vento sobre uma torre é calculada através dos coeficientes de força. Resumidamente, este procedimento tem como expressão final a Equação (1), sendo, então, F_a a força de arrasto na estrutura provocada pelo vento em determinada altura, C_a é o coeficiente de arrasto, q é a pressão dinâmica e A_e é a área frontal efetiva.

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

2.2.2.1. Determinação dos fatores S1, S2 e S3

A determinação de cada um dos fatores necessários para o cálculo de determinação do fator Vk, que é a velocidade do vento característico na região utilizado no dimensionamento da estrutura

vertical, é calculada conforme o item 5 da NBR 6123 utilizando a expressão da Equação (2) descrita abaixo.

$$Vk = V0 \times S1 \times S2 \times S3 \quad (2)$$

Onde: V0 = Velocidade básica do vento que consiste na velocidade de uma rajada de 3s, com probabilidade de ser excedida em média uma vez a cada 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano. Este valor é tomado conforme isopletas da NBR 6123 (1988); S1 é o fator topográfico, ou seja, se o terreno onde está a estrutura vertical é plano, ou se está instalado na encosta de talude ou morros; S2 é o fator de rugosidade do terreno, que é calculado de acordo com a cota média dos obstáculos e da altura máxima da estrutura; e S3 é fator baseado em conceitos probabilísticos, esse fator é função do tipo de uso da estrutura e de seu fator de ocupação.

A partir dos valores já definidos, foi possível obter os seguintes valores de pressão dinâmica na estrutura em função da altura de referência apresentada na Tabela 3 abaixo, com todos os valores de S1, S2 e S3 definidos a partir da norma.

TABELA 3. Pressão dinâmica do vento em função da altura da torre.

Altura (m)	S2	S1 x S2 x S3	Vk (m/s)	q (N/m^2)
5,0	0,89	0,979	44,055	1189,73677
10,0	0,95	1,045	47,025	1355,55793
15,0	0,99	1,089	49,005	1472,11339
20,0	1,02	1,122	50,490	1562,68418
30,0	1,06	1,166	52,470	1687,65085
40,0	1,09	1,199	53,955	1784,53006
50,0	1,12	1,232	55,440	1884,11288
60,0	1,14	1,254	56,430	1952,00342

Fonte: Os autores (2021).

Após a definição dos valores de pressão dinâmica para cada trecho da torre, foi necessário determinar o coeficiente de arrasto para a estrutura. Para isso, a norma (NBR 6123, 1988) indica que é necessário encontrar o índice de área exposta, ou seja, a razão entre a área frontal efetiva de um reticulado e a área frontal da superfície limitada pelo contorno do reticulado, conforme a Equação (3), onde ω é o índice de área exposta e A_t é a área frontal da superfície limitada pelo contorno reticulado.

$$\omega = \frac{A_e}{A_t} \quad (3)$$

A partir dos resultados, encontra-se o coeficiente de arrasto C_a para cada módulo, de acordo com seu respectivo índice de área exposta. Tendo em vista, que a proposta do trabalho é analisar as forças de vento tanto de forma frontal quanto diagonal para ter também as tensões cisalhantes máximas no modelo, é necessário calcular os coeficientes de arrasto tanta para o primeiro caso, onde (= 0°), e para o segundo (= 45°), para isso é necessário utilizar a Equação (4) e por fim aplicar o valor de K^{α} na Equação (5). Temos que K^{α} é o fator de angulação de incidência do vento e Caα o coeficiente de arrasto sob certo ângulo de incidência.

$$K\alpha = 1 + \alpha/125 \leq 1{,}16 \quad (4)$$

$$Ca\alpha = K^{\alpha} \times C_a \quad (5)$$

A substituição dos valores encontrados na norma para o coeficiente de arrasto, C_a, para torres reticuladas de seção quadrada e triangular equilátera, formadas por barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondados pode ser calculada abaixo. Como descrito nas equações passadas, é necessário primeiro o cálculo de K^{α} na Equação (6) e por fim sua devida substituição na Equação (7) para as condições propostas para vento na direção frontal (α=0°).

$$K\alpha = 1 + \alpha/125 = 1{,}0 \quad (6)$$

$$C_a\alpha = K^{\alpha}C_a \quad (7)$$

Quando tivermos o vento na direção diagonal com angulação de 45 graus (α=45°), utilizaremos a Equação (8) para encontrar o valor de K^{α} e substituir na Equação (9) para encontrar o seu respectivo coeficiente de arrasto, como mostrado abaixo.

