



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL

BÁRBARA VIEIRA DA SILVA

ANÁLISE DOS ESFORÇOS ATUANTES EM POSTES DE CONCRETO ARMADO
DEVIDO A CABOS

FORTALEZA
2019

BÁRBARA VIEIRA DA SILVA

ANÁLISE DOS ESFORÇOS ATUANTES EM POSTES DE CONCRETO ARMADO
DEVIDO A CABOS

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Civil.

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dra. Tereza Denyse P. de Araújo

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S578a Silva, Bárbara Vieira da.
Análise dos esforços atuantes em postes de concreto armado devido a cabos / Bárbara Vieira da Silva. –
2019.
78 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2019.
Orientação: Profa. Dra. Tereza Denyse Pereira de Araújo.

1. Postes de concreto armado. 2. Redes de distribuição . 3. Análise estrutural. I. Título.

CDD 620

BÁRBARA VIEIRA DA SILVA

ANÁLISE DOS ESFORÇOS ATUANTES EM POSTES DE CONCRETO ARMADO
DEVIDO A CABOS

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Civil.

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dra. Tereza Denyse P. de Araújo

Aprovada em: 22 / 11 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Tereza Denyse P. de Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Macário Cartaxo de Melo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Cássio Falcão Colaça
Enel Distribuição Ceará

A Deus, à Nossa Senhora de Fátima e à Santa
Teresinha do Menino Jesus pela força
concedida para concluir este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo em minha vida.

Aos meus pais Márcia e Hermenegildo, pelo amor incondicional e por sempre me apoiarem em todos os momentos.

À Profa. Dra. Tereza Denyse Pereira de Araújo, pela excelente orientação, paciência e incentivo apesar de qualquer dificuldade.

Aos meus amigos da graduação Arthur, Camile, Gabriela, Isabel, Juan, Lara, Leonardo, Racine, Sofia, Talys, Thaís e Vitor, por me acompanharem nessa trajetória. Não sei como teria chegado até aqui sem vocês.

Aos meus amigos de infância Alexandre, Bruno, Isabelle, Liana, Marília, Naiana, Rachel e Thaís, por me ajudarem a ver a vida sempre de forma mais leve e a superar todos os desafios, mesmo quando eu estava longe.

A Marília e Matheus, que conheci no final da graduação, mas que foram alegria e luz nos meus dias.

Aos meus familiares e amigos, por compreenderem a importância desse trabalho me ajudando de todas as formas possíveis, dando força e incentivo para continuar e pela compreensão de todos os momentos que tive que abdicar de estar com eles pelo desenvolvimento da pesquisa.

“O que eu faço é uma gota no meio de um oceano. Mas sem ela, o oceano será menor.”

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

Os postes de concreto armado são elementos estruturais inicialmente desenvolvidos para funcionar como suporte para as redes aéreas de energia elétrica, usualmente modelados como vigas em balanço, nas quais o esforço de flexão é preponderante. Em 24 de novembro de 1999 foi aprovada a Resolução Conjunta nº 1 (Aneel, Anatel e ANP) onde foi estabelecido que a capacidade excedente da infraestrutura das empresas prestadoras de serviços públicos de energia elétrica poderia ser concedida para o uso de provedores de serviços de telecomunicações de interesse coletivo. Com o passar do tempo, a evolução dos meios tecnológicos e o avanço da globalização fizeram com que houvesse uma expansão da rede de telecomunicações, principalmente gerando um aumento no tamanho da rede de fibra óptica das grandes operadoras e dos provedores de serviços de internet. Isso provocou um aumento na quantidade de cabos existentes nos postes, de forma que hoje é possível ver emaranhados de fios por toda a cidade. Nesse contexto, tendo em vista que o conhecimento do comportamento do poste como estrutura é uma premissa essencial para evitar acidentes e prejuízos, o presente trabalho tem como objetivo geral investigar este comportamento, de forma estática, de postes de concreto armado utilizados em linhas de distribuição de energia elétrica devido à ação de cabos. É feita uma análise de postes com seção Duplo T tipo D, medindo 9 m e 10,5 m, realizando um comparativo do seu desempenho antes e depois da introdução dos condutores provenientes do compartilhamento de infraestrutura. O software SAP2000, baseado no método dos elementos finitos, é utilizado para modelar as estruturas de suporte permitindo avaliar tensões e deslocamentos, levando em consideração uma seção variável ao longo da altura. Com isso, foi possível constatar até que ponto estas estruturas estão preparadas para suportar as cargas atuantes sobre elas atualmente, verificando os requisitos do ELS que devem ser atendidos. Em geral, as estruturas apresentam-se sobrecarregadas quando submetidas à situação de carga de cabos ou quando se encontram em situação de fim de linha ou esquina, necessitando de reforços ou de substituição por estruturas mais robustas.

Palavras-chave: Postes de concreto armado. Redes de distribuição. Análise estrutural.

ABSTRACT

Reinforced concrete poles are structural elements initially developed to function as supports for overhead power grids and usually modeled as cantilever beams, where the bending effort is predominant. On November 24, 1999, The Joint Resolution No. 1 (Aneel, Anatel and ANP) was approved, and established that the excess capacity of the infrastructure from public utility companies could be granted for the use of telecommunications service providers. Over time, the evolution of technological means and the advancement of globalization led to an expansion of the telecommunications network, mainly leading to an increase in the size of the fiber optic network from the major operators and internet service providers. This has led to a growth in the number of cables in the poles, in a way that today you can see tangles of wires throughout the city. In this context, considering that the knowledge of the behavior of the pole as a structure is an essential premise to avoid accidents and damage, the present work aims to investigate this behavior, in a static way, of reinforced concrete poles used in distribution lines due to the action of cables. An analysis is made of Double T-section D-type poles measuring 9 m and 10.5 m, comparing their performance before and after the introduction of the conductors due to infrastructure sharing. The SAP2000, a software based on the finite element method, is used to model the supporting structures allowing the evaluation of stresses and displacements considering variable section along the height. Thus, it was possible to verify if these structures are prepared to support the loads acting on them nowadays, checking the service state limit requirements. In general, structures are overloaded when subjected to cable loading in end-of-line or corner situations, requiring reinforcement or replacement with more robust structures.

Keywords: Reinforced concrete poles. Distribution networks. Structural Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Elementos presentes em redes de distribuição.....	16
Figura 2: Excesso de cabos de telecomunicação em postes	18
Figura 3: Exemplo de esforços verticais referentes ao peso da rede	27
Figura 4: Vãos entre os postes da rede.	28
Figura 5: Rede em desnível	28
Figura 6: Poste comprimido pela rede.....	28
Figura 7: Poste tracionado pela rede.....	29
Figura 8: Esforço horizontal em poste de rede de distribuição	30
Figura 9: Esforço horizontal em poste de rede de distribuição	31
Figura 10: Exemplo diagrama de momentos em poste.....	31
Figura 11: Diagrama de momentos NBR - 8452	32
Figura 12: Força do vento em condutores para vãos adjacentes	33
Figura 13: Força do vento em conectores de postes em ângulo de deflexão.....	34
Figura 14: Elementos para cálculo da força do vento nos postes	35
Figura 15: Postes Centro de Fortaleza.....	37
Figura 16: Seção transversal poste tipo “D” com seção duplo “T”	38
Figura 17: Variação de seção transversal - poste tipo “D” com seção duplo “T”	39
Figura 18: Seção transversal do poste DT	39
Figura 19: Elemento sólido de oito nós e estado de tensão em um ponto em termos de suas componentes cartesianas nas faces de um cubo elementar.....	41
Figura 20: Modelagem do poste utilizando o método dos elementos finitos	41
Figura 21: Aplicação de carga na estrutura.....	42
Figura 22: Cenário situação de posicionamento dos postes	42
Figura 23: Mapa de isopleias de velocidade básica do vento.....	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Cargas horizontais no poste de 9 m aplicadas na direção da face lisa da estrutura.	49
Gráfico 2: Cargas horizontais no poste de 9 m aplicadas na direção da face vazada da estrutura	50
Gráfico 3: Cargas horizontais no poste de 10,5 m aplicadas na direção da face lisa da estrutura.	51
Gráfico 4: Cargas horizontais no poste de 10,5 m aplicadas na direção da face vazada da estrutura.	52
Gráfico 5: Carga-deslocamento para poste de 9 m entre vãos adjacentes, com cargas aplicadas na direção da face cheia e na direção da face vazada	53
Gráfico 6: Carga-deslocamento para poste de 9 m no final da linha e em esquina, com cargas aplicadas na direção da face cheia na direção da face vazada.....	53
Gráfico 7: Carga-deslocamento para poste de 10,5 m entre vãos adjacentes, com cargas aplicadas na direção da face cheia e na direção da face vazada	54
Gráfico 8: Carga-deslocamento para poste de 10,5 m no final da linha e em esquina, com cargas aplicadas na direção da face cheia na direção da face vazada.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Postes DT para redes de distribuição e sua utilização	26
Tabela 2: Quantidade de nós e elementos nos postes modelados	40
Tabela 3: Componentes de redes de distribuição.....	43
Tabela 4: Dados de Rede Telecom Óptica	44
Tabela 5: Dados de Rede Coaxial.....	44
Tabela 6: Fator de cálculo S_2	46
Tabela 7: Elementos geradores de esforços nos postes	47
Tabela 8: Cargas verticais para poste de 9 m.....	48
Tabela 9: Cargas horizontais para poste de 9 m	49
Tabela 10: Cargas verticais para poste de 10,5 m.....	50
Tabela 11: Cargas horizontais para poste de 10,5 m.....	51
Tabela 12: Características material modelagem	52
Tabela 13: Deslocamentos máximos obtidos pela simulação numérica	54
Tabela 14: Tensões máximas obtidas nas simulações.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BT	Baixa Tensão
CN	Carga Nominal
DT	Duplo T
L_{eq}	Vão Equivalente
MT	Média Tensão
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
RD	Rede de Distribuição
TE	Telecomunicações

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivos	18
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	18
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	19
1.3	Organização do trabalho	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Considerações iniciais	20
2.2	Análise estrutural dos postes de concreto armado	21
2.3	Simulação computacional	22
2.4	Compartilhamento de infraestrutura	24
3	POSTES DE CONCRETO ARMADO DUPLO T	25
3.1	Características gerais	25
3.2	Determinação dos esforços atuantes	26
<i>3.2.1</i>	<i>Esforços verticais</i>	26
<i>3.2.2</i>	<i>Esforços horizontais</i>	29
<i>3.2.3</i>	<i>Momentos fletores</i>	31
3.3	Critérios de projeto	32
<i>3.3.1</i>	<i>Cargas devido ao vento</i>	32
<i>3.3.1.1</i>	<i>Ação do vento nos cabos</i>	33
<i>3.3.1.2</i>	<i>Ação do vento nos postes</i>	34
4	MATERIAIS E MÉTODO	36
4.1	Características do modelo	37
<i>4.1.1</i>	<i>Parâmetros geométricos</i>	37
<i>4.1.1.1</i>	<i>Parâmetros geométricos da rede de distribuição</i>	37
<i>4.1.1.2</i>	<i>Parâmetros geométricos dos postes</i>	38
<i>4.1.2</i>	<i>Parâmetros elétricos e de telecomunicações</i>	43
<i>4.1.3</i>	<i>Condições de solicitação</i>	44
<i>4.1.4</i>	<i>Condições de contorno</i>	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1	Cálculo das cargas atuantes	47

5.1.1	<i>Postes de 9 m</i>	48
5.1.2	<i>Postes de 10,5 m</i>	50
5.2	Resultados das simulações	52
6	CONCLUSÕES	57
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	58
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICE A – DEFORMADAS DOS POSTES	62
	APÊNDICE B – TENSÕES NA BASE DOS POSTES	67
	ANEXO A – POSTE SEÇÃO DUPLO T EXTENSÃO TOTAL	77
	ANEXO B – POSTE SEÇÃO DUPLO T DETALHE DO TOPO	78

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é uma das formas de energia mais utilizadas, atualmente, pela humanidade devido a diversos fatores tais como facilidade de transporte e reduzido índice de perda energética durante conversões. Nos dias atuais, existe uma variedade de matrizes de geração de eletricidade tais como usinas hidrelétricas, termoeletricas e eólicas.

O processo de fornecimento deste tipo de energia para a população é dividido em três etapas: geração, transmissão e distribuição. Sendo esta última definida como a etapa final deste processo, por meio da qual realiza-se a entrega de energia aos consumidores.

Segundo a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), o sistema de distribuição é composto pela rede elétrica e pelo conjunto de instalações e equipamentos elétricos que operam em níveis de alta tensão (superior a 69 kV e inferior a 230 kV), média tensão (superior a 1 kV e inferior a 69 kV) e baixa tensão (igual ou inferior a 1 kV).

A entrega de energia aos consumidores pode ser feita de forma aérea ou de forma subterrânea. No entanto, no Brasil, esta distribuição é feita predominantemente por vias aéreas, com linhas de distribuição de energia compostas principalmente por postes, cabos, isoladores e cruzetas (Figura 1). É possível visualizar, diariamente, as intensas ramificações de cabos elétricos ao longo das ruas conectando inúmeras pessoas ao sistema elétrico.

Figura 1: Elementos presentes em redes de distribuição.



Fonte: Viscovini, Ronaldo et al., ano (2015, p. 5).

Para que os cabos condutores e demais equipamentos como isolantes e

transformadores sejam sustentados de forma segura e eficaz, faz-se necessário o uso de estruturas de suporte, denominadas postes, distintas para cada tipo de relevo e nível de tensão existentes. Dessa forma, os postes utilizados em linhas de distribuição podem variar, de acordo com o projeto, tanto em forma como em material.

Os postes de concreto armado são estruturas que podem ter seção circular vazada, seção retangular vazada ou seção duplo T, sendo esta última a mais utilizada atualmente.

De acordo com Benecase (2015, p.23), “[...] em termos de superestrutura, as solicitações estruturais são provenientes de ações estáticas, como o peso próprio, ações dinâmicas, como o vento, e ações propagadas entre elementos, devido aos cabos de energia”.

Com o passar do tempo, a evolução dos meios tecnológicos e o avanço da globalização fizeram com que houvesse uma expansão da rede de telecomunicações, principalmente gerando um aumento no tamanho da rede de fibra óptica das grandes operadoras e dos provedores de serviços de internet. A partir desta expansão, um tema obteve grande importância: O Compartilhamento de Infraestrutura.

Em 24 de novembro de 1999 foi aprovada a Resolução Conjunta nº 1 (Aneel, Anatel e ANP) onde foi estabelecido que a capacidade excedente da infraestrutura das empresas prestadoras de serviços públicos de energia elétrica poderia ser concedida para o uso de provedores de serviços de telecomunicações de interesse coletivo.

Devido ao desenvolvimento e crescimento populacional terem sido cada vez mais acelerados, a necessidade de mais cabos para suprir a utilização de energia, telefones e internet tem aumentado rapidamente. Dessa forma, as estruturas de suporte têm sido cada vez mais solicitadas em termos de esforços provenientes dos condutores (Figura 2), o que causa grande preocupação em relação aos riscos de sobrecarga de tais estruturas.

1.1 Justificativa

A utilização de postes de concreto armado nas linhas de distribuição de energia elétrica tornou-se bastante comum devido às suas vantagens em relação aos postes de fibra, tais como: maior durabilidade quando expostos a fatores ambientais, fundações menos onerosas e maior rapidez de montagem.

Os cabos são elementos que atuam acoplados aos postes e existem tanto nas redes de distribuição como nas de telecomunicações e, em ambos os casos, atuam gerando esforços nos postes, fazendo-se necessário o estudo desta interação.

Figura 2: Excesso de cabos de telecomunicação em postes



Fonte: Site Diário de Pernambuco (2018)

O fato de o tamanho das redes de distribuição e comunicação, atualmente, já serem extensos e crescerem continuamente traz à tona o questionamento de como essas estruturas de concreto armado, utilizadas em todo o território nacional, estão resistindo aos esforços atuantes sobre elas com esse acréscimo de carga, levando em consideração o compartilhamento de infraestrutura entre as empresas prestadoras de serviços.

É possível perceber que, para a verificação da capacidade de suporte dos postes, frente a este desenvolvimento acelerado, faz-se necessário o estudo não apenas do tracionamento dos cabos, mas, também, dos efeitos de sua carga em peso e fatores meteorológicos (ventos e chuvas) permitindo reduzir a frequência de acontecimentos como estruturas inclinadas devido à sobrecarga, evitando tombamentos e futuros prejuízos não somente para as prestadoras de serviço mas para a população em geral.

Além disso, a literatura acerca deste tema ainda é bastante escassa o que torna o presente estudo relevante tanto do ponto de vista acadêmico como social.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo geral*

Este trabalho tem como objetivo geral investigar o comportamento estrutural, de forma estática, de postes de concreto armado utilizados em linhas de distribuição de energia elétrica devido à ação de cabos.

1.2.2 Objetivos específicos

A fim de alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são necessários:

- (a) Verificar a influência dos cabos (linhas de energia elétrica, telefonia, internet e TV a cabo) na situação atual dos postes de concreto armado.
- (b) Analisar como estas estruturas se comportam quando submetidas aos esforços provenientes destes condutores considerando um sistema estático.
- (c) Constatar quais os máximos esforços que os postes conseguem suportar sem que haja tombamento ou que a estrutura se incline.
- (d) Realizar simulações numéricas dos postes com auxílio de softwares de elementos finitos para comparar o comportamento das estruturas atuando apenas com os elementos de redes de distribuição e com o acréscimo de carga devido ao compartilhamento de infraestrutura.
- (e) Estabelecer um estudo de comparação entre os deslocamentos e tensões encontrados em cada caso a fim de evidenciar a intensificação do uso dessas estruturas.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos que são descritos a seguir.

O primeiro capítulo apresenta as considerações iniciais acerca do tema a ser discutido, assim como justificativa e objetivos geral e específicos. No capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica apresentando os principais assuntos tratados por diferentes autores que estão relacionados ao tema deste trabalho e contribuíram para a realização do mesmo.

O capítulo 3 mostra os requisitos e critérios adotados atualmente para cálculo e dimensionamento dos postes de concreto armado para redes de distribuição de energia elétrica. No capítulo 4, são descritos os materiais levados em consideração durante as análises assim como o método utilizado. Apresentando, também, a caracterização do modelo de poste em elementos finitos utilizado no SAP2000.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos com as análises dos postes, assim como sua análise e discussão. O capítulo 6 trata das conclusões obtidas e comentários finais das análises realizadas, bem como sugestões para estudos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações iniciais

O dimensionamento de postes de concreto armado é algo que deve levar em consideração diversos fatores como: forma da seção, altura, quantidade de equipamentos instalados (cabos, transformadores, cruzetas, ...), ações dinâmicas (vento e chuva), peso da estrutura em si e do eletricitista instalador, dentre outros.

Tendo em vista a quantidade de informações envolvidas nos cálculos, sua complexidade e o fato de possíveis interrupções de serviços de energia e telecomunicações podem ser provocadas pelo mal dimensionamento das estruturas, alguns estudos têm sido realizados neste campo, tendo foco tanto na apresentação de uma melhor análise estática e dinâmica do comportamento das mesmas, como também, em modelagens computacionais que permitem um estudo deste comportamento unindo todos os principais elementos envolvidos.

Neste capítulo, são apresentadas pesquisas, no âmbito nacional e internacional, buscando uma maneira de apresentar da melhor forma possível a capacidade de suporte de cada sistema, seu comportamento levando em consideração tanto os efeitos de tração dos condutores e peso dos equipamentos como também ações externas, permitindo indicar qual a estrutura mais adequada para cada situação do cotidiano e afirmar se estas estruturas estão atualmente resistindo a tais esforços.

No Brasil, os principais fatores levados em consideração nos estudos são as recomendações das normas técnicas brasileiras ABNT NBR 5422:1985 – Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica; ABNT NBR 6123:1988 – Forças devido ao vento em edificações; ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto, as especificações técnicas de cada companhia de distribuição, podendo variar conforme a empresa, e os itens propostos na Resolução Conjunta ANEEL/ANATEL/ANP nº 001, de 24 de novembro de 1999 – (“Resolução Conjunta”) que rege como deve ocorrer o compartilhamento de infraestrutura entre empresas de energia e telecomunicação.

Já internacionalmente, mesmo com o baixo índice de uso de redes aéreas de distribuição, alguns estudos foram realizados tendo como foco desastres causados com as estruturas de sustentação quando estas são submetidas a fortes cargas de vento ou neve.

2.2 Análise estrutural dos postes de concreto armado

Conforme mencionado no item anterior, são muitos os parâmetros a serem levados em consideração ao dimensionar estruturas de suporte para fornecimento de energia. Nesse contexto, Pires (2017) em seu trabalho de conclusão de curso apresentou um projeto mecânico de um suporte de linha aérea de transmissão de energia, onde apresentou os principais aspectos a serem considerados no seu dimensionamento, como por exemplo: componentes das linhas de transmissão, distâncias de segurança e esforços mecânicos.

Além disso, para os postes de concreto armado, existem diferentes tipos de seções que podem ser utilizadas (circular, retangular vazada, duplo T...) e é nesse sentido que surgem estudos comparativos como o de Benencase (2015). Esse autor realizou uma pesquisa tendo como foco as linhas de transmissão, dimensionando postes com 23 m de altura e diferentes geometrias. Foi utilizado um método analítico de dimensionamento, comparando-o a utilização do software ABAQUS, que utiliza o método dos elementos finitos. Realizou uma análise linear estática sendo possível observar fatos como que o poste de seção circular vazada absorveu menos carga de vento, o poste de seção duplo “T” sofreu os maiores esforços, e o poste de seção retangular vazada apresentou alto consumo de materiais e foi a segunda estrutura mais pesada.

No entanto, há pesquisas como a de Wahrhaftig, Brasil e Silva (2008) que, consideraram a avaliação dos postes como estruturas esbeltas e não lineares, onde a rigidez muda ao longo da estrutura. Sendo assim, o processo para a consideração dos efeitos dinâmicos do vento considerados pelas normas, não seriam suficientes para a análise do real comportamento da estrutura. Foi avaliada, então, a influência da rigidez geométrica no cálculo da frequência natural de vibração, estabelecendo um modelo matemático simplificado, por meio de uma técnica do tipo Rayleigh. Realizaram ainda uma análise não linear com a utilização do método dos elementos finitos para a análise do comportamento de um poste de linha de telefonia existente.

