

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - MESTRADO

PAULO FERREIRA BENENCASE

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE
POSTES DE CONCRETO ARMADO UTILIZADOS EM
LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

MARINGÁ
2015

PAULO FERREIRA BENENCASE

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE
POSTES DE CONCRETO ARMADO UTILIZADOS EM
LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Área de Concentração: Engenharia de Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei

MARINGÁ
2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

B465a Benencase, Paulo Ferreira
Análise do comportamento estrutural de postes de concreto armado utilizados em linhas de transmissão de energia elétrica / Paulo Ferreira Benencase. -- Maringá, 2015.
109 f. : il. col., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015.

1. Concreto armado - Postes. 2. Concreto armado - Comportamento estrutural. 3. Energia elétrica - Linhas de transmissão. I. Vanderlei, Romel Dias, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 21.ed.624.18341

ECSL

PAULO FERREIRA BENENCASE

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE POSTES DE CONCRETO ARMADO UTILIZADOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENGERGIA ELÉTRICA.

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de concentração Engenharia de Estruturas, para obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 29 de setembro de 2015



Profª. Dra. Anamaria Malachini Miotto Farah

Universidade Estadual de Maringá

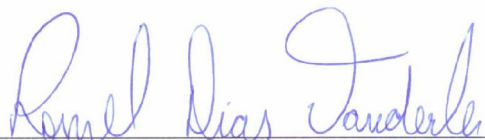
Membro



Prof. Dr. João Dirceu Nogueira Carvalho

UNINGÁ - Faculdade Ingá

Membro



Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei

Universidade Estadual de Maringá

Orientador

DEDICATÓRIA

À minha amada esposa, Cissi
ao meu querido filho, Daniel Augusto
à minha mãe, Rosita (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo em minha vida.

Ao Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei, por me orientar neste trabalho de maneira confiante, sábia e atenciosa.

Ao aluno de graduação do curso de Engenharia Civil da UEM Guilherme Sanches de Arruda Venci, por me auxiliar com o software ABAQUS®.

À minha esposa Cissi, por todo apoio e compreensão.

Ao meu filho Daniel Augusto, por alegrar meus dias.

Ao meu pai Wandy por me possibilitar alcançar a formação de engenheiro civil.

À professora Rosa Jacobetty por além de ter me ensinado importantes fundamentos da matemática ser uma grande amiga.

Aos demais professores do programa, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos colegas mestrandos do programa de pós-graduação em engenharia civil, pelo companheirismo.

*“Você pode ter tudo, mas não ao mesmo tempo.
Prioridade não é abdicar e também não é a emergência;
estabelecer prioridades é saber o que você quer, o que te
faz feliz, isso é prioridade.”*

Ana Paula Padrão

BENENCASE, Paulo Ferreira. **Análise do comportamento estrutural de postes de concreto armado utilizados em linhas de transmissão de energia elétrica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UEM, Maringá, 2015.

RESUMO

O uso de postes de concreto armado em linhas de transmissão de energia elétrica apresenta vantagens com relação ao uso de torres metálicas, tais como: fundações mais econômicas; maior rapidez na montagem; menor necessidade de área para instalação; maior durabilidade frente às intempéries; maior resistência ao fogo; menor necessidade de manutenção e melhor aspecto visual. Porém, o seu emprego é recente e a literatura sobre o assunto ainda escassa. O presente trabalho aborda de maneira ampla os critérios envolvidos no projeto deste tipo de estrutura e tem como objetivo demonstrar os procedimentos de cálculo estrutural e avaliar o desempenho de postes com diferentes formatos. Nele é realizado o dimensionamento de postes com 23 metros de altura e diferentes geometrias: seção circular vazada, seção retangular vazada e seção duplo “T,” de acordo com as normas técnicas brasileiras ABNT NBR 5422:1985, ABNT NBR 6123:1988, ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 8451:2011. A análise estrutural dos postes é complementada com a realização de simulações numéricas com auxílio do software ABAQUS® que se baseia no Método dos Elementos Finitos. Os resultados obtidos, tais como: esforços, tensões, deslocamentos, armaduras e peso das estruturas foram comparados, a fim de se evidenciar as principais vantagens e desvantagens de cada formato de poste. Com isso, foi possível constatar para os casos propostos que o poste de seção circular vazada absorveu menos carga de vento, demandou o menor quantitativo de aço e teve a menor taxa de armadura, o poste de seção duplo “T” acusou os maiores esforços, mas o menor volume de concreto, o poste de seção retangular vazada apresentou alto consumo de materiais e foi a segunda estrutura mais pesada.