$$K\alpha = 1+(45/125) = 1,36 \rightarrow K\alpha = 1,16 \quad (8)$$

$$C_a\alpha = 1,16C_a \quad (9)$$

2.2.3 Cargas aerodinâmicas nos acessórios

Para definir as cargas de vento nos acessórios, sendo eles escadas, antenas e plataformas, é necessário saber os coeficientes de arrasto de cada um e as medidas geométricas de cada uma, já definidas no projeto. Os procedimentos da Telebrás (SDT240-400-702, 1997 e SDT-240-410-600, 1997) definem o coeficiente de arrasto (Ca) para as plataformas, escadas e antenas. Nas plataformas e escadas: C_a = 1,2; e nas antenas: C_a = 1,6.

Aplicando esses valores do coeficiente de arrasto na Equação (1), considerando também os valores de pressão dinâmica para os pontos de aplicação de força desses acessórios, calcula-se as forças horizontais e diagonais decorrentes da incidência do vento na escada, nas plataformas e nas antenas.

2.3 Análise estrutural estática

Com o modelo estrutural da torre já pronto, juntamente com as cargas permanentes já descobertas, deu se início a primeira parte da análise estática, tendo em vista que a mesma será subdividida em duas partes sendo elas cargas permanentes e cargas decorrentes do vento. No primeiro momento, para realizar a análise, após a discretização das cargas foi necessário achar os pontos de atuação de cada uma delas na torre.

2.3.1 Análise estática sob carregamento permanente e aerodinâmico

Como dito no Tópico 2.2.1, as cargas permanentes se dividem em quatro, sendo peso próprio, peso das plataformas, peso das escadas e peso das antenas. Os valores dessas cargas já calculados foram aplicados no modelo estrutural dentro do software Ansys student através da localização dos nós onde os elementos estruturais estão conectados.

A análise do carregamento aerodinâmico foi dividida em quatro partes, onde duas são decorrentes das cargas de vento frontal, sendo uma delas aplicada somente na estrutura

autoportante e a outra consiste na junção das cargas dos acessórios (antenas, plataformas e escada). As outras duas análises seguem a mesma divisão das duas primeiras, mas correspondem às cargas de vento impostas na diagonal da estrutura e nos seus acessórios. A Figura 3 abaixo mostra a localização desses elementos na torre do modelo calculado pelo método dos elementos finitos.

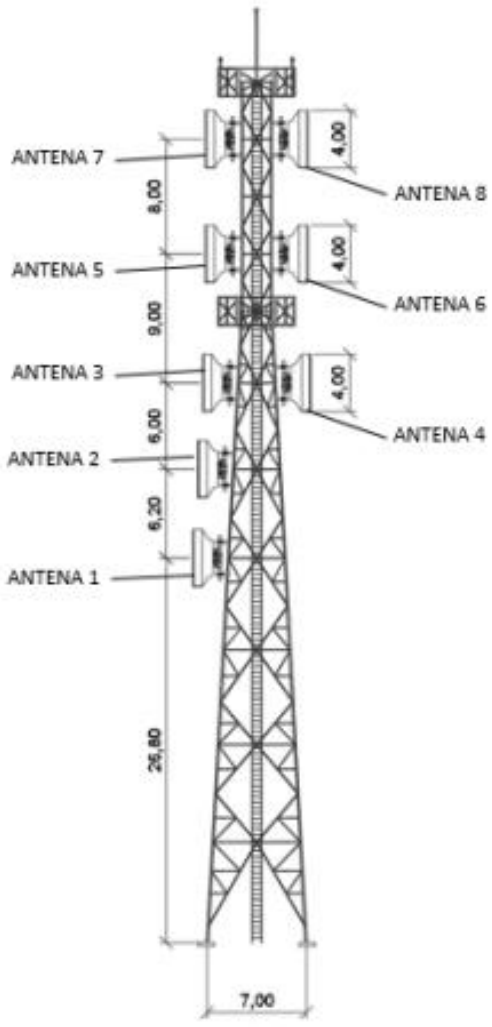


FIGURA 3. Disposição dos acessórios (antenas, plataformas e escadas) na estrutura vertical. Fonte: ROTHIER (2017).