Além das características próprias desses elementos estruturais, a consideração de ações externas também influencia bastante no seu comportamento. De acordo com Pravia e Drehmer (2004), as ações provenientes do vento não são problemáticas para estruturas baixas e robustas. No entanto, para estruturas com altura elevada e esbeltas, como é o caso dos postes, essas ações passam a ser as mais importantes para a determinação do projeto da estrutura. Além disso, Alam, Tokgoz e Hwang (2019) notam que postes inclinados, seja devido à sobrecarga na fundação ou na própria estrutura, estão mais suscetíveis a não resistir a desastres relacionados ao vento. Assim, em sua pesquisa aplicam uma metodologia prática para ajudar a aumentar a

resiliência de postes de redes de distribuição a tais desastres.

Há ainda, pesquisas como a de Zeynalian e Khorasgani (2018) que investigaram o comportamento estrutural de postes de redes de distribuição submetidos a ações laterais geradas por condições climáticas severas, como nevascas. Foi realizada uma análise não linear da estrutura e constatado que para as cargas previstas em norma não há problemas com a estrutura, mas que imprevistos, como grandes rajadas de vento, podem levar a estrutura a apresentar falhas.

Normalmente, a análise do efeito da ação dos ventos sobre os condutores é feita utilizando uma análise estática equivalente. Mas, a recorrência de inúmeros acidentes envolvendo as estruturas de suporte destes elementos, sem que a velocidade de projeto tenha sido atingida, evidencia que este problema tenha sido ocasionado por ações dinâmicas ou erros relacionados à estimativa das ações do vento, assim, Carvalho et al. (2018) realizaram um estudo do comportamento dinâmico dos cabos submetidos à ação do vento, considerando a não-linearidade geométrica proveniente da grande rotação dos cabos e o amortecimento aerodinâmico, obtendo assim resultados mais reais com relação ao comportamento destas estruturas.

2.3 Simulação computacional

O projeto de redes de distribuição de energia, como mencionado anteriormente, é algo complexo e que reúne diversos conhecimentos e fatores. Para chegar a uma análise final, é necessário fazer uso das normas técnicas, aplicar procedimentos empíricos, cálculos extensos com grande quantidade de dados e além disso utilizar o julgamento e bom senso.

Como esse processo demanda bastante tempo, esforço e não existe uma formulação específica que relacione todas as variáveis, têm-se utilizado como artifício as técnicas de computação para auxiliar na solução destes problemas e para a obtenção de análises mais detalhadas.

De acordo com Milissena (2016), atualmente, os softwares de simulação computacional vêm aprimorando-se e utilizando cada vez mais o método dos elementos finitos, que permitem a solução de muitos problemas de engenharia. Este artifício tem permitido a modelagem cada vez mais detalhada de várias situações, melhorando critérios de aceitação, erros e apresentação de resultados.

Brito et al. (2017) desenvolveram um artifício computacional para o

dimensionamento mecânico de linhas aéreas rurais de distribuição. Neste artigo, foi apresentado um método heurístico simples que considerava fatores como relevo, esforços mecânicos e flechas dos cabos sustentados. Os resultados obtidos mostraram um aumento considerável na produtividade e a redução de equívocos durante a realização dos projetos, evidenciando como a utilização de métodos computacionais podem facilitar e agilizar esse processo.

Khalili e Saboori (2010) apud Queiroz (2011) utilizaram o método dos elementos finitos para realizar uma análise dinâmica transiente de postes cônicos de transmissão, composto por polímeros reforçado com fibras (FRP). Foram consideradas ações provenientes de forças de tração produzidas por cabos, rajadas de vento e, também, o choque de veículos. Além disso, foi adotado o comportamento das estruturas como linear elástico e o modelo foi analisado como uma viga engastada na base e livre no topo. Foram realizadas duas análises, uma analítica feita pelos autores e outra com base no método dos elementos finitos utilizando o software ANSYS e foram obtidos resultados bastante concordantes entre si.

Singh (2009), em seu trabalho, descreveu o comportamento de torres metálicas autoportantes submetidas à ação do vento. O autor desenvolveu novos programas: GTAU que gerava a geometria das torres autoportantes e AETAU que realizava a análise estática. As torres foram modeladas utilizando um modelo matemático não linear que permite alongamentos nos elementos de cabos e treliças para a introdução das forças de pré-tensionamento, considerando também o efeito da variação da temperatura. Os resultados obtidos nos novos programas foram comparados com os resultados obtidos com a utilização do software SAP2000 Advanced v. 12.0.0 obtendo valores de esforços máximos em cada parte da treliça.

Queiroz (2011), em sua dissertação de mestrado, realizou análises paramétricas para representar o comportamento do sistema poste-defensa simulando impacto por veículos. Para isso, realizou modelagens numéricas, utilizando o software SAP2000, baseado no método dos elementos finitos, para que fosse possível melhor avaliar tensões e deslocamentos nas estruturas analisadas tendo em vista a variação da seção do poste ao longo de sua altura.

Além disso, Abreu (2015) utilizou o método dos elementos finitos por meio do pacote comercial ABAQUS/Explicit para avaliar problemas de impacto com elevadas tensões em um curto intervalo de tempo em postes de concreto armado. Neste estudo, também foram realizadas duas análises: uma de vibração livre que foi comparada com a solução analítica do poste, permitindo validar o modelo numérico e a do impacto de veículos, cujos resultados foram comparados com os resultados obtidos por análises transientes. Com isso, foi possível verificar quais destas análises melhor representam o fenômeno do impacto no modelo proposto.

2.4 Compartilhamento de infraestrutura

Outro ponto importante que deve ser ressaltado é o compartilhamento de infraestruturas e como isso tem impactado na capacidade resistente dos postes já existentes.

Prazeres (2006) desenvolveu um artigo com o objetivo de mostrar o que ocorreu com as redes de distribuição de energia após a expansão do sistema telefônico no país e o consequente início de compartilhamento de infraestruturas entre empresas. No trabalho, o autor buscou recapitular todo o processo de universalização, o que ocorreu com as redes de distribuição durante os anos, realizando consultas a várias concessionárias de energia, para verificar como se encontram hoje as suas redes após o compartilhamento de infraestrutura e o que fizeram para evitar um dano maior às suas redes.

Nesse estudo, foi ressaltado que o compartilhamento de infraestrutura juntamente com o crescimento da rede, provocaram um aumento na poluição visual causada pela grande quantidade de fios existentes e, ainda mais importante, o aumento de acidentes gerados por essa grande quantidade, seja por sobrecarga da estrutura ou por algo enroscado no sistema causando colapso deste.

Segundo Bandos (2008), o compartilhamento de infraestrutura é, muitas vezes, fonte de negociações conflituosas uma vez que a mesma inicialmente não foi projetada para receber a enorme quantidade de fios demandada e, também devido a que muitas vezes, devido às escassas fiscalizações, as empresas acabam ocupando faixas maiores que as permitidas nas estruturas alavancando o problema.

3. POSTES DE CONCRETO ARMADO DUPLO T

3.1 Características gerais

Postes de concreto armado de seção Duplo T (DT) são estruturas de seção rígida com perfil em T, utilizadas para sustentar cabos e equipamentos elétricos em vias urbanas, rurais, subestações e outras instalações elétricas. Usualmente são modelados como vigas em balanço, nas quais o esforço de flexão é preponderante. Suas características geométricas, segundo a norma ABNT NBR 8451-2:2013, encontram-se nos Anexo A e B.

Essas estruturas têm, também, a função de prevenir o choque elétrico por acidente em indivíduos que trafegam nas ruas e calçadas. A qualidade de sua instalação, assim como conhecimento do seu comportamento como estrutura são premissas essenciais para evitar acidentes e prejuízos que são ocorrências bem comuns atualmente.

Esses elementos têm seção variável ao longo de sua altura, gerando uma grande economia na fabricação dos mesmos e na execução de suas fundações. Além disso, podem ser classificados de acordo com a função que desempenham nas redes, como:

- **Estruturas de suspensão:** Têm a função apenas de apoiar os cabos condutores e demais elementos elétricos mantendo-os afastados do solo.
- **Estruturas de ancoragem:** São estruturas que se encontram no começo ou final das redes, reforçadas e projetadas para resistirem a cargas assimétricas.
- **Estruturas de derivação:** Utilizadas em caso de necessidade de derivação da rede em determinado ponto.
- **Estruturas em ângulo:** Presentes onde há mudança de direção da rede de distribuição.

E quanto à sua forma, são classificados como:

- **Estruturas singelas monolíticas:** São postes em peça única que ao apresentar-se no local de instalação já estão aptas para posicionamento e fincamento.
- **Estruturas singelas seccionadas:** São estruturas formadas por mais de uma peça e que precisam ser montadas no local de instalação.
- **Estruturas geminadas:** São compostas por mais de um poste conectados entre si, por meio de cruzetas e colares de concreto, o que proporciona uma maior rigidez e inércia ao sistema permitindo uma absorção de esforços atuantes superiores.

Segundo a Especificação Técnica no. 115 da Enel Distribuição Ceará, os tipos de

poste DT padronizados para serem utilizados pelas linhas de distribuição são os de tipo B e D, cujas características, que variam conforme altura, são apresentadas na Tabela 1, em que BT significa Baixa Tensão, MT - Média Tensão e TE - Telecomunicações.

Tabela 1: Postes DT para redes de distribuição e sua utilização

Altura (m)	Tipo	Resistência Nominal (daN)	Utilização
9	D	150	Rede BT e TE
	B	300	
		600	
10,5	D	150	Rede BT, MT e TE
	B	300	
		600	
	B - 1,5	1000	
	B - 4,5	2000	
12	B	300	Rede BT, MT (com derivação) e TE
		600	
	B - 1,5	1000	
	B - 4,5	2000	
	B - 6,0	3000	

Fonte: elaborada pela autora.

3.2 Determinação dos esforços atuantes

Em 2003, um estudo realizado pela ELETROPAULO (empresa que atualmente faz parte do grupo Enel que atua nos estados do Ceará, Rio de Janeiro, São Paulo e Goiás) gerou um documento técnico que padronizava o procedimento de dimensionamento de postes de concreto que atuam nas redes de distribuição. Segundo a AES ELETROPAULO RT-2003, os principais esforços atuantes podem ser verticais, horizontais ou momentos fletores e são descritos a seguir.

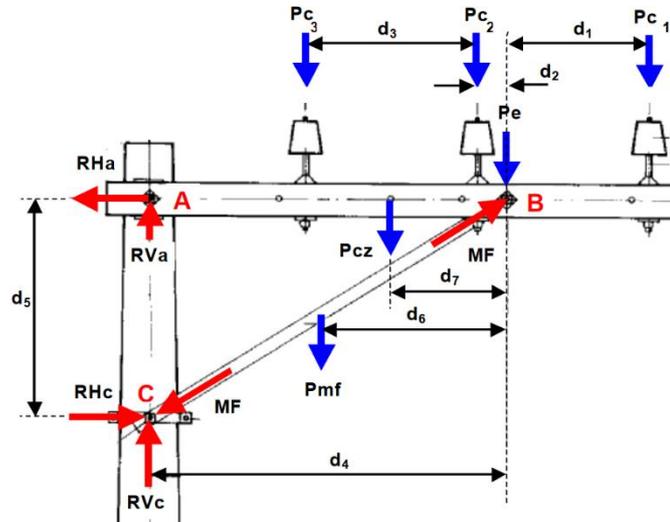
3.2.1 Esforços verticais

Os esforços verticais que atuam nos postes são cargas no sentido paralelo do seu eixo, porém que, normalmente, atuam com excentricidade a tal eixo, provocando esforços de compressão e flexão.

O peso total da rede é formado pela soma dos pesos dos condutores, dos isoladores,

das cruzetas, dos transformadores, do eletricitista, etc. Na Figura 3, mostra-se um exemplo das componentes que formam este esforço.

Figura 3: Exemplo de esforços verticais referentes ao peso da rede



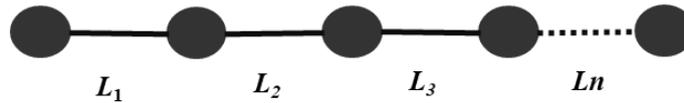
Fonte: RT 2.003- AES Eletropaulo (2003, com adaptações).

A parcela de peso dos cabos depende das configurações da rede. Em caso de redes com vãos contínuos, o valor do peso do cabo deve ser considerado como sendo o valor do comprimento do vão equivalente (L_{eq}) multiplicado pelo peso por metro linear do cabo. Caso se esteja analisando estruturas de ancoragem, deve-se considerar metade do valor encontrado na multiplicação do vão equivalente pelo peso por metro linear do cabo. E, ainda, em caso de vãos descontínuos e cabos diferentes, o cálculo deve ser realizado considerando a soma das metades das multiplicações do comprimento do vão pelo peso linear do cabo em cada vão. O cálculo do L_{eq} , se dá conforme a seguinte expressão:

$$L_{eq} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n L_i^3}{\sum_{i=1}^n L_i}} \quad (1)$$

Em que $L_1, L_2, L_3 \dots L_n$ são cada um dos vãos existentes entre os postes da rede (Figura 4).

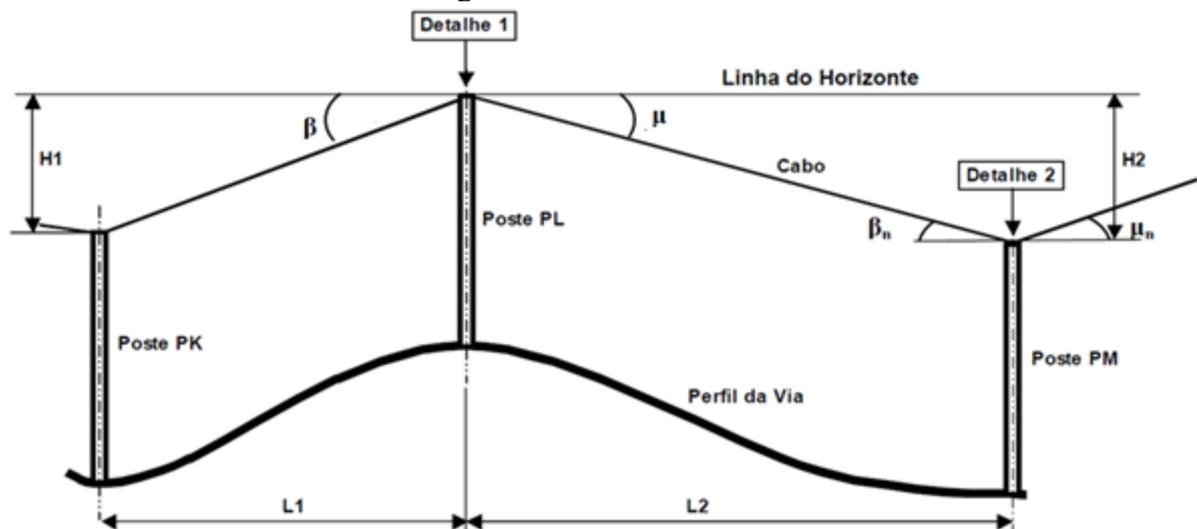
Figura 4: Vãos entre os postes da rede.



Fonte: elaborada pela autora.

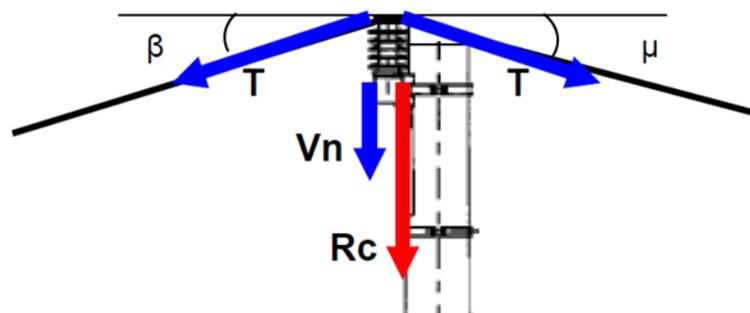
No caso de redes em desnível, além do seu peso, os cabos geram um esforço adicional de tensão de projeto, que podem ser tanto de compressão como de tração dependendo da posição dos postes, como mostrado nas Figuras 5, 6 e 7.

Figura 5: Rede em desnível



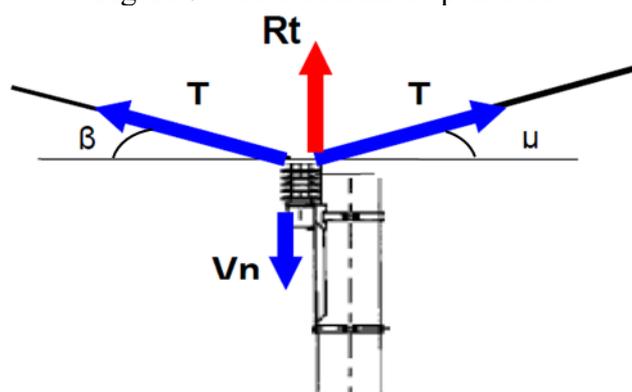
Fonte: RT 2.003 - AES Eletropaulo (2003, com adaptações)

Figura 6: Poste comprimido pela rede



Fonte: RT 2.003- AES Eletropaulo (2013, com adaptações)

Figura 7: Poste tracionado pela rede



Fonte: RT 2.003- AES Eletropaulo (2003, com adaptações)

Onde:

β e μ : São ângulos formados entre os cabos e a linha do horizonte (Figura 5), convencionalmente considerados como positivos quando abaixo da linha (Figura 6) e negativos quando acima (Figura 7).

V_n : é o peso dos cabos, isoladores e demais elementos da rede.

T : é a tensão de projeto dos cabos, que pode ser encontrada nas especificações de cada fornecedor ou distribuidora.

R_c : é a resultante das forças de compressão no poste (Figura 6).

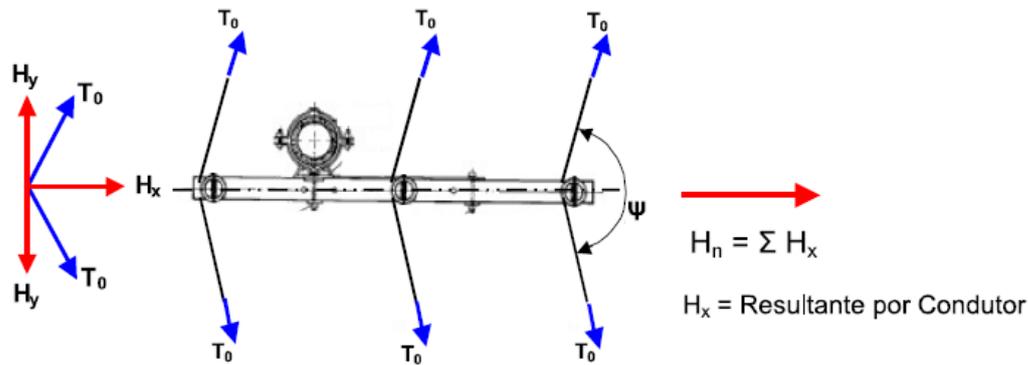
R_t : é a resultante das forças de tração no poste (Figura 7).

3.2.2 Esforços horizontais

Já os esforços horizontais, ocorrem devido às tensões resultantes dos cabos quando existem ângulos em planta, finais de linha, tirantes de estaiamento, dentre outros.

A Figura 8 apresenta um exemplo destes esforços que não são paralelos ao eixo da estrutura e geram apenas esforços de momentos máximos, na base do poste junto ao solo, e mínimos, no ponto de aplicação da carga resultante transferida ao topo do poste.

Figura 8: Esforço horizontal em poste de rede de distribuição



Fonte: RT 2.003- AES Eletropaulo (2003, p. 8).

Onde:

T_0 : é a tensão de projeto dos cabos.

H_y : é a resultante das forças no plano horizontal na direção longitudinal da linha.

H_x : é a resultante das forças no plano horizontal na direção transversal da linha.

H_n : é a resultante horizontal que atuará no poste.

Ψ : é o ângulo da rede verificado em planta baixa.

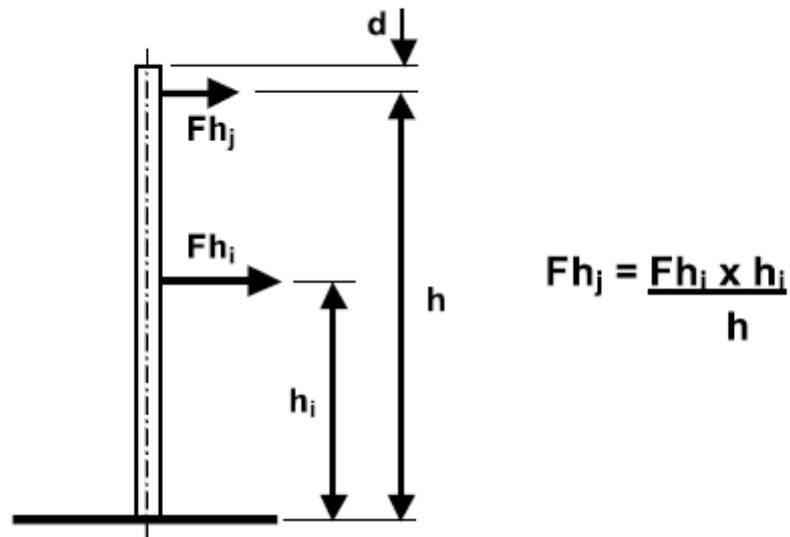
Considerando-se as cruzetas localizadas na bissetriz do ângulo Ψ , as tensões de projeto existentes como iguais e vãos mecanicamente contínuos, pode-se garantir que o poste não sofrerá esforços de torção e que as somatórias de forças H_y se anulam, restando apenas a resultante H_x , que pode ser calculada pela expressão a seguir:

$$H_x = T_0 \sqrt{2(1 + \cos \Psi)} \quad (2)$$

Portanto, a resultante das forças horizontais (H_n) que atuará no poste é igual ao número de condutores iguais multiplicado pela resultante H_x .

Além disso, a instrução técnica recomenda que, quando existirem diversas forças horizontais atuantes na estrutura aplicadas em diferentes alturas, é preciso transferi-las ao ponto virtual de aplicação dos esforços horizontais no topo do poste utilizando um valor para a força horizontal resultante, que seja equivalente aos momentos provocados pelas forças horizontais existentes, como mostrado na Figura 9.