2.4 Formulação física das análises por MEF

Na análise estática não é levado em consideração, as acelerações e velocidades são nulas, logo a Equação (10) para a solução estática da estrutura considera apenas as constantes de rigidez dos elementos, os deslocamentos nodais, e as forças aplicadas na estrutura é descrita abaixo.

$$\{F\} = \{K\} . \{X\} \quad (10)$$

A Equação (10) acima é descrita como a lei de hooke, que aplicada na análise estrutural tem como propósito analisar o regime elástico decorrente da deformação dos componentes da torre, onde: {F}= Matriz coluna em que é representado as forças atuantes nos nós dos elementos; {K}= Matriz quadrada que representa os coeficientes de rigidez da estrutura; {X}= Matriz coluna que representa os deslocamentos em cada nó dos elementos;

A análise dinâmica leva em conta as acelerações e velocidades que possuem alguma influência sobre o modelo, logo esses termos devem ser considerados na Equação (11) a seguir:

$$F(t) = [M] \{u3\} + [C] \{u2\} + [K] \{u1\} \quad (11)$$

Onde: [M] = Matriz de massa da estrutura; [C] = Matriz de amortecimento da estrutura; [K] = Matriz de rigidez da estrutura; {u3} = Vetor de acelerações da estrutura; {u2} = vetor de velocidades da estrutura; {u1} = vetor de deslocamentos da estrutura; F(t) = vetor de forças em função do tempo.

Na análise proposta no projeto foi determinado como modelo computacional na análise de elementos finitos da estrutura o elemento de viga, por ser um tipo de elemento capaz de analisar as forças axiais, momentos fletores, momentos torçores e forças cortantes em cada elemento do modelo, que também devido a sua formulação algébrica de fácil manipulação, o custo computacional na resolução dos sistemas de equações pelo MEF é baixo, logo é possível dividir a estrutura em vários subdomínios para aumentar a precisão dos resultados, sem demandar muito tempo na realização dos cálculos.

No MEF em vigas, as equações são formuladas a partir do diagrama de corpo livre de cada um dos elementos da estrutura, com o intuito de montar a matriz de rigidez de toda a estrutura a partir da rigidez de todos os seus elementos, onde o diagrama de corpo livre de cada elemento de viga possui 12 graus de liberdades.

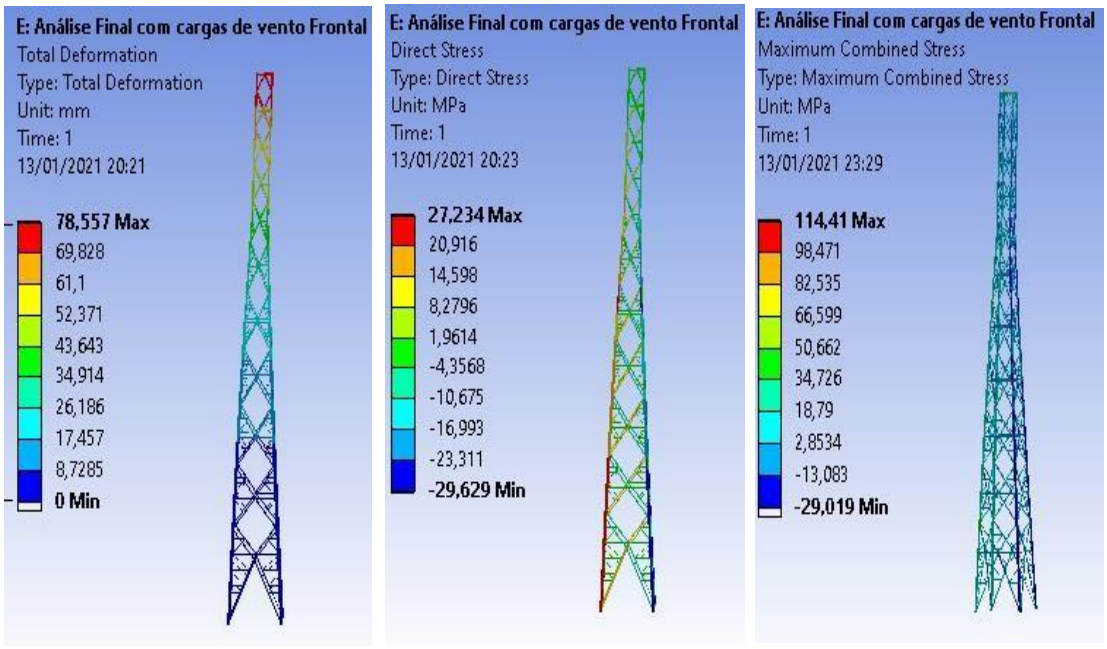
3. RESULTADOS

3.1 Resultados do carregamento combinado permanente e aerodinâmico sob direção frontal e diagonal

Após os cálculos anteriores feitos nas planilhas e no *Ansys*, de cada uma das ações de cargas na torre do projeto, deve-se juntar todos esses valores obtidos em dois casos diferentes, um com o peso próprio (escada, torre e acessórios) junto com a ação do vento frontal (acessórios e estrutura), e a outra análise com o peso próprio (escada, torre e acessórios) junto com a ação do vento diagonal (acessórios e estrutura). Com essas sobreposições de cargas é possível chegar ao resultado desejado no escopo do projeto, que é as deformações e tensões atuantes na torre ocassionado por todos os carregamentos que atuam simultaneamente na mesma, sobre condições normais de vento frontal ou diagonal.