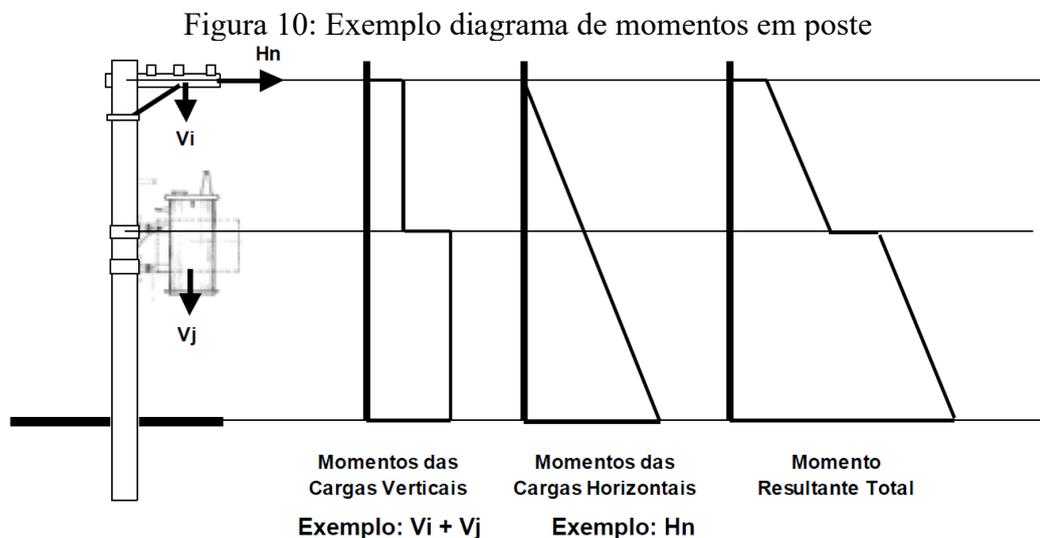
Figura 9: Esforço horizontal em poste de rede de distribuição



Fonte: RT 2.003- AES Eletropaulo (2003, p. 10).

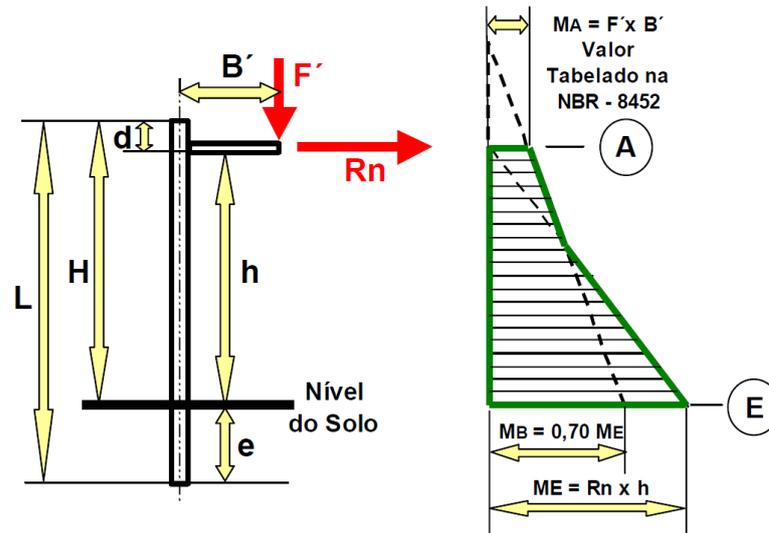
3.2.3 Momentos fletores

Segundo a especificação técnica, cada tipo de poste apresenta um diagrama de esforços distinto, como exemplificado na Figura 10, e que deve ser fornecido pelo fabricante. Cabendo ao projetista verificar se o momento resultante total do poste calculado está contido dentro dos limites estabelecidos pelas NBR 8451 e NBR 8452, cujo diagrama padrão está apresentado na Figura 11.



Fonte: RT 2.003- AES Eletropaulo (2003, p. 12).

Figura 11: Diagrama de momentos NBR - 8452



Fonte: NBR 8452 (1998, com adaptações).

Onde:

L : é o comprimento nominal do poste.

H : é a altura do poste.

h : é a altura útil do poste.

d : é a distância do topo do poste ao plano de aplicação das cargas (definido em norma como igual à 0,10m).

R_n : é a força externa atuante no poste (resultante das cargas horizontais).

F' : é a resultante das forças verticais.

B' : é a distância do eixo do poste ao plano de aplicação da carga.

e : é o comprimento do engaste do poste, o qual é definido, em metros, por:

$$e = \frac{L}{10} + 0,60 \quad (1)$$

3.3 Critérios de projeto

3.3.1 Cargas devido ao vento

O procedimento técnico “Dimensionamento de postes para redes de distribuição aérea de energia elétrica” PTL0426DT/18-R0, da empresa Light, apresenta a forma de cálculo

dos esforços causados pela ação do vento nas redes de distribuição conforme descrito a seguir.

3.3.1.1 Ação do vento nos cabos

Para os condutores, este esforço atua horizontalmente sobre a sua superfície. Em vãos adjacentes, a força do vento (F_{vc}) em um poste P qualquer da rede (Figura 12) é dada pela equação abaixo:

$$F_{vc} = F_{vc1} + F_{vc2} = P_{vc} \frac{l_1}{2} d_1 + P_{vc} \frac{l_2}{2} d_2 \quad (4)$$

Onde:

P_{vc} : é a pressão do vento em superfícies cilíndricas (daN/m^2) – calculada de acordo com o procedimento técnico como $P_{vc} = 0,00471 V_k^2$.

V_k : é a velocidade característica do vento, calculada de acordo com os critérios da NBR 6123 (km/h).

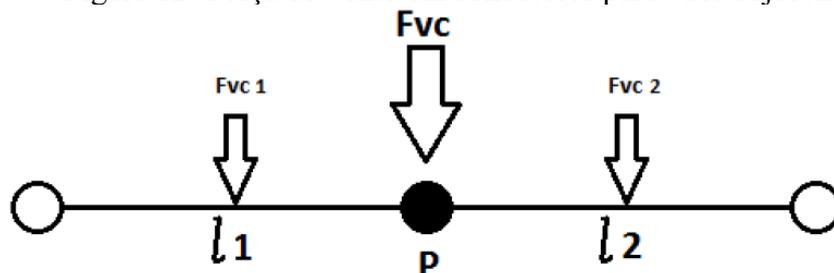
l : é o comprimento do vão (m).

d : é o diâmetro do condutor (m).

Já para postes em ângulo de deflexão (Figura 13), a força do vento é calculada pela expressão a seguir:

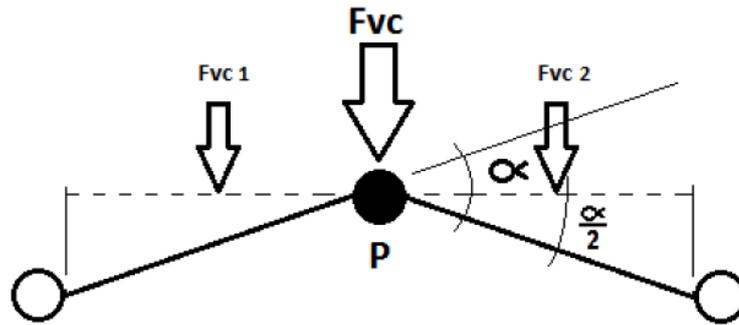
$$F_{vc} = F_{vc1} + F_{vc2} = P_{vc} \frac{l_1 \cos \frac{\alpha}{2}}{2} d_1 + P_{vc} \frac{l_2 \cos \frac{\alpha}{2}}{2} d_2 \quad (5)$$

Figura 12: Força do vento em condutores para vãos adjacentes



Fonte: NTL 000 - SET/87 – Light (2018)

Figura 13: Força do vento em conectores de postes em ângulo de deflexão



Fonte: NTL 000 - SET/87 – Light (2018)

3.3.1.2 Ação do vento nos postes

Para a ação do vento atuante nas estruturas de suporte, o procedimento técnico apresenta o cálculo por meio da seguinte equação:

$$F_{vp} = P_{vp} S_p \quad (6)$$

Onde:

F_{vp} : é a força do vento no poste (daN)

P_{vp} : é a pressão do vento sobre superfícies planas (daN/m²) - calculada de acordo com o procedimento técnico como $P_{vp} = 0,00754 V_k^2$.

S_p : é a área da superfície do poste exposta ao vento (m²), a qual é expressa por:

$$S_p = \frac{1}{2} (d_t + d_e) h, \text{ onde:} \quad (2)$$

h : é a altura livre do poste (m)

d_t : é o diâmetro do poste no topo (m)

d_e : é o diâmetro do poste na linha do solo (m), dado pela seguinte equação:

$$d_e = hC + d_t, \text{ onde:} \quad (3)$$

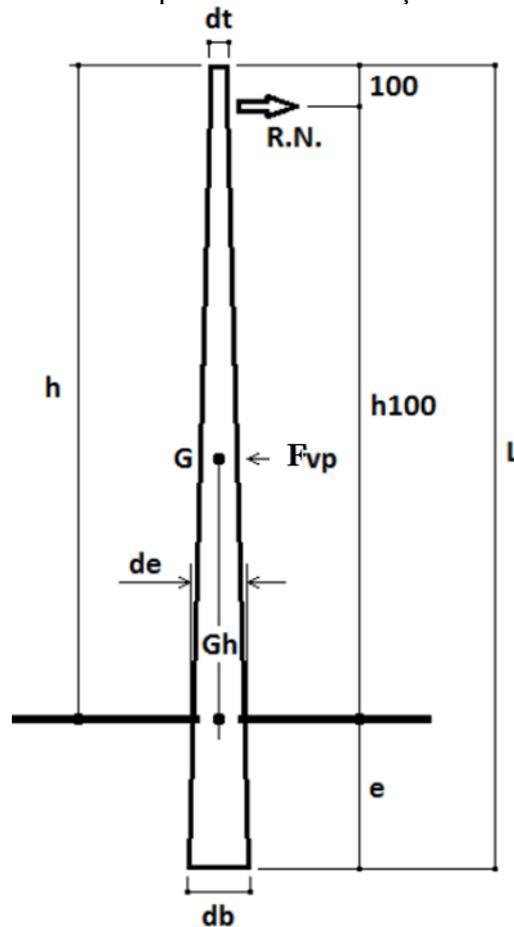
C : é a conicidade do poste descrita por:

$$C = \frac{(d_b + d_t)}{L} \quad (4)$$

Sendo que d_b é o diâmetro da base do poste. Assim, supõe-se que a força do vento seja aplicada no centro de gravidade (G - Figura 14) do poste, o qual é calculado por:

$$G_h = \frac{h(d_e + 2d_t)}{3(d_e + d_t)} \quad (5)$$

Figura 14: Elementos para cálculo da força do vento nos postes



Fonte: NTL 000 - SET/87 – Light (2018, com adaptações)

4. MATERIAIS E MÉTODO

Primeiramente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre postes de concreto armado atualmente utilizados em linhas de distribuição de energia elétrica, conseguindo, assim, fundamentar teoricamente o problema. Foram utilizados como materiais de estudo: livros, dissertações de mestrado, artigos de periódicos científicos e normas técnicas (principalmente as utilizadas pelas distribuidoras de energia).

A revisão foi feita com foco em atender as necessidades das distribuidoras quanto ao cálculo dos esforços mecânicos nas estruturas, critérios de dimensionamento para projetos de rede de distribuição e estudo do crescente impacto mecânico causado nas redes devido ao compartilhamento de infraestrutura e aumento de consumidores.

Após esta etapa, foram definidos o modelo da seção e tipo do poste de concreto armado que é o objeto de pesquisa. Os parâmetros geométricos, propriedades dos materiais e condições de carregamento considerados serão descritos posteriormente.

Já definidos os materiais, os procedimentos de cálculo dos esforços se deram de forma a fazer uma aplicação prática das normas técnicas ABNT NBR 5422:1985, ABNT NBR 6123:1988, ABNT 6118:2014, NTL 000 - SET/87 – Light, RT 2.003- AES Eletropaulo seguindo também os critérios contidos nas Especificações Técnicas de número 40, 48, 115, 117, 129, 275 e 278 da Enel Distribuição.

Após as estruturas terem sido definidas, foram realizadas modelagens tridimensionais a partir do software de elementos finitos SAP2000 para melhor visualizar o comportamento estrutural dos postes de forma estática e conseguir uma verificação dos requisitos do ELS que devem ser atendidos.

Foram verificados os esforços, momento fletores e deslocamentos nos postes. Primeiramente, considerando a atuação dos equipamentos provenientes das distribuidoras de energia como condutores, cruzetas e isoladores e, em seguida, considerando também os equipamentos utilizados para as redes de telecomunicação (TV, telefonia e internet) com o intuito de verificar as principais diferenças em cada caso.

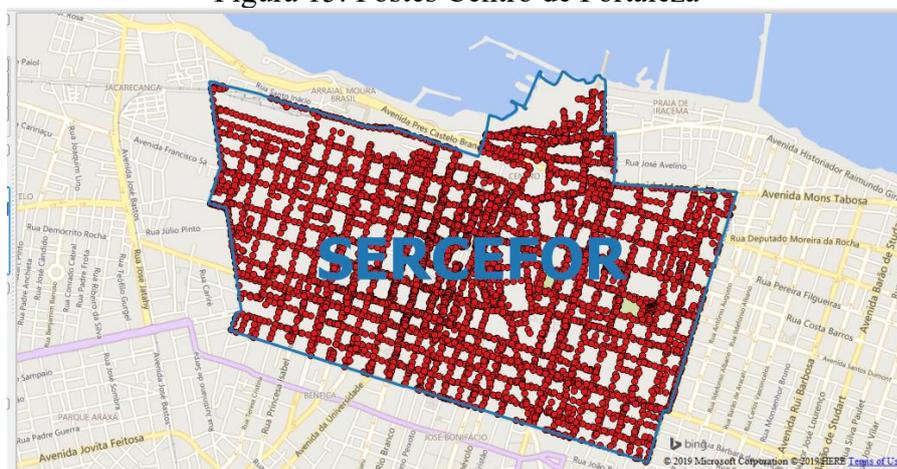
Os resultados obtidos para os diferentes tipos de postes, tanto considerando apenas os aparatos de distribuição de energia como considerando também os de telecomunicação, foram comparados utilizando ferramentas de análise como gráficos e tabelas para facilitar a observação e leitura dos dados em questão.

4.1 Características do modelo

As análises realizadas neste trabalho correspondem a um trecho de uma linha de distribuição de energia de média e baixa tensão (MT/BT), considerando os suportes com altura variável.

Para escolha dos elementos considerados na modelagem dos postes, foi analisada uma base de dados fornecida pela Enel Distribuição Ceará em conjunto com a Cadic Brasil Geoprocessamento Ltda., em relação ao censo dos postes encontrados no Centro de Fortaleza (Figura 15). Além disso, foram feitas coletas de dados por meio de visitas às ruas do centro e da utilização da ferramenta Google Earth. Este bairro foi escolhido por ser um bairro antigo onde há grande concentração de unidades consumidoras tanto comerciais como domésticas e, conseqüentemente, de postes, podendo assim proporcionar a visualização de como as estruturas estão realmente funcionando em termos de esforços atualmente.

Figura 15: Postes Centro de Fortaleza



Fonte: Imagem fornecida pela empresa Cadic

4.1.1 Parâmetros geométricos

4.1.1.1 Parâmetros geométricos da rede de distribuição

Para os casos analisados, as características geométricas adotadas para a rede foram as seguintes:

- Vãos entre postes é 45 m, devido às redes de distribuição normalmente serem planejadas utilizando este tamanho de vão.

- b) Desnível do terreno foi considerado como 0,00 m apenas para efeito de simplificação das análises.

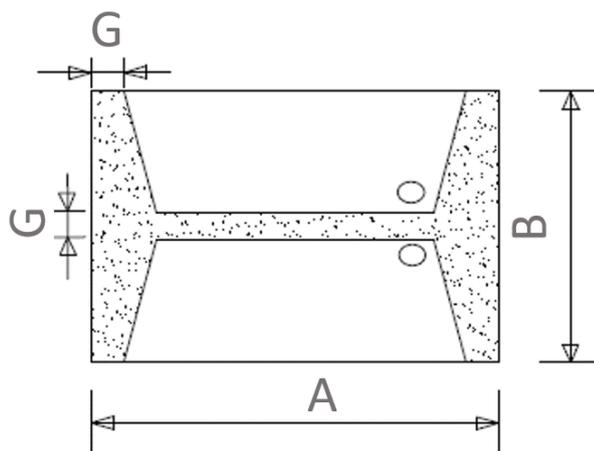
4.1.1.2 Parâmetros geométricos dos postes

A Enel utiliza postes de concreto armado que são padronizados e classificados conforme o seu uso. Atualmente, a ET 115 apresenta as características e usos de cada tipo de poste.

Segundo especificações da antiga Coelce (FERREIRA, 2009), os postes mais comuns utilizados em Fortaleza para redes de MT/BT são os dos tipos D e B. No presente estudo, são analisados postes de tipo “D” como estruturas singelas monolíticas e que possuem uma seção duplo “T”.

Na Figura 16 está representado esse tipo de seção, onde A é a largura; B é a altura; e G representa a espessura da alma da seção e da seção extrema das mesas dos T’s e, seu valor segundo as especificações da Enel é ± 50 mm. A variação das dimensões B e A de acordo com a altura do poste é mostrada na Figura 17.

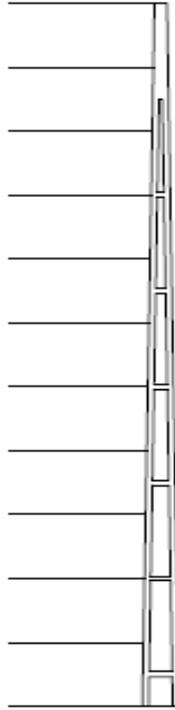
Figura 16: Seção transversal poste tipo “D” com seção duplo “T”



Fonte: Anexo Especificação Técnica no. 155 – Postes de Concreto Armado e Protendido (2018, com adaptações).

Figura 17: Variação de seção transversal - poste tipo “D” com seção duplo “T”

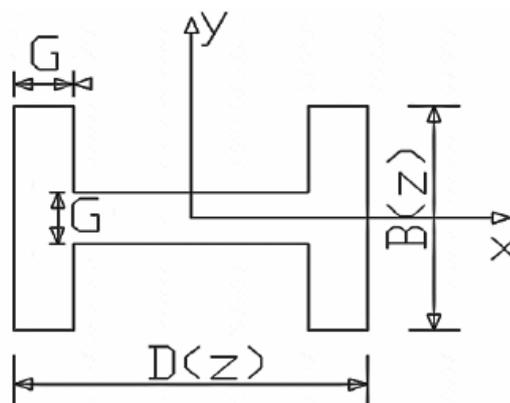
MASSA (*) (kg)	VOLUME (m ³)	DIMENSÕES (mm)		POSIÇÃO (m)
		B	A	
0,00	0,0000	100	120	0,00
33,62	0,0134	110	136	1,00
71,78	0,0287	120	152	2,00
112,62	0,0450	130	168	3,00
158,45	0,0633	140	184	4,00
210,30	0,0841	150	200	5,00
266,30	0,1067	160	216	6,00
328,28	0,1313	170	232	7,00
397,97	0,1591	180	248	8,00
470,54	0,1882	190	264	9,00
549,07	0,2196	200	280	10,00
635,93	0,2543	210	296	11,00



Fonte: Anexo Especificação Técnica no. 155 – Postes de Concreto Armado e Protendido (2018, p. 7).

Segundo Queiroz (2011), as dimensões de uma seção qualquer do poste em uma altura z medida desde a base, pode ser calculada considerando sua seção transversal como mostra a Figura 18, pois a inclinação dos flanges na parte interna da seção é apenas um elemento construtivo e que facilita o processo de desforma.

Figura 18: Seção transversal do poste DT



Fonte: Queiroz (2011, p. 36)

O cálculo das dimensões B e D variando em função de uma altura z é feito por meio das seguintes equações:

$$B(z) = B_i - (B_i - B_f) \frac{z}{L} \quad (6)$$

$$D(z) = D_i - (D_i - D_f) \frac{z}{L} \quad (7)$$

Onde:

B_i : é a largura da seção da base;

B_f : é a largura da seção do topo;

D_i : é a altura da seção da base;

D_f : é a altura da seção do topo;

L : é o comprimento do poste.

Como mencionado anteriormente, para a realização da modelagem numérica dos postes foi utilizado o software SAP2000, que é baseado no método dos elementos finitos. Os postes são modelados com elementos sólidos, devido ao fato de ser uma estrutura de comprimento elevado e seção variável, deste modo é possível conhecer os deslocamentos ao longo do sistema.

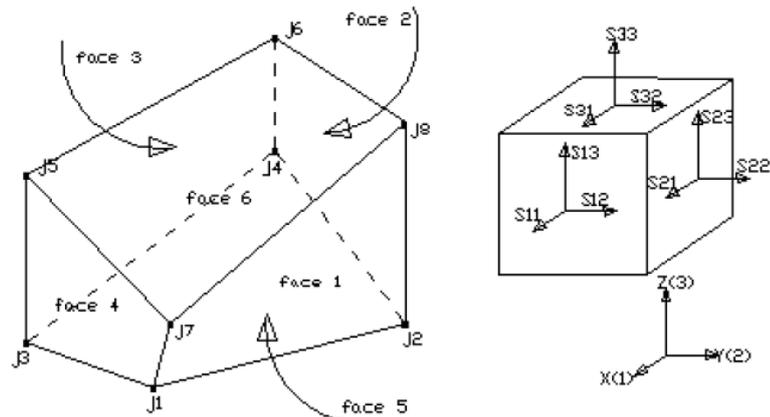
Estes elementos sólidos são elementos finitos de três dimensões, que, no caso da modelagem utilizada, possuem 8 nós, onde cada nó possui seis graus de liberdade (três translações e três rotações) no poste (Figura 19). A quantidade total de nós e elementos para cada poste está descrita na Tabela 2.

Tabela 2: Quantidade de nós e elementos nos postes modelados

Altura do Poste (m)	Número de Nós	Número de elementos
9	1125	596
10,5	1383	740

Fonte: elaborada pela autora.

Figura 19: Elemento sólido de oito nós e estado de tensão em um ponto em termos de suas componentes cartesianas nas faces de um cubo elementar.

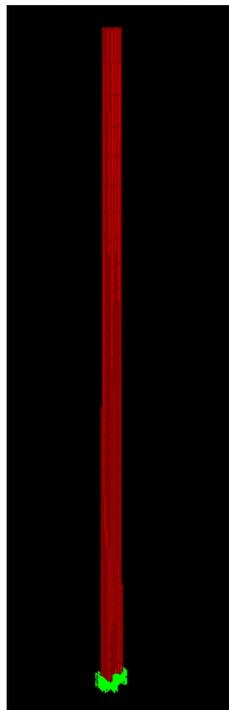


Fonte: Queiroz (2011, p. 39).

O poste é considerado como uma viga engastada na base, onde as cargas horizontais são transferidas para o topo do poste, como descrito no capítulo anterior, e aplicadas na face externa dos elementos sólidos (Figura 20). Já as cargas verticais, são aplicadas no topo do poste. Cada uma das cargas é dividida entre os nós no sistema.

No presente estudo, foi admitido um comportamento elástico-linear para a estrutura, considerando que a relação entre tensão e deformação é regida pela Lei de Hooke.

Figura 20: Modelagem do poste utilizando o método dos elementos finitos

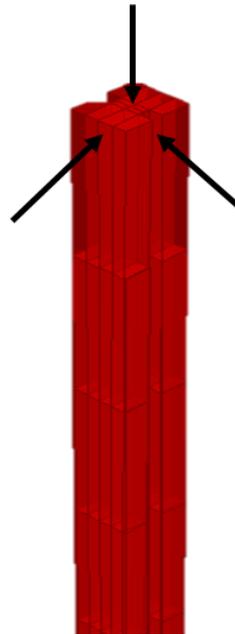


Fonte: elaborada pela autora.

Foram analisados postes de 9 m e de 10,5 m, considerando primeiramente apenas os equipamentos da RD (Rede de Distribuição) atuando nos mesmos e depois realizando um incremento de carga relativa à quantidade de cabos de TE presentes na estrutura. As cargas horizontais são aplicadas tanto na direção de face cheia do poste como na face vazada, de forma a mostrar as diferenças de comportamento da estrutura em cada situação (Figura 21). Além disso, 3 situações são avaliadas (Figura 22):

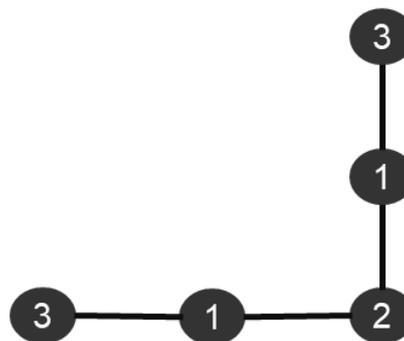
- Poste localizado entre vãos adjacentes (1)
- Poste localizado em uma esquina (2)
- Poste localizado no final da rede (3)

Figura 21: Aplicação de carga na estrutura



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 22: Cenário situação de posicionamento dos postes



Fonte: elaborado pela autora.

4.1.2 Parâmetros elétricos e de telecomunicações

A distribuição de energia elétrica BT é feita por quatro condutores de alumínio com as seguintes características:

- tipo: 3 x 150 + 1 x 180
- Diâmetro total: 37 mm;
- massa linear: 700 kg/km
- Capacidade de corrente: 136 A
- Tensão de projeto: 235 (daN) para o conjunto de cabos.

A distribuição de energia elétrica MT é feita por três condutores com 10,11 mm de diâmetro com as seguintes características:

- tipo: CAA – cabo de alumínio com alma de aço;
- nomenclatura: Raven;
- massa linear: 216,34 kg/km
- Capacidade de corrente: 242 A
- Tensão de projeto: 700 (daN) para o conjunto de cabos.

Foram consideradas ainda: cruzetas, isoladores roldanas, isoladores pinos e isoladores discos com os seguintes pesos descritos na Tabela 3.

Tabela 3: Componentes de redes de distribuição

Elemento	Peso (kg)
Isoladores Roldana	0,2
Isoladores de Pino	1,2
Isoladores de disco	2,1
Cruzeta de Concreto Armado Normal de 1900mm tipo "T"	40

Fonte: elaborada pela autora.

Além disso, para as redes de telecomunicação, também foram considerados atuantes nos postes os seguintes tipos de cabo, disponíveis nas Tabelas 4 e 5. Considerando os casos de maior sobrecarga, pois a partir da base de dados e das coletas de informação, não foi possível identificar a quantidade de fibras dos cabos de fibra óptica atuantes em cada poste.

Tabela 4: Dados de Rede Telecom Óptica

Telecom Rede Óptica			
Altura Poste (m)	Lance (m)	Número de Fibras	Valor da Tração (daN)
9	45	144	138
10	45	144	123
11	45	144	110

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 5: Dados de Rede Coaxial

Telecom Rede Coaxial	
Altura Poste (m)	Valor da Tração (daN)
9	92
10	92
11	92

Fonte: elaborada pela autora.

É importante ressaltar que a unidade decaNewton (daN) é uma unidade de força comumente utilizada pelos fabricantes e concessionárias de energia para indicar a carga nominal dos postes e conseguir classificá-los. Isso ocorre por ser uma unidade do Sistema Internacional (SI) que equivale a um quilograma-força (kgf), que também é uma unidade de força usualmente utilizada.

4.1.3 Condições de solicitação

Na condição de agentes externos, foi estabelecida a ação do vento atuando perpendicular aos cabos (pior situação) com distribuição uniforme ao longo de todo o vão e não foram consideradas variações térmicas.

A pressão dinâmica do vento atuante é calculada considerando os seguintes parâmetros tendo como referência a NBR 6123:

- $V_0 = 30\text{m/s}$ – é a velocidade básica do vento (valor retirado do mapa de isopleias apresentado na Figura 23);
- $S_1 = 1,00$ – para terrenos planos – fator que considera o relevo do terreno;
- $S_2 = 0,74$ – para terrenos categoria V e edificação classe A (valor retirado da

- Tabela 6) – fato que leva em consideração o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura e das dimensões da estrutura analisada;
- $S_3 = 0,95$ – para edificações com baixo teor de ocupação – fator que considera o grau de segurança e ocupação requerido durante a vida útil da estrutura.

Assim, a velocidade característica do vento, V_k , é dada por:

$$\begin{aligned} V_k &= V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 \\ V_k &= 30 \times 1 \times 0,74 \times 0,95 \\ V_k &= 21,09 \text{ m/s} = 75,92 \text{ km/h} \end{aligned} \quad (13)$$

E as pressões dinâmicas do vento para superfícies circulares e planas, respectivamente, são calculadas utilizando a equação descrita no Capítulo 3, conforme mostrado a seguir:

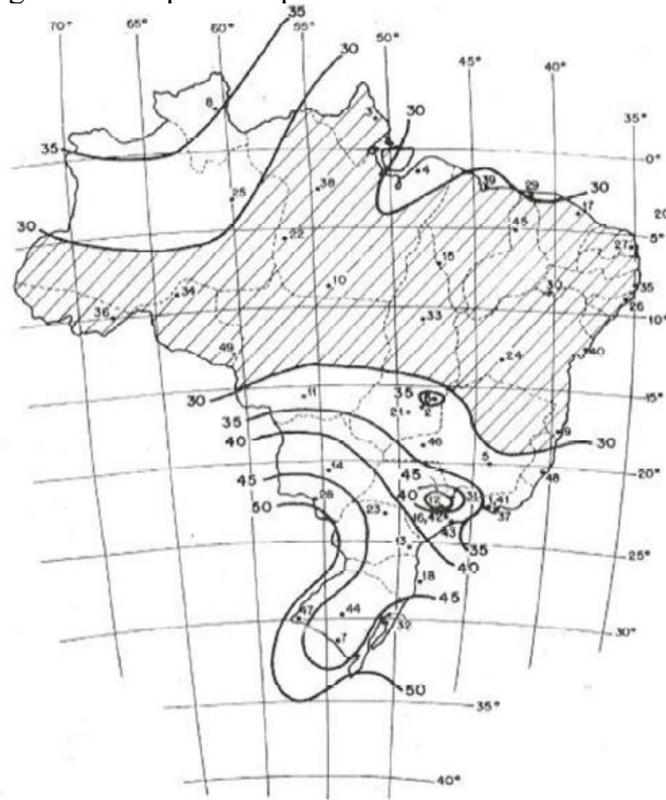
$$\begin{aligned} P_{vc} &= 0,00471 \times V_k^2 \\ P_{vc} &= 0,00471 \times 75,92^2 \\ P_{vc} &= 27,15 \text{ daN/m}^2 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} P_{vp} &= 0,00754 \times V_k^2 \\ P_{vp} &= 0,00754 \times 75,92^2 \\ P_{vp} &= 42,66 \text{ daN/m}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

4.1.4 Condições de contorno

Os postes de concreto armado são considerados engastados no solo (Figura 11), cujo comprimento de engaste é dado pela Equação (1). Assim, L irá variar de acordo com a altura escolhida (entre 9 m e 10,5 m). Para o poste de 9 m de comprimento nominal, sua altura útil é 7,5 m e para o poste de 10,5 m de comprimento nominal, sua altura útil é 8,85 m.

Figura 23: Mapa de isopletas de velocidade básica do vento



Fonte: ABNT NBR 6123 (1988, p. 6).

Tabela 6: Fator de cálculo S₂

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

Fonte: ABNT NBR 6123 (1988, com adaptações).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Cálculo das cargas atuantes

A primeira parte executada para obtenção dos resultados do presente trabalho foi a determinação e análise das cargas atuantes consideradas nos postes DT tipo D, considerando variação na sua altura. Para isso, foram levantados os seguintes geradores de esforços (Tabela 7) nos postes para cada tipo de situação proposta (vãos adjacentes, final de linha e esquina):

Tabela 7: Elementos geradores de esforços nos postes

Altura	Tipo de rede	Elementos Constituintes	Quantidade
9 m	Rede secundária (BT)	Cabos de Alumínio multiplexado (AM)	4
		Isoladores Roldana	8
	Rede de Telecomunicações	Cabos para prestadoras de serviços	6
10,5 m	Rede secundária (BT)	Cabos de Alumínio multiplexado (AM)	4
		Isoladores Roldana	8
	Rede de Telecomunicações	Cabos para prestadoras de serviços	6
	Rede primária (MT)	Cabos de Alumínio Nu com Alma de Aço (CAA) - MT	3
		Cruzeta de Concreto Armado Comum	1
Isoladores de Pino		3	
10,5 m *fim de rede	Rede secundária (BT)	Cabos de Alumínio multiplexado (AM)	4
		Isoladores Roldana	8
	Rede de Telecomunicações	Cabos para prestadoras de serviços	6
	Rede primária (MT)	Cabos de Alumínio Nu com Alma de Aço (CAA) - MT	3
		Cruzeta de Concreto Armado Comum	2
Isoladores de disco		6	

Fonte: elaborada pela autora.

Assim, para cada caso, foram calculados os esforços horizontais, considerando o efeito do vento, e verticais atuantes nas estruturas conforme a fundamentação teórica descrita no Capítulo 3. Além disso, foram considerados os seguintes parâmetros:

- Situacionais
 - Poste localizado entre vãos adjacentes.
 - Poste localizado em uma esquina.
 - Poste localizado no final da linha de distribuição.

- De carregamento
 - Poste apenas com os equipamentos de RD.
 - Poste com a adição de 6 cabos de telecomunicação (3 de fibra óptica e 3 coaxiais) – situação dentro da norma de infraestrutura compartilhada totalizando 6 pontos de fixação.
 - Poste com a adição de 16 cabos de telecomunicação (8 de fibra óptica e 8 coaxiais) – situação mais crítica encontrada durante a coleta de dados.

5.1.1 Postes de 9 m

Para os postes de 9 m, foram obtidas as cargas verticais e horizontais, as quais são mostradas na Tabela 8 e Tabela 9, respectivamente. Pode-se observar que, em relação às cargas verticais, a adição dos cabos das redes de TE provocam um acréscimo de carga de 23% para o caso regular com 6 cabos de infraestrutura compartilhada e de 60% para a adição de 16 cabos.

Tabela 8: Cargas verticais para poste de 9 m

Situação	Condição	Carga (kN)
Entre vãos adjacentes	Equipamentos da RD	5,36
	Adição de 6 cabos de TE	6,57
	Adição de 16 cabos de TE	8,58
Fim de linha	Equipamentos da RD	5,05
	Adição de 6 cabos de TE	5,66
	Adição de 16 cabos de TE	6,66
Esquina	Equipamentos da RD	5,36
	Adição de 6 cabos de TE	6,57
	Adição de 16 cabos de TE	8,58

Fonte: elaborada pela autora.

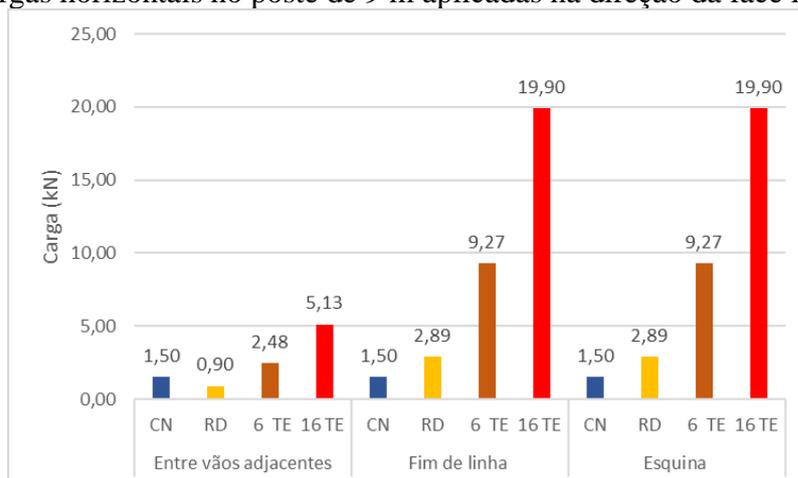
Tabela 9: Cargas horizontais para poste de 9 m

Situação	Condição	Carga (kN)	
		Face lisa	Face vazada
Entre vãos adjacentes	Equipamentos da RD	0,90	0,94
	Adição de 6 cabos de TE	2,48	2,53
	Adição de 16 cabos de TE	5,13	3,06
Fim de linha	Equipamentos da RD	2,89	2,94
	Adição de 6 cabos de TE	9,27	9,32
	Adição de 16 cabos de TE	19,90	19,95
Esquina	Equipamentos da RD	2,89	2,94
	Adição de 6 cabos de TE	9,27	9,32
	Adição de 16 cabos de TE	19,90	19,95

Fonte: elaborada pela autora.

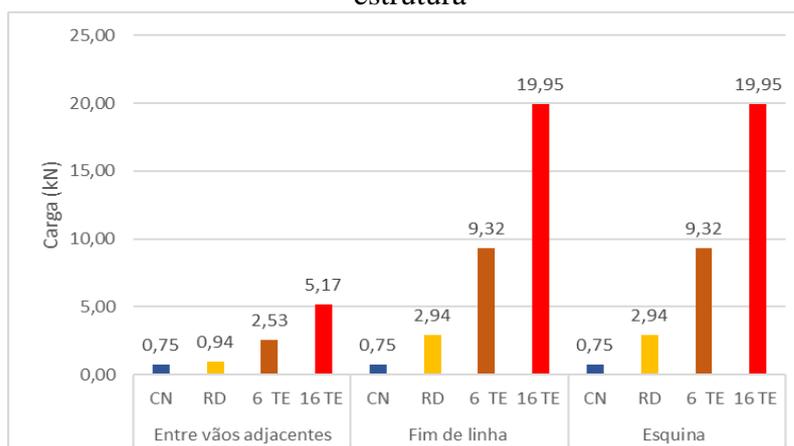
Já analisando as cargas horizontais, verifica-se que, considerando um poste DT tipo D, apenas a situação entre vãos adjacentes e considerando somente a carga de equipamentos de RD aplicada na face lisa do poste, apresenta esforços adequados, não superando a carga nominal da estrutura (1,5 kN para face lisa e 0,75 kN para face vazada) como se pode ver no Gráfico 1 e Gráfico 2.

Gráfico 1: Cargas horizontais no poste de 9 m aplicadas na direção da face lisa da estrutura



Fonte: elaborado pela autora.

Gráfico 2: Cargas horizontais no poste de 9 m aplicadas na direção da face vazada da estrutura



Fonte: elaborado pela autora.

Além disso, é possível perceber que há pouca variação de carga quando comparadas as seções lisas e vazadas, mas que, se comparadas as situações de fim de linha e esquina com a de vãos adjacentes, as primeiras apresentam uma situação muito mais sobrecarregada devido a ação de tração dos cabos.

5.1.2 Postes de 10,5 m

Para os postes de 10,5 m, também foram obtidas as cargas verticais e horizontais, as quais são mostradas na Tabela 10 e Tabela 11, respectivamente. Em relação às cargas verticais, a adição dos cabos das redes de TE provocam um acréscimo de carga de em média 14% para o caso regular com 6 cabos de infraestrutura compartilhada e 38% para a adição de 16 cabos.

Tabela 10: Cargas verticais para poste de 10,5 m

Situação	Condição	Carga (kN)
Entre vãos adjacentes	Equipamentos da RD	8,45
	Adição de 6 cabos de TE	9,66
	Adição de 16 cabos de TE	11,67
Fim de linha	Equipamentos da RD	8,33
	Adição de 6 cabos de TE	8,94
	Adição de 16 cabos de TE	9,94
Esquina	Equipamentos da RD	8,45
	Adição de 6 cabos de TE	9,66
	Adição de 16 cabos de TE	11,67

Fonte: elaborada pela autora.

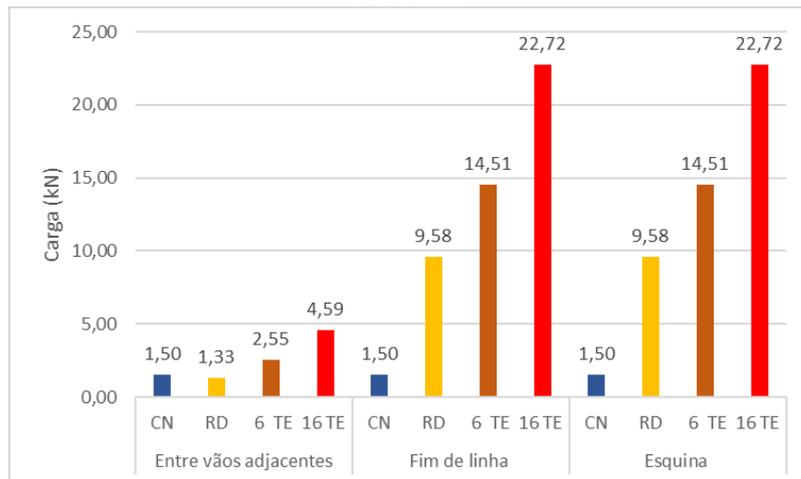
Tabela 11: Cargas horizontais para poste de 10,5 m

Situação	Condição	Carga (kN)	
		Face lisa	Face vazada
Entre vãos adjacentes	Equipamentos da RD	1,33	1,38
	Adição de 6 cabos de TE	2,55	2,60
	Adição de 16 cabos de TE	4,59	4,64
Fim de linha	Equipamentos da RD	9,58	9,63
	Adição de 6 cabos de TE	14,51	14,55
	Adição de 16 cabos de TE	22,72	22,77
Esquina	Equipamentos da RD	9,58	9,63
	Adição de 6 cabos de TE	14,51	14,55
	Adição de 16 cabos de TE	22,72	22,77

Fonte: elaborada pela autora.

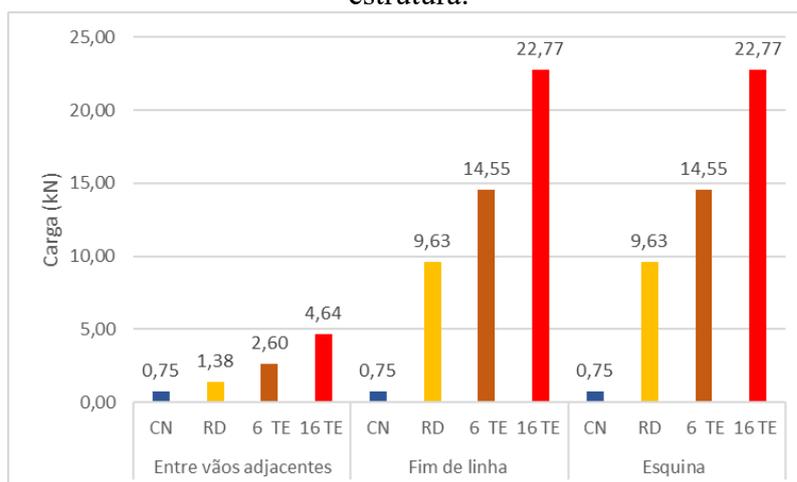
Analisando as cargas horizontais, verifica-se que, assim como para o poste de 9 m, considerando um poste DT tipo D, apenas a situação entre vãos adjacentes e considerando a carga de equipamentos de RD aplicada na face lisa do poste, estaria adequada não superando a carga nominal (1,5 kN para face lisa e 0,75 kN para face vazada) da estrutura como mostrado nos gráficos 3 e 4.

Gráfico 3: Cargas horizontais no poste de 10,5 m aplicadas na direção da face lisa da estrutura.



Fonte: elaborado pela autora.

Gráfico 4: Cargas horizontais no poste de 10,5 m aplicadas na direção da face vazada da estrutura.



Fonte: elaborado pela autora.

Como observado para o poste de 9 m, as cargas para o poste de 10,5 m também não variam muito de uma seção para a outra, mas quando comparadas as 3 situações, os postes de fim de linha e esquina apresentam-se muito mais sobrecarregados.

5.2 Resultados das simulações

Para a realização das simulações e posterior análise dos deslocamentos e tensões, foi utilizada a modelagem numérica dos postes como descrito no Capítulo 4. Foram consideradas as cargas horizontais (resultantes das trações exercidas pelos cabos e do efeito do vento nos condutores e na estrutura) e as cargas verticais (resultantes dos pesos dos equipamentos da rede elétrica e de telecomunicações) utilizando os valores apresentados no item anterior.

Para o poste tipo D modelado como elemento sólido foram considerados os valores de peso específico (γ), módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν) e resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) cujos valores adotados estão descritos na Tabela 12.

Tabela 12: Características material modelagem

Material	γ (kN/mm ³)	E (kN/mm ²)	ν	f_{ck} (MPa)
Concreto	$2,453 \times 10^{-08}$	28	0,3	25

Fonte: elaborada pela autora.

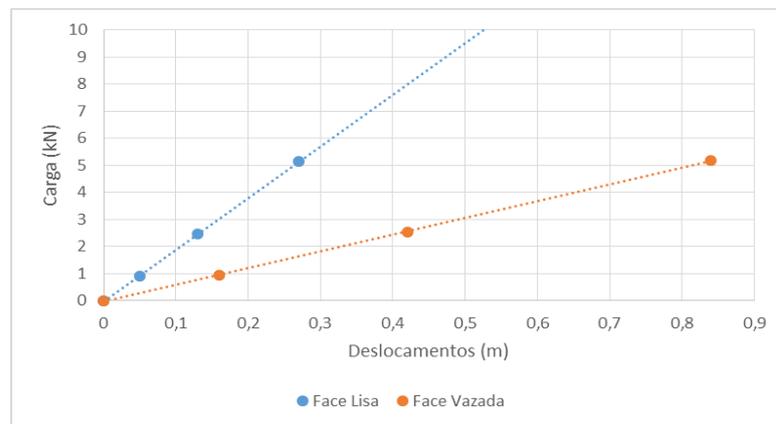
O módulo de elasticidade do concreto foi determinado utilizando a equação fornecida pela ABNT NBR 6118 (2014), expressa como:

$$E_c = \alpha_e 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (16)$$

Onde o coeficiente α_e , neste caso, foi escolhido como sendo igual à 1, considerando agregados de granito ou gnaíse que são os mais utilizados na região de Fortaleza.