3.1.1 Cargas permanentes e vento frontal

A Figura 4 abaixo representa as análises feitas para a torre com o peso próprio e com os acessórios, sofrendo cargas de vento no sentido frontal, que geram as tensões axiais (Tração e compressão) e as as tensões cisalhantes.



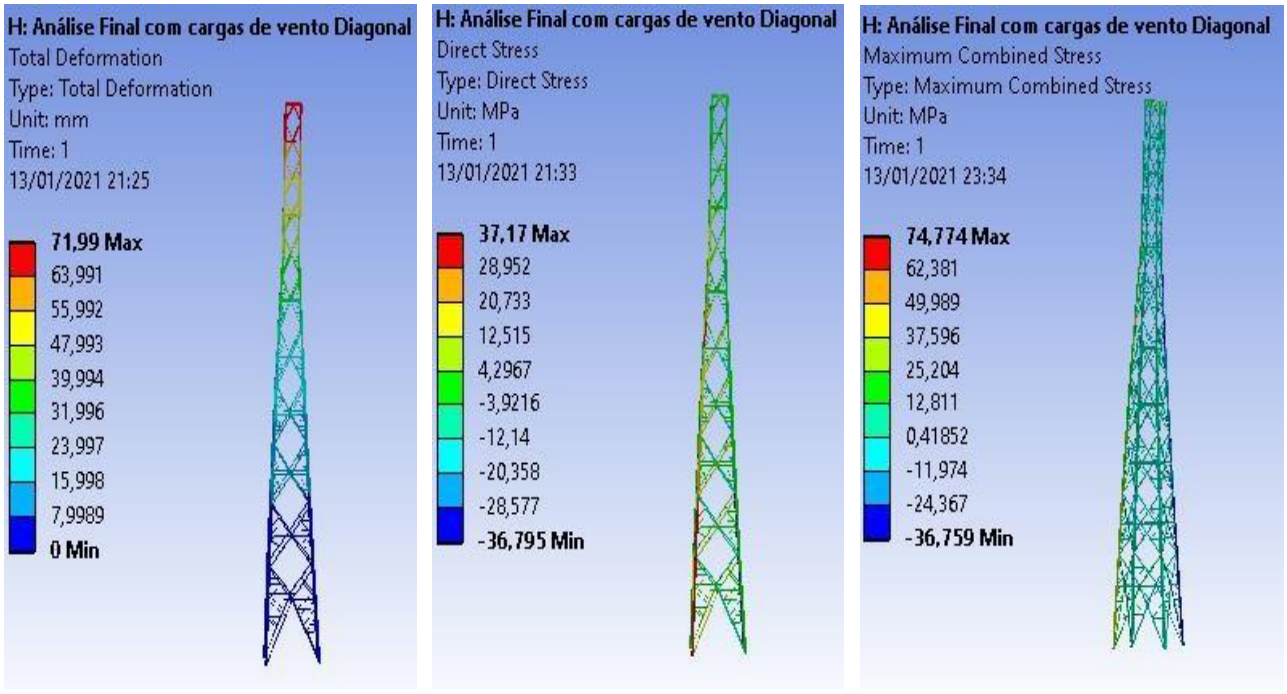
(a) (b) (c)

FIGURA 4. Deslocamento em mm na estrutura devido às cargas do peso próprio da torre e do vento frontal (a), tensões axiais em Mpa de tração e compressão na estrutura devido às cargas peso próprio da torre e do vento frontal (b), tensões máximas combinadas axiais e de flexão (c). Fonte: Autores (2021).

Nos resultados obtemos os valores de 78,557 mm de deformação total máxima no topo da torre, a tensão de tração máxima foi de 27,234 Mpa, que atua na mesma face e sentido de ação do vento, e o de compressão foi de -29,629Mpa, já na última análise as máximas tensões combinadas foram de 114,41 Mpa e -29,019 Mpa.

3.1.2 Cargas permanente e vento diagonal

A Figura 5 abaixo representa as análises feitas para a torre com o peso próprio e com os acessórios, sofrendo cargas de vento no sentido diagonal, que geram as tensões axiais (Tração e compressão), tensões cisalhantes e também tensões devido a torção, ocasionados pela ação do vento diagonal.



(a) (b) (c)

FIGURA 5. deslocamento em mm na estrutura devido às cargas do peso próprio da torre e do vento diagonal (a), tensões axiais em Mpa de tração e compressão na estrutura devido às cargas peso próprio da torre e do vento diagonal (b), tensões máximas combinadas axiais, de flexão e torção (c). Fonte: Autores (2021).

Nos resultados obtemos os valores 71,99 de mm de deformação total máxima no topo da torre, a tensão de tração máxima foi de 37,17 Mpa, que atua na mesma face e sentido de ação do vento diagonal, e o de compressão foi de -36,795Mpa, já na última análise as máximas tensões combinadas foram de 74,774 Mpa e -36,759 Mpa.

3.2 Modal de corpo livre

O objetivo da análise era obter as frequências naturais do modelo estrutural com o corpo livre no espaço, essa análise serve como uma pré-validação do modelo geométrico CAD, diminuindo a chance de possuir erros nas demais análises feitas pelo método dos elementos finitos no software Ansys.

Como critério de aceitação para o modelo estrutural, os seis primeiros modos de vibrar obtidos nessa análise devem possuir a frequência de 0 hz, caso esses valores não sejam obtidos significa que o modelo possui insconsistências geométricas e físicas, logo o mesmo deve ser avaliado e corrigido para um modelo físicamente válido. Nos cálculos obtidos no modelo de elementos finitos, as frequências em hertz dos 6 modos de vibrar da torre sem restrições e sem cargas impostas em sua estrutura foram iguais a 0.

3.3 Modal de corpo rígido

A análise modal de corpo rígido tem como objetivo obter as frequências naturais do modelo estrutural com o corpo fixo, através dos engastes da torre com o solo junto com as cargas cargas do peso próprio estrutural incluindo os acessórios e com as cargas de vento horizontais e diagonais, ou seja, obter os valores das frequências naturais da torre em si, e com isso comparar esses resultados com as frequências produzidas por outros mecanismos externos, por exemplo o vento, referente ao local onde a torre vai ser instalada, que no caso da presente pesquisa, a torre foi projetada para ser instalada na cidade de Teresina-PI.

A necessidade do cálculo dessas frequências, está relacionado ao fato de que caso exista sobreposição de frequências, o modelo pode sofrer o efeito da ressonância, podendo causar falhas estruturais, logo essa análise é de extrema importância para determinar a segurança da torre. Na Tabela 4 abaixo temos os resultados das duas análises de corpo rígido feitas no *Ansys:*

TABELA 4. Frequências [hz] e deformações associadas [mm] dos 12 modos de vibrar da torre engastada com as cargas do peso próprio juntas com cargas de ventos frontal e cargas do peso próprio juntas com cargas de vento diagonal.

	Cargas do peso próprio e de vento frontal		Cargas do peso próprio e de vento diagonal	
Modo de Vibrar	Frequência [HZ]	Deformação máxima associada [mm]	Frequência [HZ]	Deformação máxima associada [mm]
1	1,9582	0,40200	1,9582	0,40194
2	1,9607	0,40182	1,9608	0,40179
3	5,2079	0,69076	5,2058	0,69837
4	5,4942	0,35357	5,4942	0,35338
5	5,5038	0,35353	5,5039	0,35353
6	6,7217	0,24099	6,7230	0,24147
7	6,9343	0,99844	6,9283	0,99271
8	7,1364	1,04920	7,1325	1,02930
9	7,9264	0,62494	7,9270	0,62485
10	8,6142	0,17918	8,6150	0,17916
11	8,9339	0,82108	8,9249	0,83594
12	9,9809	0,74020	9,9808	0,73879

Fonte: Autores (2021).

Os dados obtidos nas duas análises mostram os 12 modos de vibrar, suas frequências em hertz e as deformações associadas a cada um desses modos de vibrar caso a estrutura seja exposta a essas mesma frequências, logo é possível observar que, as deformações que podem ser sofridas na torre em caso de ressonância são consideravelmente pequenas, logo dificilmente causariam danos severos a estrutura, porém o tempo de exposição a esses efeitos de ressonância estrutural devem ser levados em conta, pois se o tempo de exposição a essas frequências naturais forem elevados então a estrutura poderá sofrer danos mais severos. Em relação a recomendação da NBR 6123, a estrutura deve possuir uma frequência superior a 1 HZ, e podemos observar que nos cálculos a menor frequência natural obtida foi em torno de 1,95 HZ, então a estrutura é rígida o suficiente, e pode ser cálculada a partir do método estático de cargas de vento e pressão dinâmica.