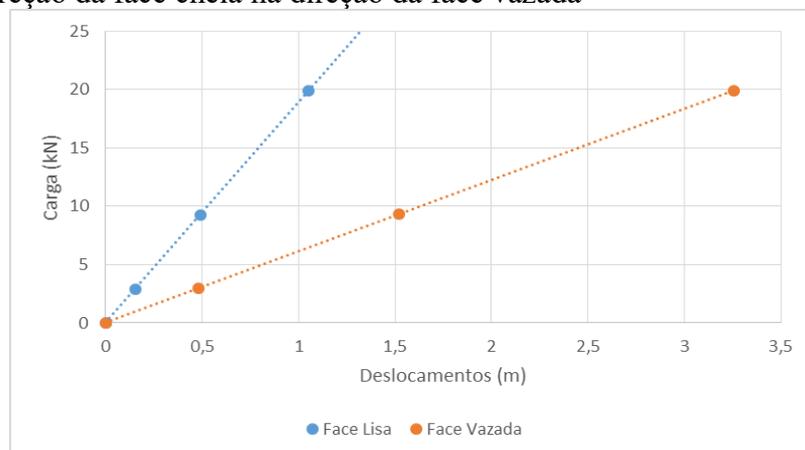
Os resultados de deslocamentos horizontais obtidos por meio da modelagem numérica estão apresentados nos Gráficos 5 a 8, para cada poste respectivamente. As curvas carga-deslocamento foram obtidas considerando os resultados do ponto central da seção transversal do topo do poste (nó n° 367).

Gráfico 5: Carga-deslocamento para poste de 9 m entre vãos adjacentes, com cargas aplicadas na direção da face cheia e na direção da face vazada



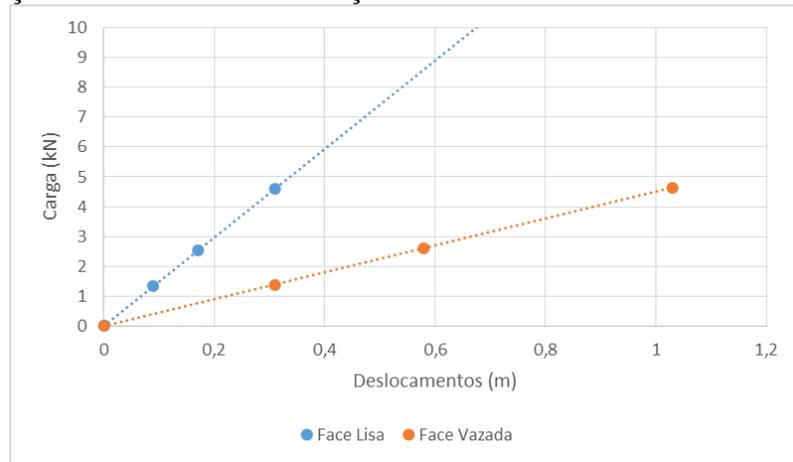
Fonte: elaborado pela autora.

Gráfico 6: Carga-deslocamento para poste de 9 m no final da linha e em esquina, com cargas aplicadas na direção da face cheia na direção da face vazada



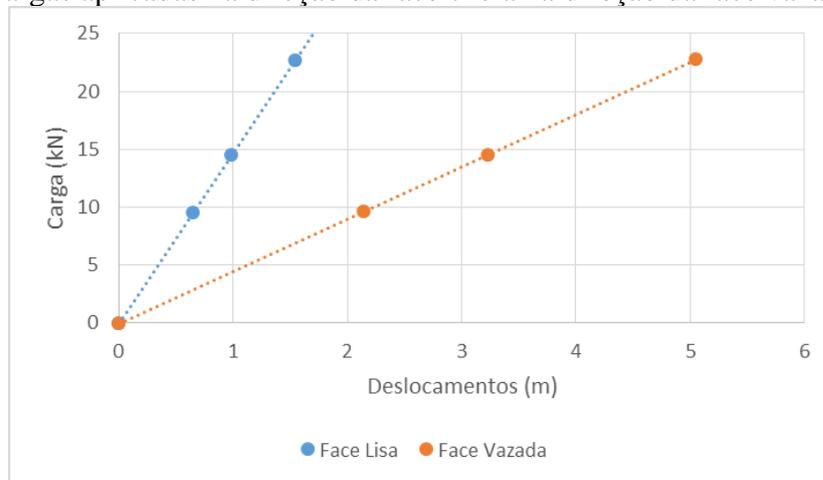
Fonte: elaborado pela autora.

Gráfico 7: Carga-deslocamento para poste de 10,5 m entre vãos adjacentes, com cargas aplicadas na direção da face cheia e na direção da face vazada



Fonte: elaborado pela autora.

Gráfico 8: Carga-deslocamento para poste de 10,5 m no final da linha e em esquina, com cargas aplicadas na direção da face cheia na direção da face vazada



Fonte: elaborado pela autora.

A partir da observação dos gráficos, destaca-se a tendência de linearidade deles, validando a premissa assumida de que o material tem um comportamento linear está adequada. Os deslocamentos máximos obtidos são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Deslocamentos máximos obtidos pela simulação numérica

Comprimento nominal do poste (m)	Situação	Condição	Deslocamentos (m)	
			Face lisa	Face vazada
9	Entre vãos adjacentes	Equipamentos da RD	0,05	0,16
		Adição de 6 cabos de TE	0,13	0,42
		Adição de 16 cabos de TE	0,27	0,84

Comprimento nominal do poste (m)	Situação	Condição	Deslocamentos (m)	
			Face lisa	Face vazada
9	Fim de linha	Equipamentos da RD	0,15	0,48
		Adição de 6 cabos de TE	0,49	1,52
		Adição de 16 cabos de TE	1,05	3,26
	Esquina	Equipamentos da RD	0,15	0,48
		Adição de 6 cabos de TE	0,49	1,52
		Adição de 16 cabos de TE	1,05	3,26
10,5	Entre vãos adjacentes	Equipamentos da RD	0,09	0,31
		Adição de 6 cabos de TE	0,17	0,58
		Adição de 16 cabos de TE	0,31	1,03
	Fim de linha	Equipamentos da RD	0,65	2,14
		Adição de 6 cabos de TE	0,98	3,23
		Adição de 16 cabos de TE	1,54	5,05
	Esquina	Equipamentos da RD	0,65	2,14
		Adição de 6 cabos de TE	0,98	3,23
		Adição de 16 cabos de TE	1,54	5,05

Fonte: elaborada pela autora.

De acordo com os requisitos permitidos pela norma ABNT NBR 8451:2011, o deslocamento máximo deve ser até 5% do comprimento nominal (0,45 m para o poste de 9 m e 0,525 m para o poste de 10,5 m), quando a força for aplicada na direção de menor resistência no poste de seção duplo “T” e até 3,5% do comprimento nominal (0,315 m para o poste de 9 m e 0,3675 m para o poste de 10,5 m) para as demais situações. A grande maioria dos casos analisados, apresentou flechas acima do limite permitido pela norma, evidenciando os grandes esforços de flexão aos quais as estruturas estariam sendo submetidas.

Ainda assim, foi possível perceber que, para os postes de 9 m, o poste apresentou deslocamentos abaixo do máximo permitido pela norma considerando a situação de vãos adjacentes (com exceção da situação onde a carga de 16 cabos de TE é aplicada na face vazada do poste) e, considerando a ação da carga dos equipamentos de RD em situação de fim de linha e em situação de esquina (neste caso, apenas para a face lisa).

O poste de 10,5 m não obteve resultados tão favoráveis, apenas apresentando resultados abaixo do limite nas situações entre vãos adjacentes com carga aplicada na face lisa e apenas com a carga dos equipamentos de RD aplicados na face vazada.

Dessa forma, pela comparação dos resultados de deslocamentos dos postes, é possível visualizar que a aplicação de carga na face lisa gera menores deslocamentos, assim como postes de esquina ou fim de rede apresentam deslocamentos bem maiores se comparados

aos de vãos adjacentes.

As imagens das estruturas deformadas obtidas através das simulações numéricas podem ser observadas no Apêndice A.

Para efeito da verificação da resistência do poste, foram analisadas as tensões máximas obtidas durante as simulações, esses resultados podem ser verificados na Tabela 14.

Tabela 14: Tensões máximas obtidas nas simulações

Comprimento nominal do poste (m)	Situação	Condição	Tensões (MPa)	
			Face lisa	Face vazada
9	Entre vãos adjacentes	Equipamentos da RD	4,9	12
		Adição de 6 cabos de TE	14	33
		Adição de 16 cabos de TE	28	66
	Fim de linha	Equipamentos da RD	14.4	39
		Adição de 6 cabos de TE	45	120
		Adição de 16 cabos de TE	96	270
	Esquina	Equipamentos da RD	51	
		Adição de 6 cabos de TE	168	
		Adição de 16 cabos de TE	360	
10,5	Entre vãos adjacentes	Equipamentos da RD	7	21
		Adição de 6 cabos de TE	14	38,5
		Adição de 16 cabos de TE	24	60
	Fim de linha	Equipamentos da RD	52,5	132
		Adição de 6 cabos de TE	72	210
		Adição de 16 cabos de TE	108	300
	Esquina	Equipamentos da RD	168	
		Adição de 6 cabos de TE	270	
		Adição de 16 cabos de TE	390	

Fonte: elaborada pela autora.

A partir dos dados apresentados na tabela, é possível perceber que, da mesma forma como os deslocamentos, a maioria das tensões máximas atuantes na estrutura apresentam-se superiores à resistência à compressão do concreto utilizado (25 MPa). Ainda, é possível fazer uma comparação e perceber que: as mesmas situações que apresentaram deslocamentos acima do máximo permitido, também apresentaram tensões superiores à suportada pela estrutura.

As imagens das tensões nas bases dos postes analisados encontram-se no Apêndice B.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho tem como objetivo investigar o comportamento estrutural, de forma estática, de postes de concreto armado utilizados em linhas de distribuição de energia elétrica devido a ação de cabos. Para isso, foram analisados numericamente postes com seção Duplo T (sendo estes os mais utilizados atualmente) tipo “D”, considerando as cargas atuantes nesse tipo de estrutura tanto devido a equipamentos de RD, bem como os cabos de infraestrutura compartilhada, ainda considerando a ação do vento nos condutores e na estrutura.

Foram analisados 3 estados de carregamento:

- Apenas cargas provenientes de equipamentos de RD.
- Cargas provenientes de equipamentos de RD + Cargas de 6 cabos de TE.
- Cargas provenientes de equipamentos de RD + Cargas de 16 cabos de TE. (Caso mais crítico encontrado).

A partir da análise dos resultados, pôde-se avaliar o desempenho do poste em cada uma das três situações propostas (vãos adjacentes, fim de linha e esquina) mostrando o comportamento do suporte quando submetido ao acréscimo de cargas verticais e horizontais (atuando em ambas as faces do elemento).

A variação de carga permitiu evidenciar como o crescente uso dos postes como infraestrutura compartilhada, tem provocado uma sobrecarga devido aos efeitos de flexão atuantes, provocando deslocamentos superiores aos permitidos pelas normas. Também foi possível verificar que as tensões máximas geradas eram, em sua maioria, superiores a resistência à compressão do concreto utilizado.

Além disso, a partir das análises situacionais foi possível constatar que, como os postes de vão adjacentes encontram-se em uma situação onde as tensões de tração dos cabos encontram-se compensadas, os mesmos apresentam resultados mais favoráveis e dentro dos limites permitidos, mesmo com a intensificação da presença de cabos. Já os postes localizados em esquinas, apresentam os piores resultados mostrando a necessidade de reforço.

De maneira geral, foi possível perceber que os postes em situação de fim de linha e de esquina realmente necessitam um reforço maior na estrutura por estarem expostos a esforços de tração mais elevados, fato que pode ser observado tanto no levantamento das cargas atuantes como também pela análise dos gráficos carga-deslocamento.

Por esta pesquisa, pode-se verificar que os postes de seção duplo T tipo D não são adequados para a utilização como infraestrutura compartilhada nas situações propostas, mas que, estruturas como estais podem ser utilizadas com o objetivo de absorver parte dos esforços.

O presente trabalho mostrou resultados bastante significativos para o melhor entendimento do comportamento dos postes de concreto armado como estrutura utilizada pelas distribuidoras de energia e empresas prestadoras de serviços de telecomunicação.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

São propostas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar uma análise com os postes de tipo B existentes.
- Realizar uma análise dinâmica da estrutura.
- Avaliar os tipos de fundações utilizadas para postes de concreto armado.
- Avaliar o impacto da utilização dos diferentes tipos de cabos existentes.
- Modelar a armadura e a relação constitutiva não linear.
- Usar, de forma aproximada, reduções na rigidez.
- Avaliar os possíveis efeitos de torção atuantes nos postes.

REFERÊNCIAS

ABREU, Raquel Colares; ARAUJO, Tereza Denyse Pereira de. **Impacto frontal de veículos em poste de concreto armado**. In: IBERO-LATIN AMERICAN CONGRESS OF COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 36., 2015, Rio de Janeiro. Proceedings... Rio de Janeiro: Abmec, 2015. p. 1 - 19.

AES ELETROPAULO. RT-2003: **Dimensionamento de poste de concreto com seção circular utilizado em rede de distribuição**. São Paulo, 2003.

ALAM, Md. Morshedul; TOKGOZ, Berna Eren; HWANG, Scokyon. **Framework for measuring the resilience of utility poles of an electric power distribution network**. International Journal Of Disaster Risk Science. Beijing, p. 270-281. jun. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5422: **Projeto de redes aéreas de transmissão de energia elétrica**. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto: Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: **Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8451_2: **Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e transmissão de energia elétrica: Padronização de postes para redes de distribuição de energia elétrica**. Rio de Janeiro, 2013.

BANDOS, Melissa Franchini Cavalcanti. **Análise dos conflitos, das negociações e dos contratos gerados pelo compartilhamento de infra-estrutura entre as empresas reguladas pelas agências ANEEL, ANATEL e ANP**. 2008. 188 f. Tese (Doutorado) - Curso de Administração, Departamento de Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BENECASE, Paulo Ferreira; VANDERLEI, Romel Dias. **Análise do comportamento estrutural de postes de concreto armado utilizados em linhas de distribuição de energia elétrica**. In: SEMINÁRIO SOBRE INOVAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL, 2., 2015, Maringá. Anais... Maringá: 2015. p. 1 - 7.

BENENCASE, Paulo Ferreira. **Análise do comportamento estrutural de postes de concreto armado utilizados em linhas de transmissão de energia elétrica**. 2015. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.

BRASIL. Resolução Conjunta nº 1, de 24 de novembro de 1999. **Regulamento Conjunto Para Compartilhamento de Infra-estrutura Entre Os Setores de Energia Elétrica, Telecomunicações e Petróleo**. 1. ed. v. 1, n. 1.

BRITO, Leonardo C. et al. **Método computacional para o dimensionamento mecânico de linhas aéreas rurais de distribuição de energia elétrica**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 49., 2017, Blumenau. Anais... . Blumenau: ., 2017. p. 1 - 10.

CARVALHO, Hermes. **Avaliação dos efeitos de vento em linhas de transmissão**. 2015. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

Diário de Pernambuco. **Anatel e Aneel decidem rever regras de compartilhamento de postes**. 2018. Disponível em:

<<https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/brasil/2018/09/anatel-e-aneel-decidem-rever-regras-de-compartilhamento-de-postes.html>>. Acesso em: 26 set. 2018.

ENEL. ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA NO. 115: **Cruzeta de concreto armado e protendido para rede de distribuição e linha de distribuição de alta tensão**. Rio de Janeiro, 2018.

ENEL. ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA NO. 115: **Postes de concreto armado e protendido**. Rio de Janeiro, 2018.

ENEL. ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA NO. 278: **Compartilhamento de Infraestrutura de linha de distribuição aérea com infraestrutura de telecomunicações**. Rio de Janeiro, 2019.

ENEL. ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA NO. 285: **Crítérios de projetos de redes de distribuição aéreas de média e baixa tensão**. Rio de Janeiro, 2019.

ENEL. ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA NO. 40: **Transformadores**. Rio de Janeiro, 2019.

ENEL. ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA NO. 48: **Isoladores e Acessórios**. Rio de Janeiro, 2019.

FERREIRA, J. D. **Postes de concreto armado**. Especificação técnica ET-300/2009 R-04J. COELCE, 2009.

KHALILI, S. M. R.; SABOORI, B. **Transient dynamic analysis of tapered FRP composite transmission poles using finite element method**. *Composite Structures*, 92, pp. 275–283, 2010.

KHALILI, S. M. R.; SABOORI, B. **Transient dynamic analysis of tapered FRP composite transmission poles using finite element method**. *Composite Structures*, 92, pp. 275–283, 2010.

MILISENNA, Giuseppe. **ESSS: Método dos Elementos Finitos: o que é?**. 2016. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em: 04 jun. 2019.

PIRES, Eric Prouvot Avila. **Projeto mecânico de um suporte de linha aérea de transmissão de energia elétrica**. 2017. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

PRAVIA, Zacarias M. Chamberlain; DREHMER, Gilnei Artur. **Estruturas de Aço**. Passo Fundo: Grupo de Pesquisa: Análise e Experimentação de Estruturas Metálicas e de Madeira(ae2m2), 2004.

PRAZERES, Romildo Alves dos. **Compartilhamento da Infra-estrutura Poste após a universalização**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 17., 2006, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: 2006. p. 1 - 10.

PROCEDIMENTO TÉCNICO LIGHT. PTL0426DT/18-R0: **Dimensionamento de postes para redes de distribuição aérea de energia elétrica**. Rio de Janeiro, 2018.

QUEIROZ, Janiel Silva de. **Análise transiente paramétrica de sistema poste-defensa devido ao choque de veículos**. 2011. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

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

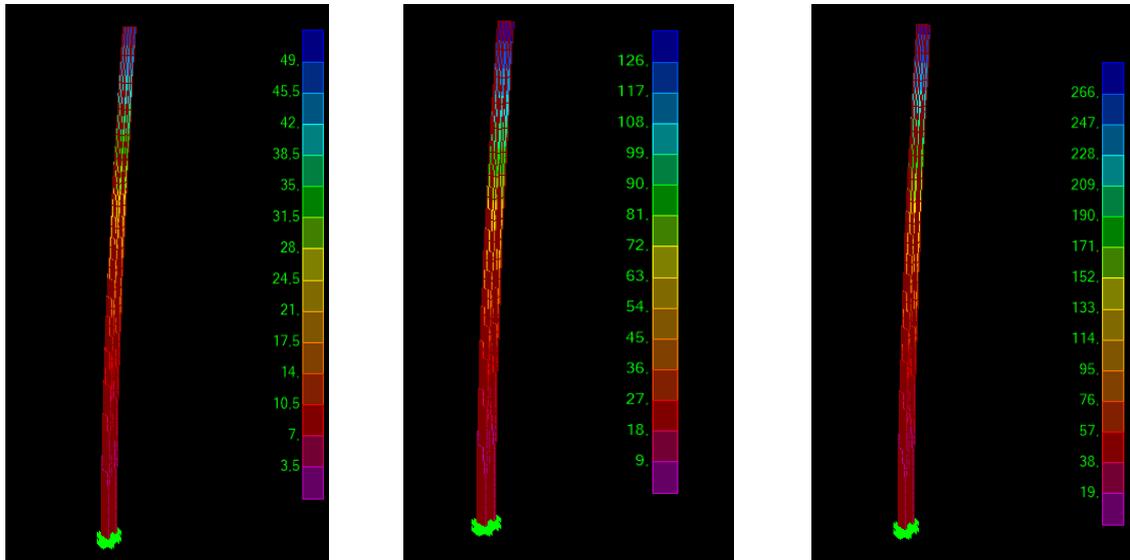
VISCOVINI, Ronaldo Celso et al. Maquete didática de um sistema trifásico de corrente alternada com Arduino: ensinando sobre a rede elétrica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**. Florianópolis, dez. 2015. p. 856-869.

WAHRHAFTIG, Alexandre de M.; BRASIL, Reyolando M.l.r.f.; SILVA, Marcelo A.da. **Influência da rigidez geométrica na resposta dinâmica de um poste de telefonia celular sob carregamento de vento**. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 33., 2008, Santiago. Anais... Santiago: Asae, 2008. p. 1 - 11.

ZEYNALIAN, Mehran; KHORASGANI, Mehrdad Zamani. **Structural performance of concrete poles used in electric power distribution network**. Elsevier. Isfahan, p. 863-876. 05 fev. 2018.