4. CONCLUSÕES

O incentivo para o início da produção dessa pesquisa, surgiu com o intuito dos alunos do Instituto federal do Piauí, aplicarem os conhecimentos adquiridos no curso das disciplinas de estática, mecânica dos sólidos e da teoria adquirida sobre elementos finitos nos projetos de extensão nas equipes do Ifpi-Baja e Aerodesign Sol do Equador, além do fato de que existem poucas aplicações na literatura da região sobre MEF em estruturas de grande porte com o auxílio de novas ferramentas computacionais.

O objetivo geral do trabalho era modelar e analisar pelo método dos elementos finitos (MEF) uma torre de telecomunicações em seus estados críticos, com atuação de diferentes tipos de cargas de vento (frontal e diagonal) que ocorrem na região da cidade de Teresina-PI, com base nas normas técnicas vigentes para esse tipo de estrutura, e por fim obter os resultados de relevância para uma posterior análise do projeto pelo engenheiro, com o intuito de prever se o modelo estrutural está dimensionado de forma coerente e se o mesmo vai suportar de forma segura aos esforços que serão submetidos na sua estrutura.

Com os resultados obtidos, para as deformações e tensões combinadas na torre, é possível ter uma conclusão de que a torre não sofrerá ações que levam perigo a sua confiabilidade estrutural, pois a mesma possui 78,557 mm de deformação total máxima e as máximas tensões não ultrapassam o limite de escoamento do material, logo ela pode ser implementada de maneira segura na cidade de Teresina-PI, tal resultado tem relação direta com a escolha do desenho estrutural que garantiu uma boa rigidez, o material utilizado, os seus tipos de perfis, bem como a disposição dos acessórios.

Nas análises modais foi possível determinar os principais modos de vibrar da estrutura. O de corpo livre ajudou a ver que o modelo em CAD usado para fazer a análise por elementos finitos no *Ansys* não possuía inconsistências físicas e/ou geométricas, já as de corpo rígido mostrou resultados que podem ser usados pelo engenheiro para verificar se as frequências externas impostas na estrutura, como por exemplo frequências advindas de máquinas, veículos e vento, que dependem do local da cidade em que a torre vai ser implantada, podendo ou não causar danos severos para a estrutura, além disso foi possível determinar as possíveis magnitudes de deformações e prever no *Ansys* de forma gráfica cada um desses pontos de maior tendência de deformação, causadas de forma diferente para cada modo de vibrar.

A concepção do projeto estrutural, juntamente com conhecimento das tensões e deformações atuantes no modelo utilizando o método dos elementos finitos, ajudam o engenheiro na prevenção de falhas de projeto que prejudicam a integridade da torre quando construída e instalada, logo o software *Ansys* se mostrou como uma ferramenta poderosa para o engenheiro

conseguir simular e obter resultados próximos da realidade, interpretar os mesmos e posteriormente conseguir construir o seu modelo real com uma maior confiabilidade.

REFERÊNCIAS

Ansys Student; Ansys free student software; 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6123 - Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, ABNT, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR8800 - Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios (Método dos Estados Limites). Rio de Janeiro, ABNT, 2008.

CHENG, X.; LIU, Y. FINITE ELEMENT MODELING AND SIMULATION WITH ANSYS WORKBENCH. International Standard Book Number-13: 978-1-43987385-4 (eBook - PDF), 2015.

OLIVEIRA, M.I.R. Análise Estrutural de Torres de Transmissão de Energia Submetidas aos Efeitos Dinâmicos Induzidos pelo Vento. Dissertação em Engenharia Civil- Universidade do estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

ROTHIER, R.G.F. ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE UMA TORRE DE AÇO DE TELECOMUNICAÇÕES. Monografia em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Sistema de Documentação Telebrás. SDT-240-400-702, T. Especificações gerais para adoção de parâmetros básicos e apresentação de memorial de cálculo para torres e postes metálicos, 1997.

Sistema de Documentação Telebrás. SDT-240-410-600, T. Procedimentos de projeto para torres metálicas autoportantes, estaiadas e postes metálicos, 1997.