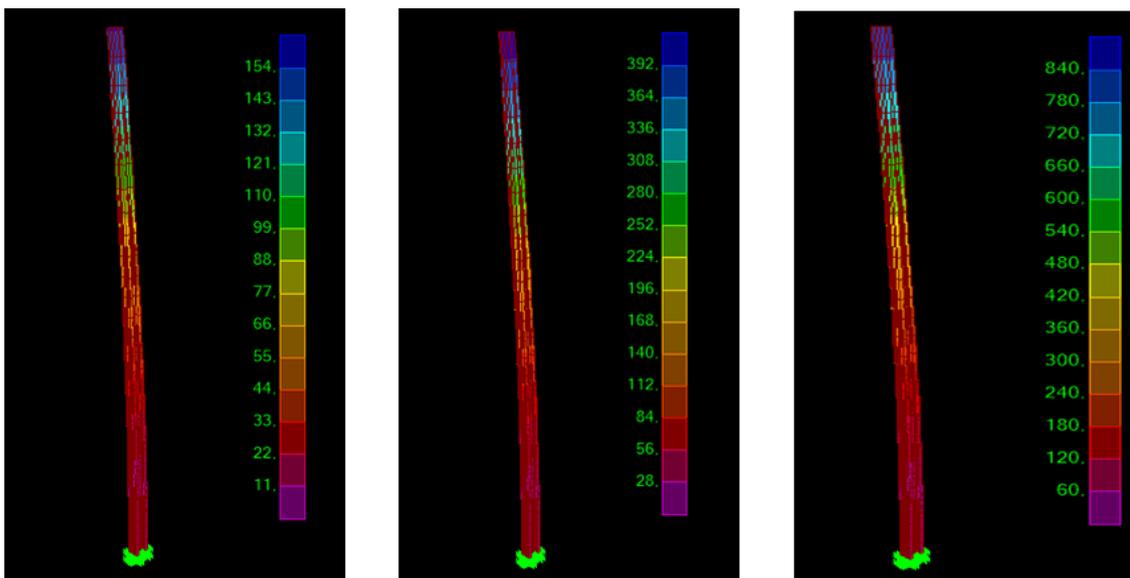
APÊNDICE A – DEFORMADAS DOS POSTES

Deformadas (mm) postes de 9 m situado entre vãos adjacentes com cargas aplicadas na seção lisa, considerando as 3 situações de acréscimo de carga horizontal



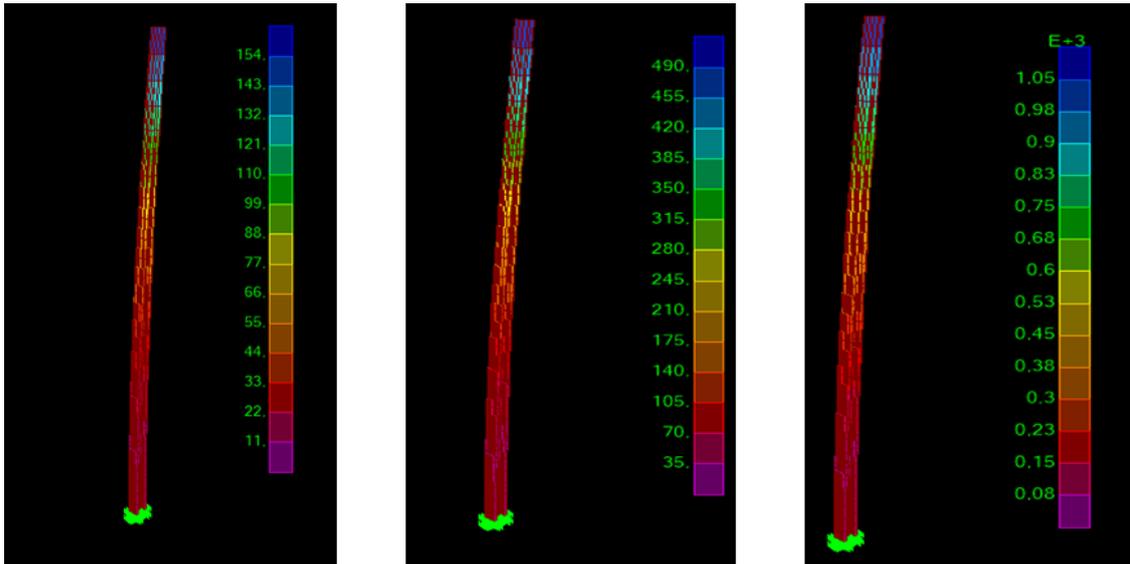
Fonte: elaborada pela autora.

Deformadas (mm) postes de 9 m situado entre vãos adjacentes com cargas aplicadas na seção vazada, considerando as 3 situações de acréscimo de carga horizontal



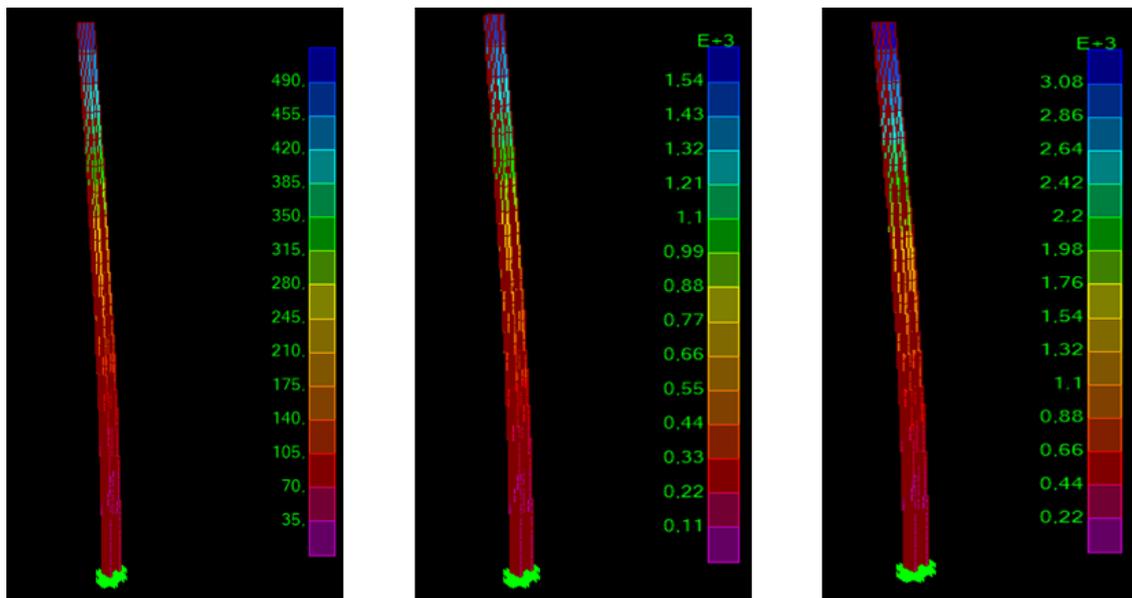
Fonte: elaborada pela autora.

Deformadas (mm) postes de 9 m situado no final da linha com cargas aplicadas na seção lisa, considerando as 3 situações de acréscimo de carga horizontal



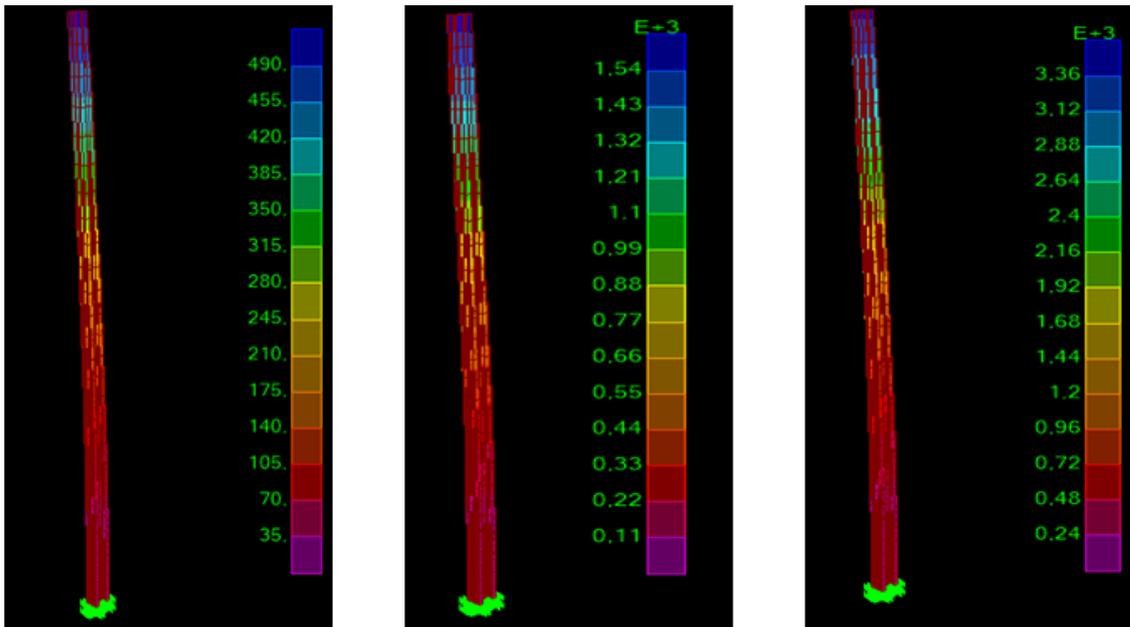
Fonte: elaborada pela autora.

Deformadas (mm) postes de 9 m situado no final da linha com cargas aplicadas na seção vazada, considerando as 3 situações de acréscimo de carga horizontal



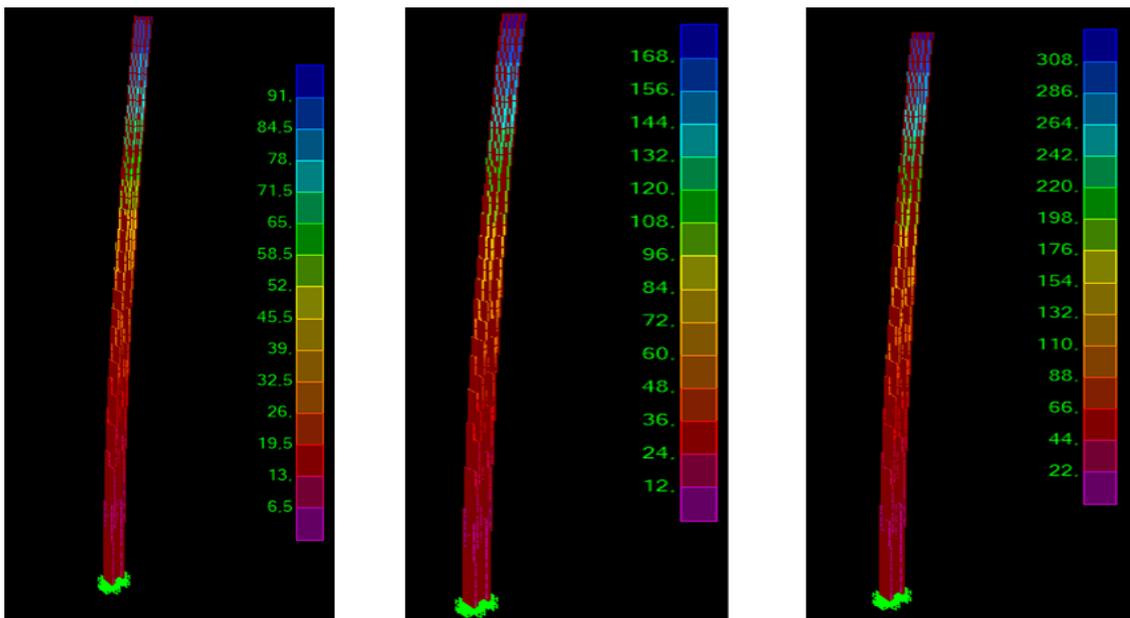
Fonte: elaborada pela autora.

Deformadas (mm) postes de 9 m situado em uma esquina com cargas aplicadas em ambas as seções, considerando as 3 situações de acréscimo de carga horizontal



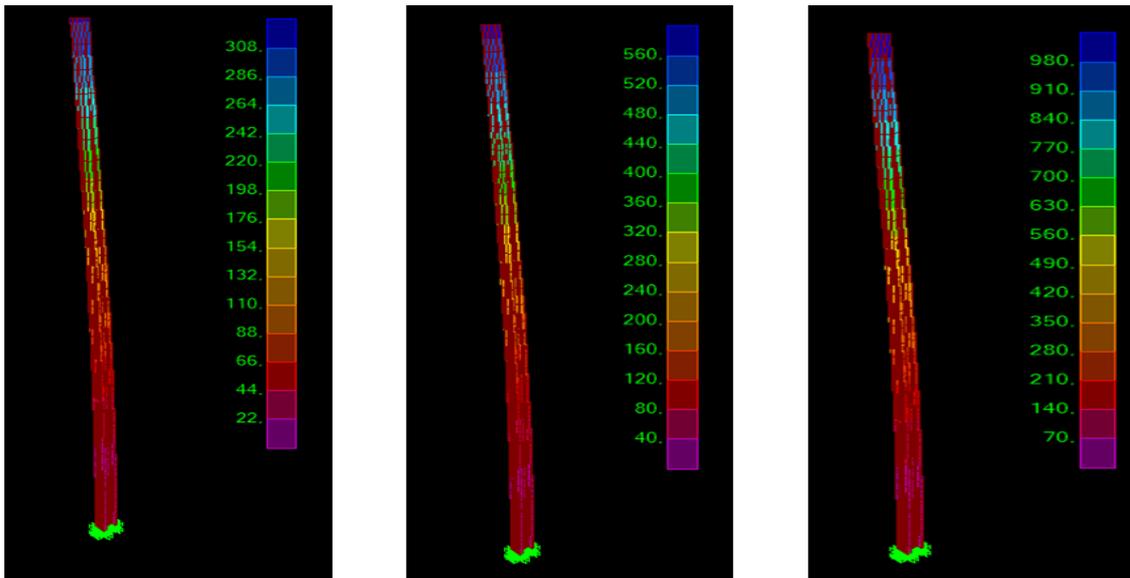
Fonte: elaborada pela autora.

Deformadas (mm) postes de 10,5 m situado entre vãos adjacentes com cargas aplicadas na seção lisa, considerando as 3 situações de acréscimo de carga horizontal



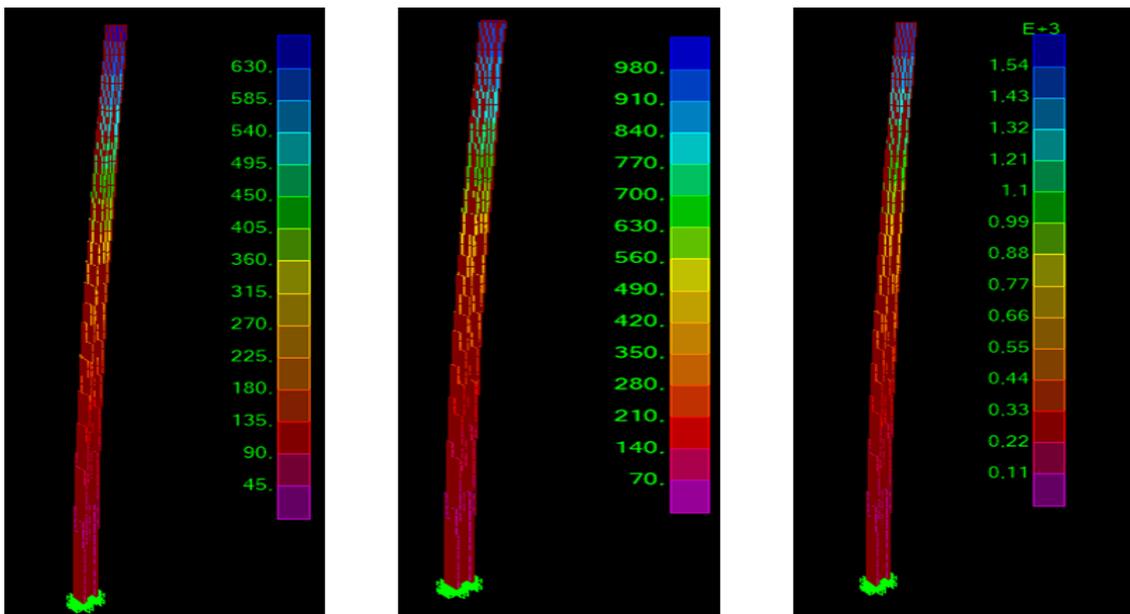
Fonte: elaborada pela autora.

Deformadas (mm) postes de 10,5 m situado entre vãos adjacentes com cargas aplicadas na seção vazada, considerando as 3 situações de acréscimo de carga horizontal



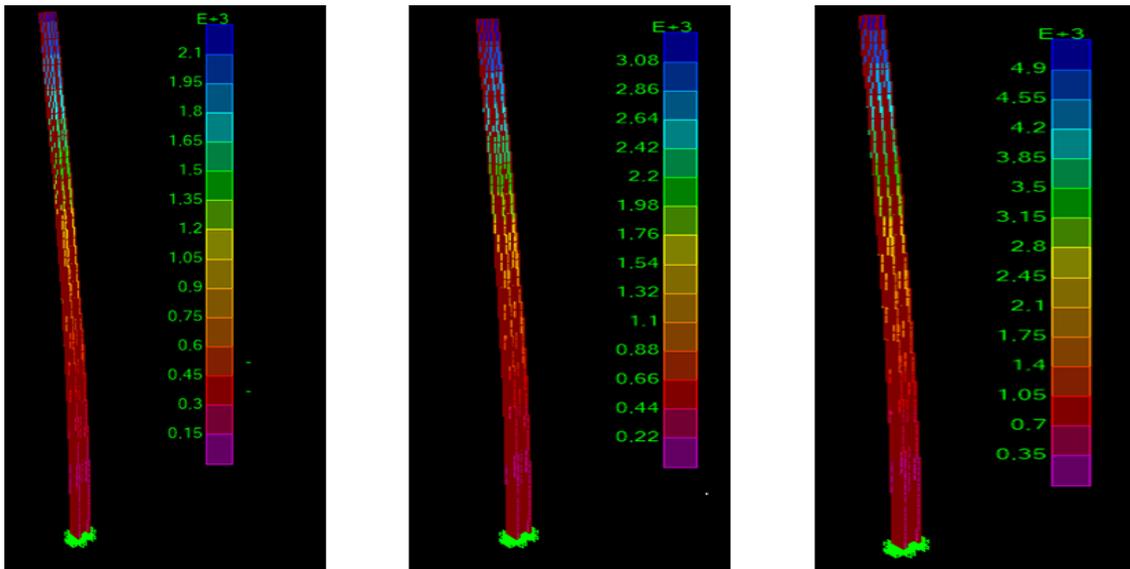
Fonte: elaborada pela autora.

Deformadas (mm) postes de 10,5 m situado no final da linha com cargas aplicadas na seção lisa, considerando as 3 situações de acréscimo de carga horizontal



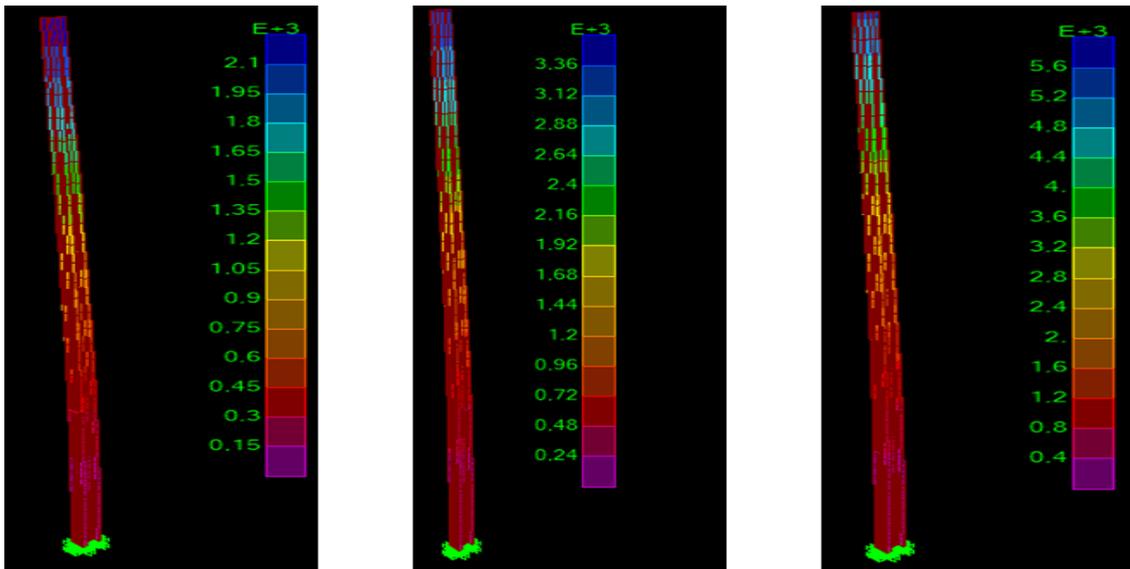
Fonte: elaborada pela autora.

Deformadas (mm) postes de 10,5 m situado no final da linha com cargas aplicadas na seção vazada, considerando as 3 situações de acréscimo de carga horizontal



Fonte: elaborada pela autora.

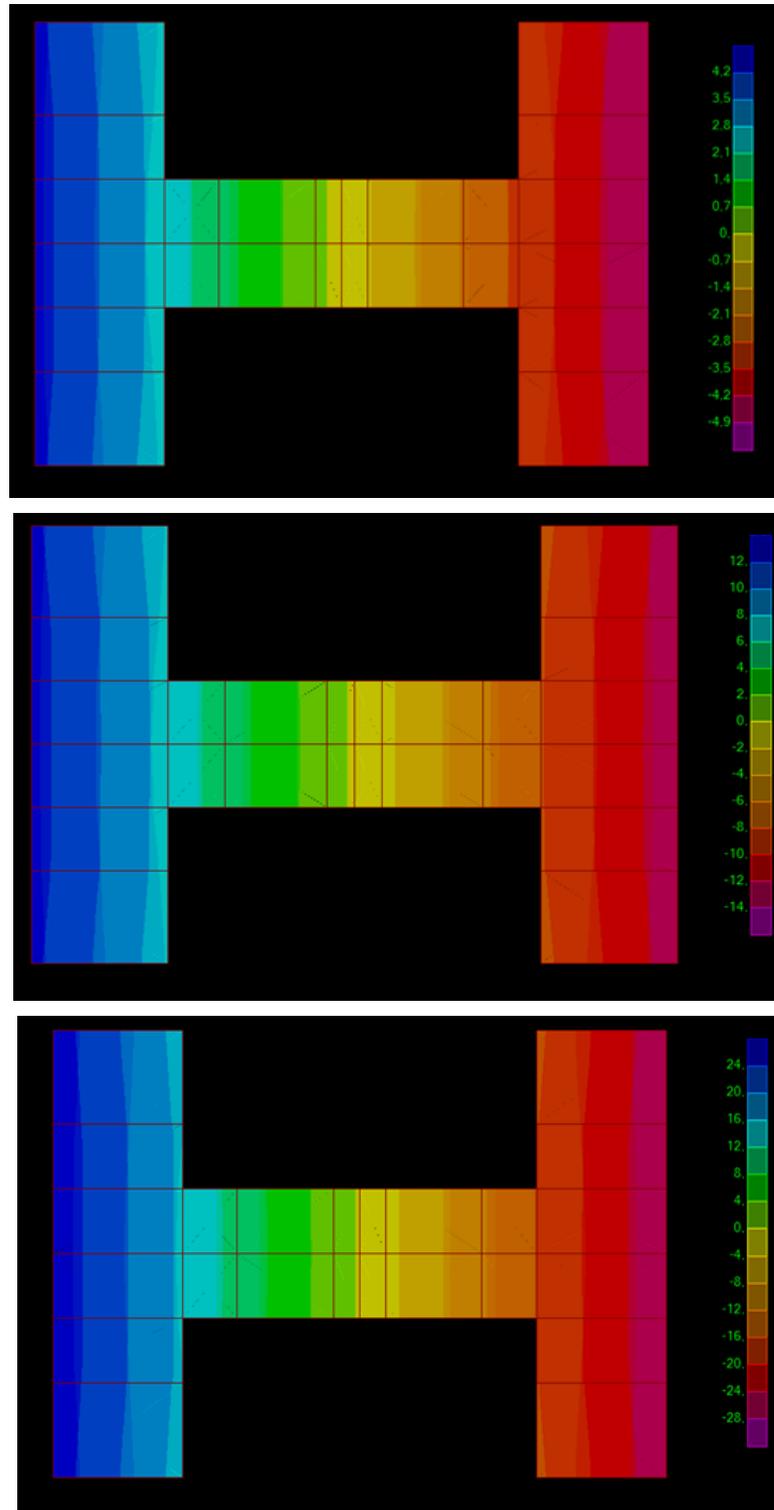
Deformadas (mm) postes de 10,5m situado em uma esquina com cargas aplicadas em ambas as seções, considerando as 3 situações de acréscimo de carga horizontal



Fonte: elaborada pela autora.

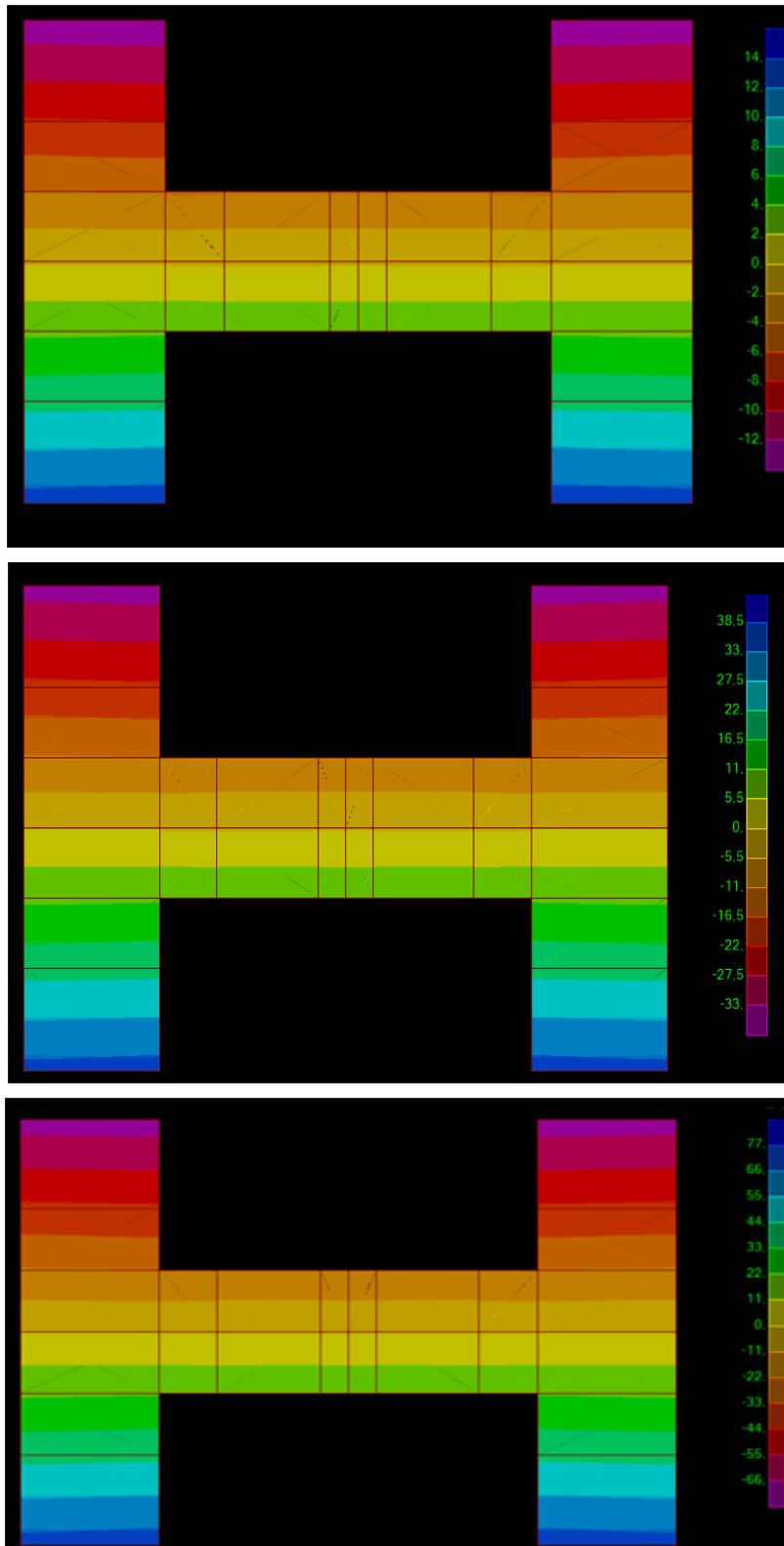
APÊNDICE B – TENSÕES NA BASE DOS POSTES

Tensões (MPa) na base dos postes de 9 m situado entre vãos adjacentes com cargas aplicadas na seção lisa, considerando as 3 situações de acréscimo de carga



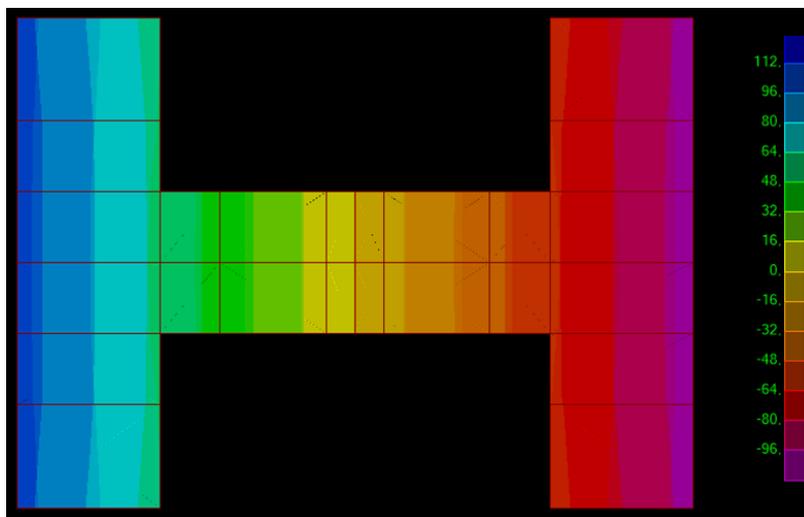
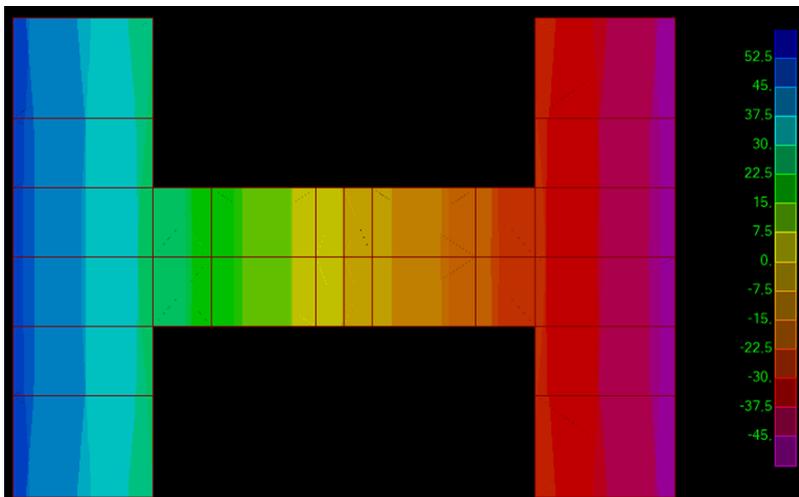
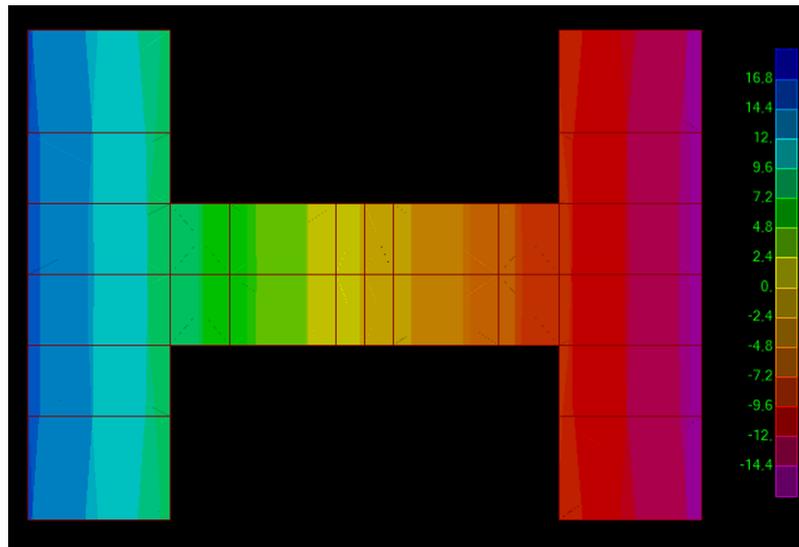
Fonte: elaborada pela autora.

Tensões (MPa) na base dos postes de 9 m situado entre vãos adjacentes com cargas aplicadas na seção vazada, considerando as 3 situações de acréscimo de carga.



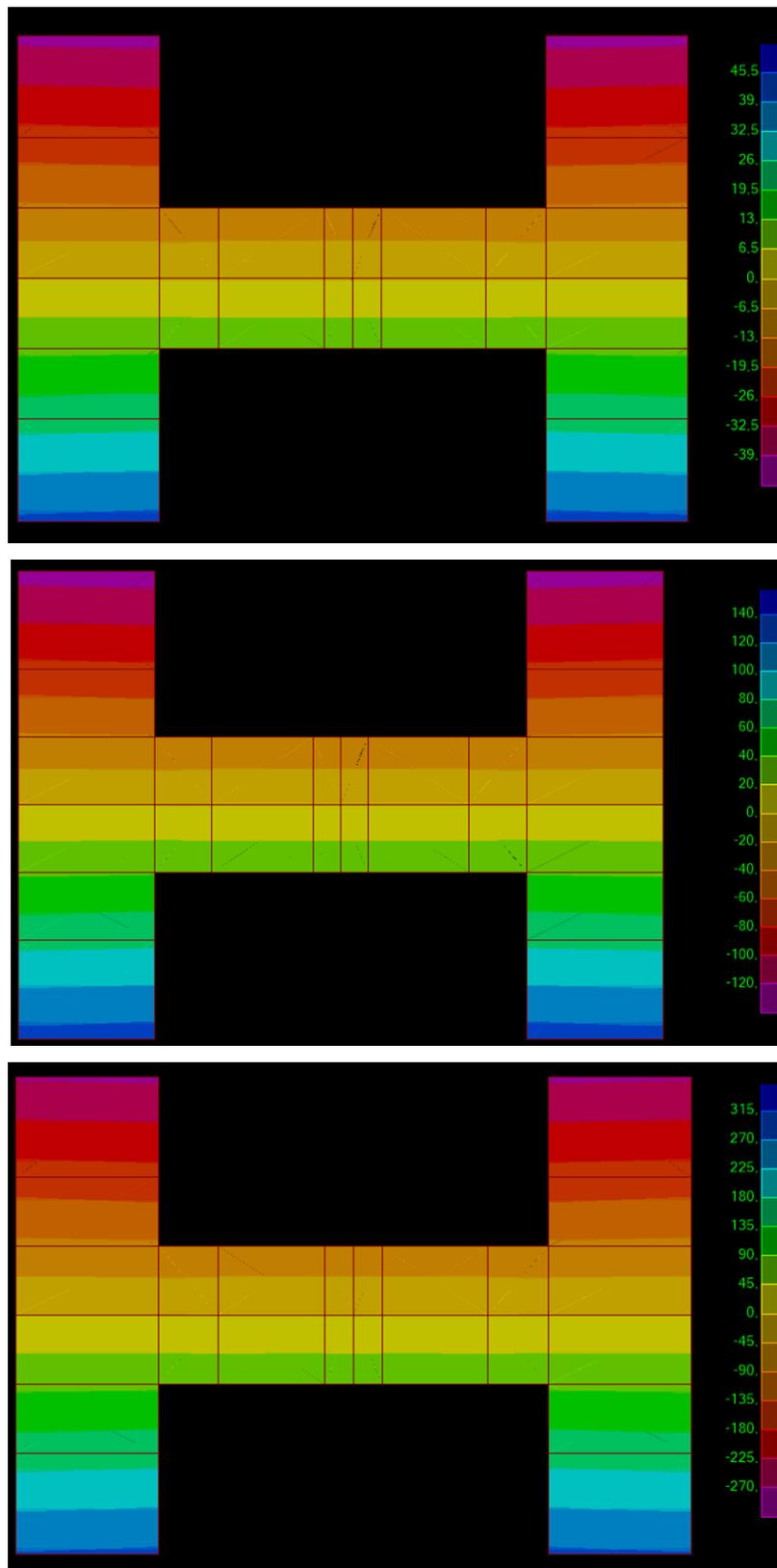
Fonte: elaborada pela autora.

Tensões (MPa) na base dos postes de 9 m situado no final da linha com cargas aplicadas na seção lisa, considerando as 3 situações de acréscimo de carga



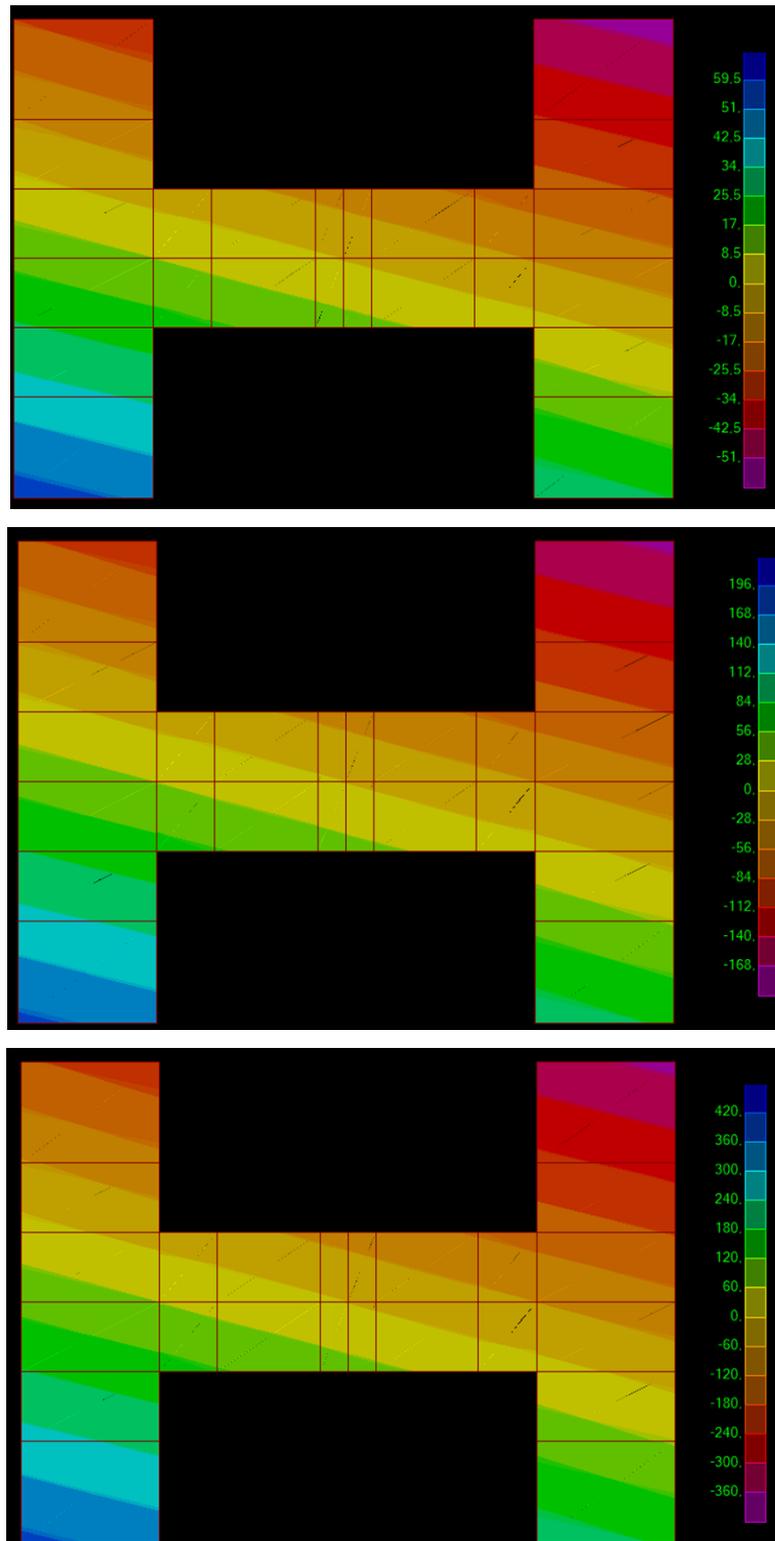
Fonte: elaborada pela autora.

Tensões (MPa) na base dos postes de 9 m situado no final da linha com cargas aplicadas na seção vazada, considerando as 3 situações de acréscimo de carga



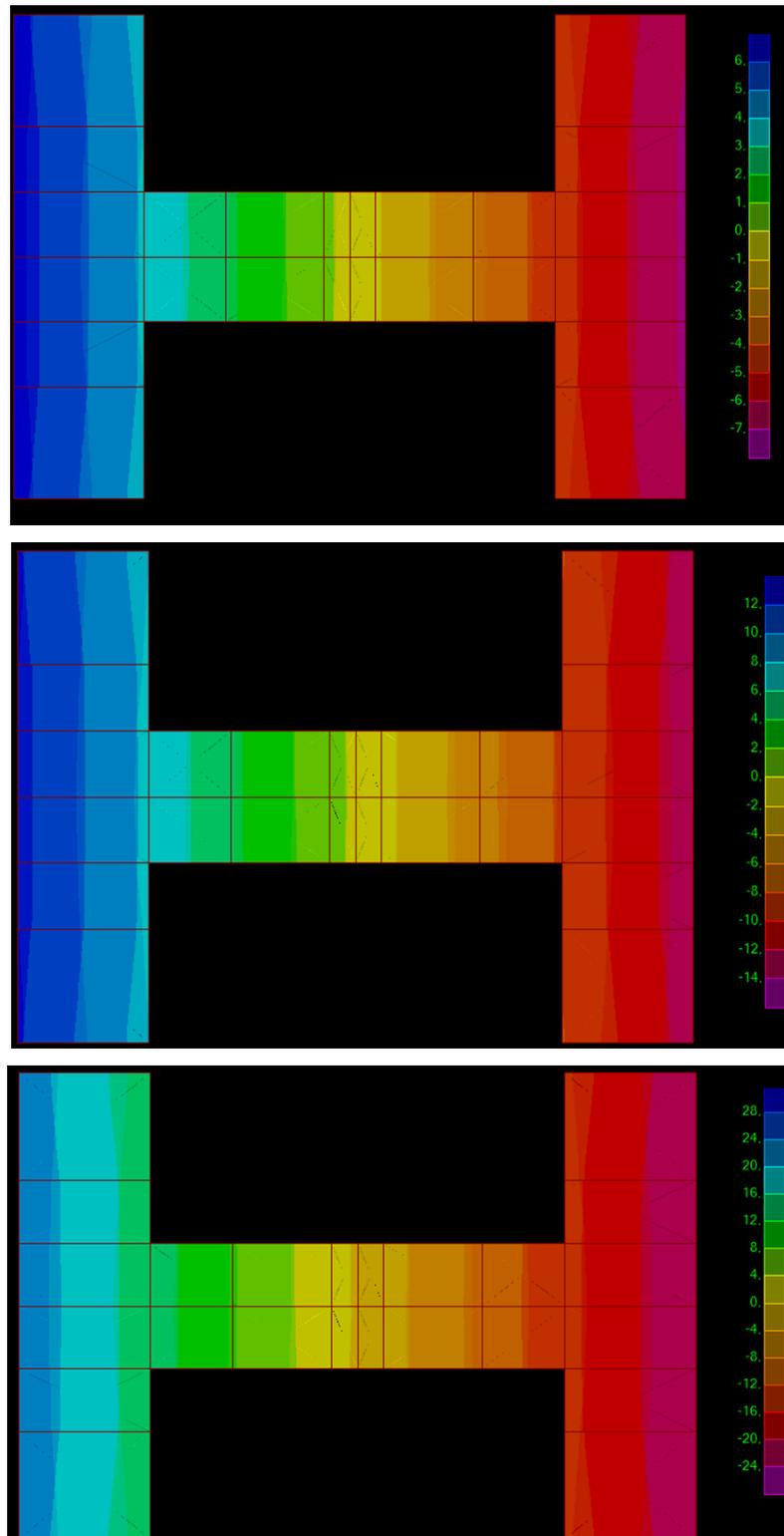
Fonte: elaborada pela autora.

Tensões (MPa) na base dos postes de 9 m situado em uma esquina com cargas aplicadas em ambas as seções, considerando as 3 situações de acréscimo de carga.



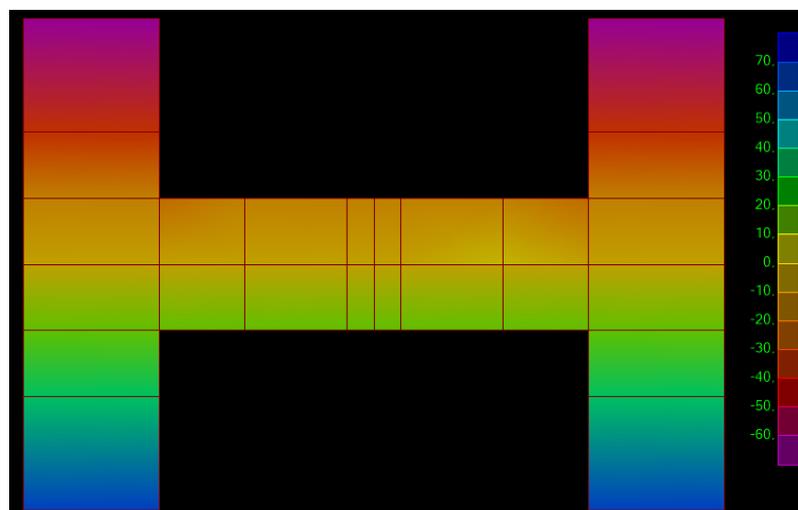
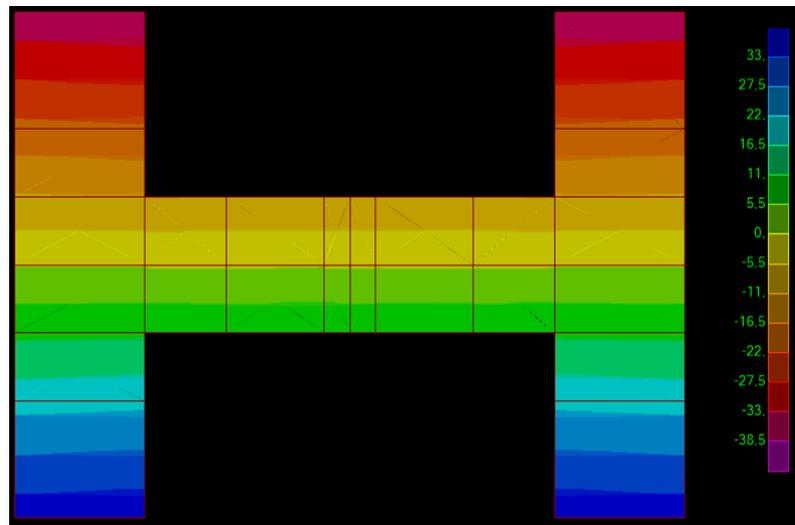
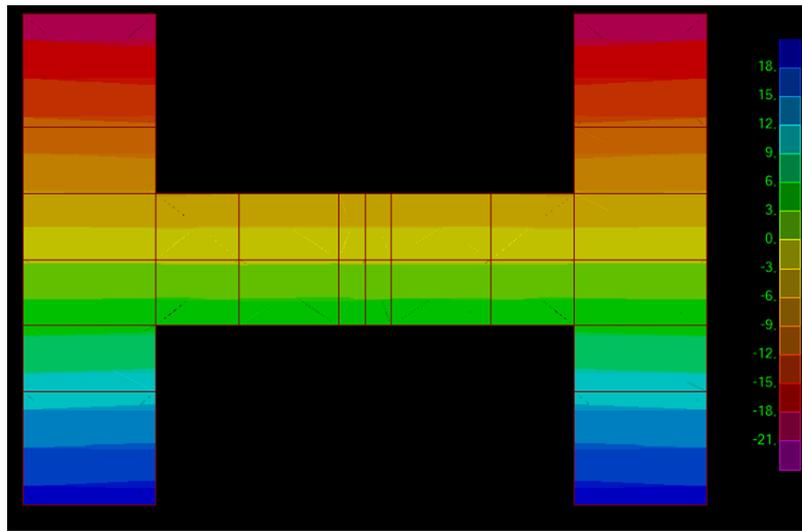
Fonte: elaborada pela autora.

Tensões (MPa) na base dos postes de 10,5 m situado entre vãos adjacentes com cargas aplicadas na seção lisa, considerando as 3 situações de acréscimo de carga



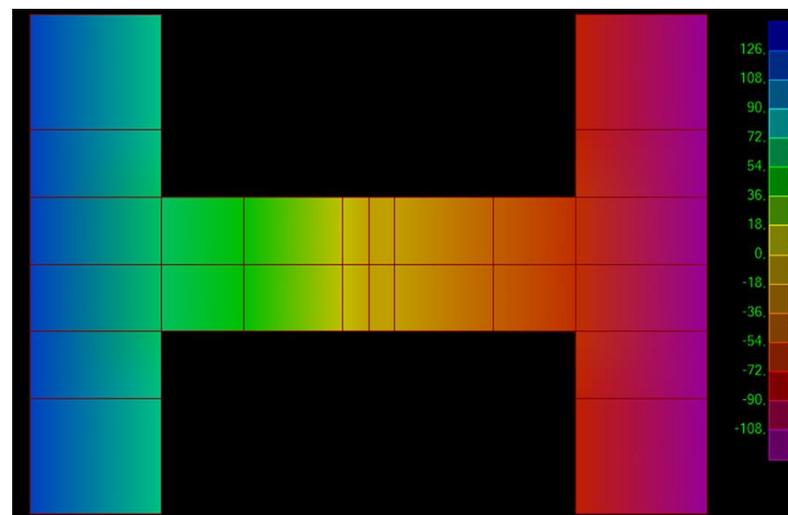
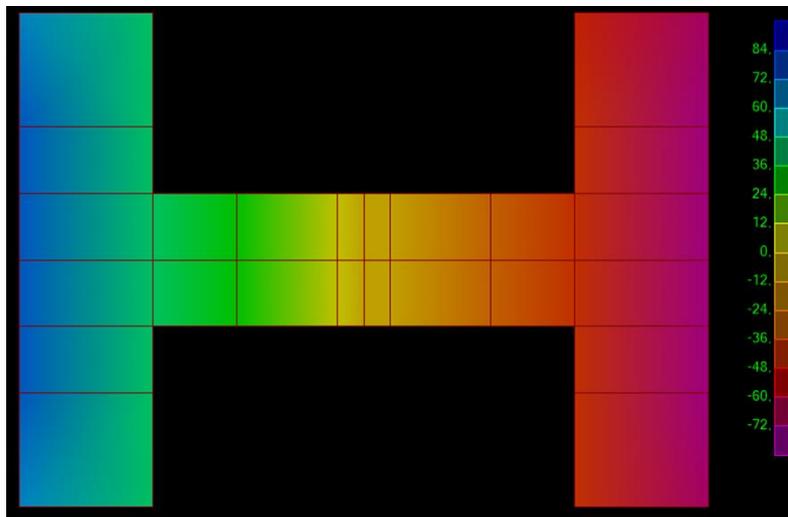
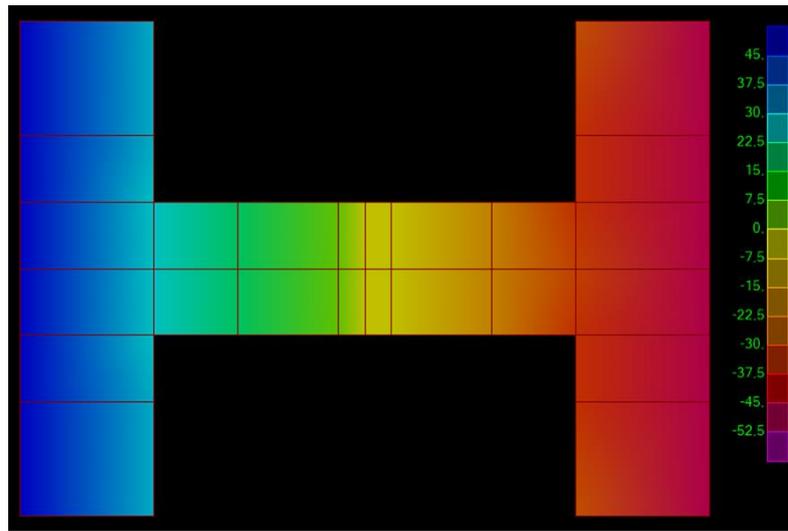
Fonte: elaborada pela autora.

Tensões (MPa) na base dos postes de 10,5 m situado entre vãos adjacentes com cargas aplicadas na seção vazada, considerando as 3 situações de acréscimo de carga



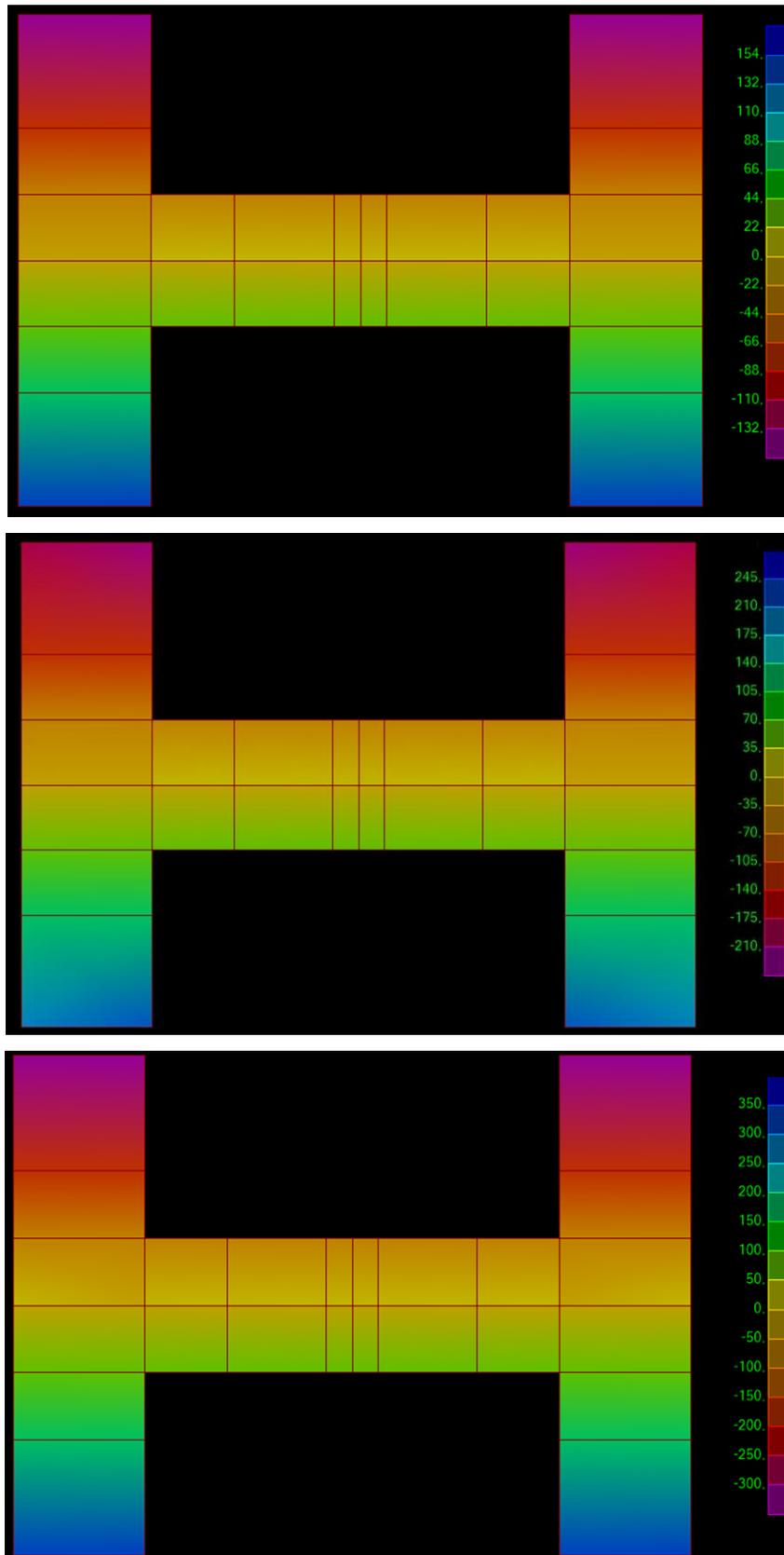
Fonte: elaborada pela autora.

Tensões (MPa) na base dos postes de 10,5 m situado no final da linha com cargas aplicadas na seção lisa, considerando as 3 situações de acréscimo de carga



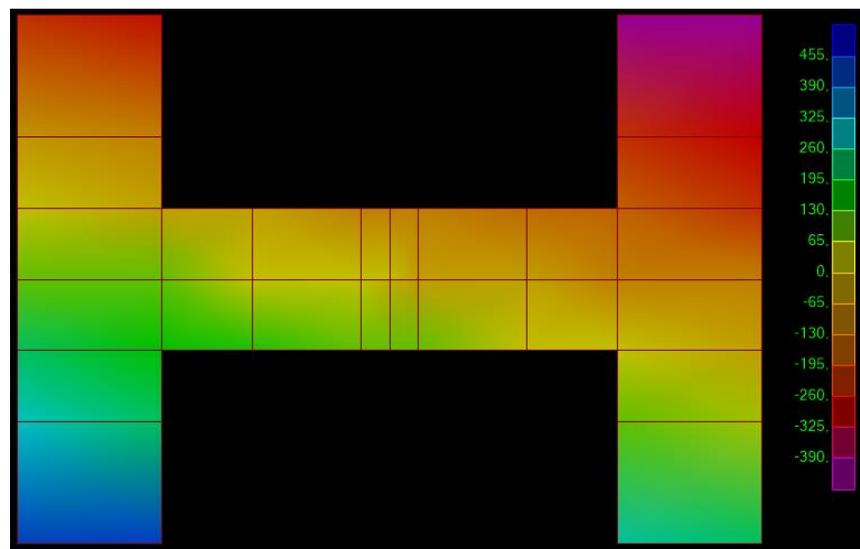
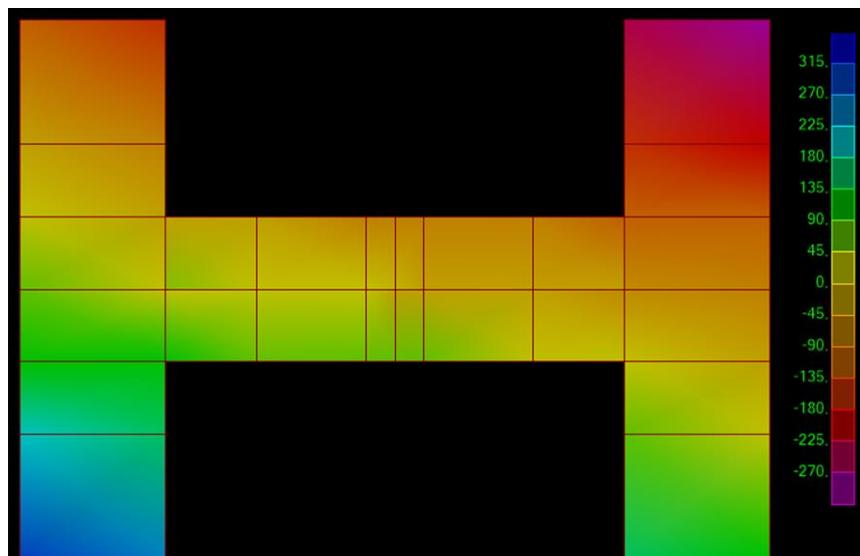
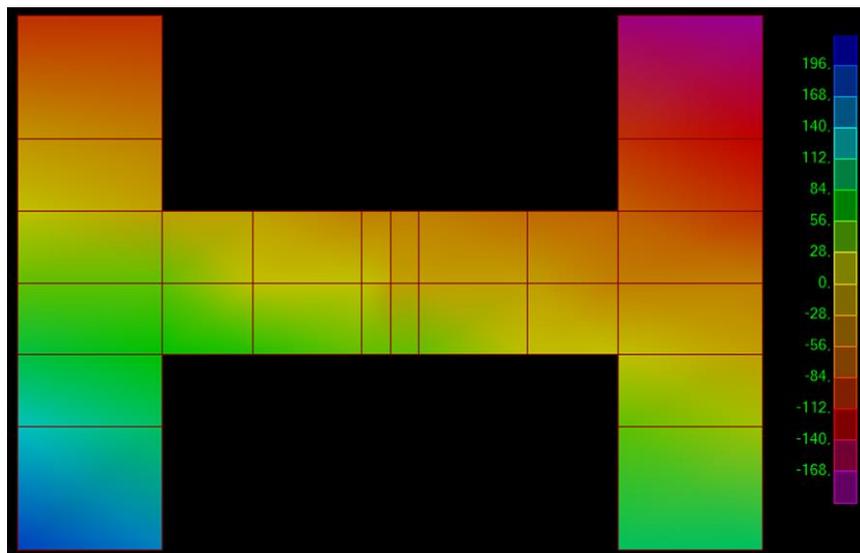
Fonte: elaborada pela autora.

Tensões (MPa) na base dos postes de 10,5 m situado no final da linha com cargas aplicadas na seção vazada, considerando as 3 situações de acréscimo de carga



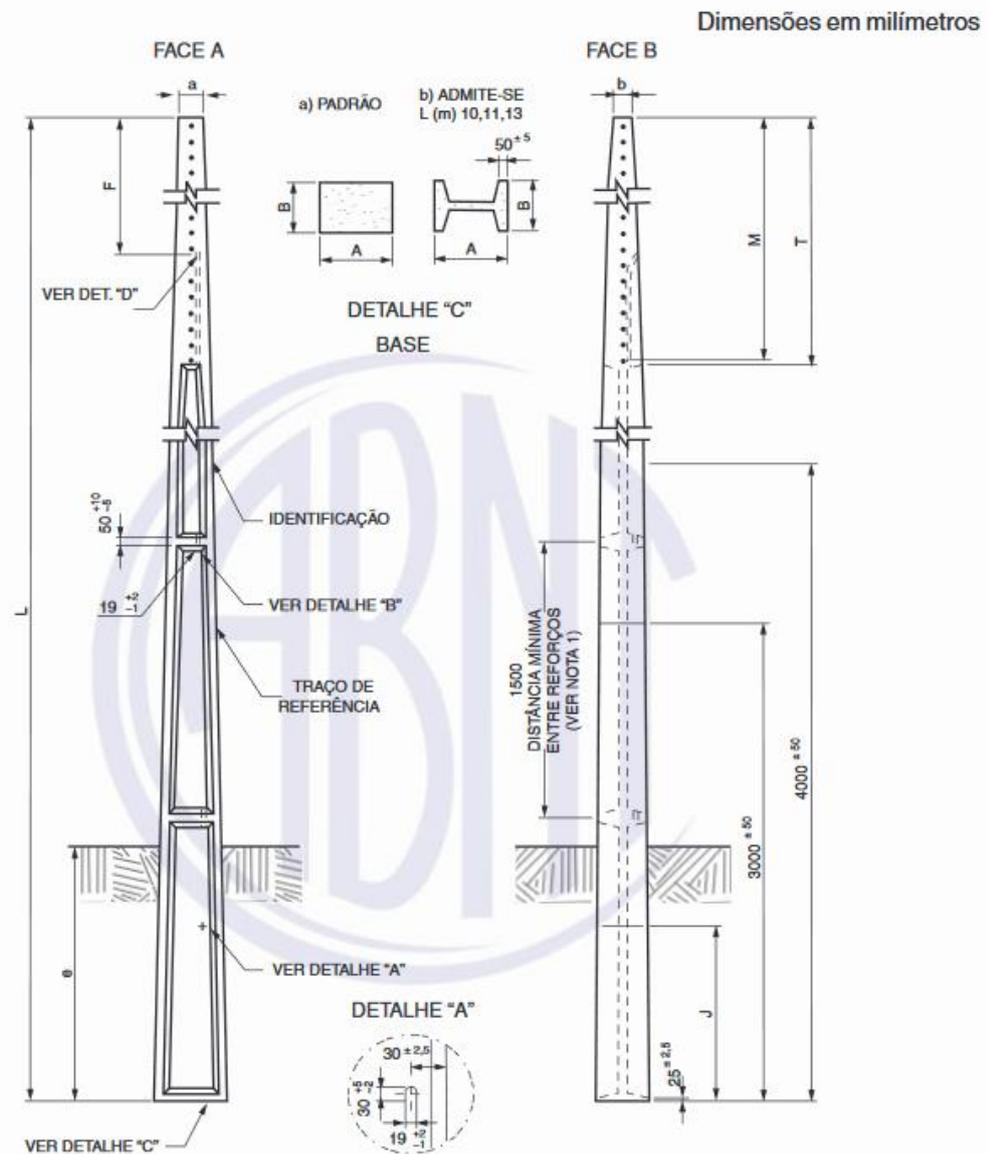
Fonte: elaborada pela autora.

Tensões (MPa) na base dos postes de 10,5 m situado em uma esquina com cargas aplicadas em ambas as seções, considerando as 3 situações de acréscimo de carga



Fonte: elaborada pela autora.

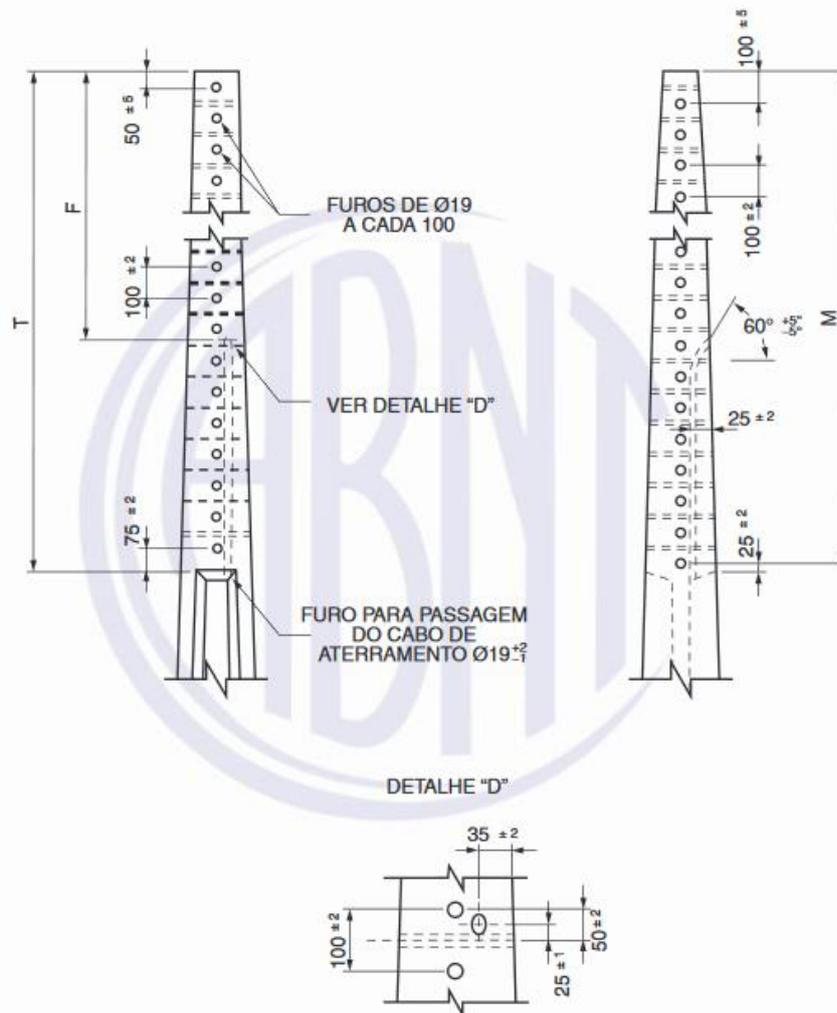
ANEXO A – POSTE SEÇÃO DUPLO T EXTENSÃO TOTAL



NOTA Para os postes com L = 10 m, 11 m e 13 m aceita-se que as últimas cavas tenham 1 000 mm.

Fonte: ABNT NBR 8451-2:2013 (2013, p. 10).

ANEXO B – POSTE SEÇÃO DUPLO T DETALHE DO TOPO



Fonte: ABNT NBR 8451-2:2013 (2013, p. 11).