Palavras-chave: Postes de concreto armado. Linhas de transmissão. Comportamento estrutural.

BENENCASE, Paulo Ferreira. **Analysis of the structural behavior of reinforced concrete poles used in electric power transmission lines.** Dissertation (Master in Civil Engineering) – Post-Graduation Program in Civil Engineering, UEM, Maringá, 2015.

ABSTRACT

The use of reinforced concrete poles for electric power transmission lines has advantages with respect to the use of steel towers, such as more economic foundations; increased speed of assembly; need smaller area for installation; durability in the face of bad weather; higher fire resistance; lower maintenance and better visual appearance. However, its use is recent and the literature on the subject still scarce. This paper discusses broadly the criteria involved in the design of this type of structure and aims to demonstrate the structural calculation procedures and evaluate the performance of posts with different formats. In this, are designed poles with 23 meters high and different geometries: circular hollow section, rectangular hollow section and double "T" section, according to the Brazilian technical standards NBR 5422:1985, NBR 6123:1988, NBR 6118:2014 and NBR 8451:2011. Structural analysis of the poles is complemented with the development of numerical simulations with the aid of ABAQUS® software that is based on the Finite Element Method. The results obtained, such as efforts, stresses, deflections and weight of armor were compared in order to highlight the main advantages and disadvantages of each post format. As a result, it was found that for the proposed cases the pole with a hollow circular section absorbs less wind load, required the least amount of steel and also had the lowest rate of reinforcement, the pole with a double T section accused the greatest efforts but the lowest volume of concrete, the pole with a hollow rectangular section showed high consumption of materials and was the second heaviest structure.

Key-words: Reinforced concrete poles. Transmission lines. Structural behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Detalhe de flange e estação de alinhamento (fábrica)	27
Figura 2.2	Poste com seção duplo “T”	28
Figura 2.3	Poste com seção retangular vazada sendo içado com guincho	28
Figura 2.4	Estrutura em ângulo	29
Figura 2.5	Estrutura singela – circuito duplo	30
Figura 2.6	Estrutura geminada	30
Figura 2.7	Mapa de isopletas de velocidade básica, com intervalos de 5 [m/s]	34
Figura 2.8	Fator de afetividade	38
Figura 2.9	Efeito da pressão do vento sobre os condutores	39
Figura 2.10	Coefficiente de arrasto para suportes compostos por elementos cilíndricos	41
Figura 2.11	Coefficiente de arrasto para suportes constituídos de elementos prismáticos	42
Figura 2.12	Representação genérica de trecho de linha de transmissão em desnível	44
Figura 2.13	Configuração de forças de poste comprimido pela linha de transmissão	45
Figura 2.14	Configuração de forças de poste tracionado pela linha de transmissão	46
Figura 2.15	Configuração de forças em poste em ângulo da linha de transmissão	47
Figura 2.16	Configuração de forças em trecho de mudanças de direção em linha	48
Figura 2.17	Transferência de forças horizontais para o topo do poste	49
Figura 2.18	Determinação da força horizontal equivalente	49
Figura 2.19	Diagrama de momento fletor estabelecido na NBR 8451:2011	50
Figura 2.20	Variação de carregamento na estrutura ao longo do tempo	52
Figura 2.21	Coefficientes para redução da resistência nominal em poste de concreto armado de seção duplo “T”	53
Figura 2.22	Ensaio de poste de concreto	55
Figura 3.1	Aparência de estrutura típica de uma linha de transmissão de energia	57
Figura 3.2	Estrutura autoportante de concreto de uma linha de transmissão	57
Figura 3.3	Cruzeta de concreto armado com 3500[mm] de comprimento	59
Figura 4.1	Diagrama de força cortante obtido com o software F-TOOL V 2.12	64
Figura 4.2	Diagrama de momento fletor obtido com o software F-TOOL V 2.12	64
Figura 4.3	Detalhamento da armadura com seção circular vazada	67
Figura 4.4	Detalhamento da armadura com seção quadrangular vazada	71

Figura 4.5	Detalhamento da armadura com seção duplo “T”	75
Figura 5.1	Modelo do poste de seção circular vazada (vista de topo)	79
Figura 5.2	Condição de interação entre o aço e o concreto no poste de seção circular vazada	79
Figura 5.3	Condição de interação do ponto de referência com o poste de seção circular vazada	80
Figura 5.4	Condição de interação do ponto de referência com o poste de seção retangular vazada	80
Figura 5.5	Condição de interação do ponto de referência com o poste de seção duplo T	81
Figura 5.6	Engaste na base do poste de seção circular vazada	81
Figura 5.7	Carga lateral aplicada no topo do poste de seção circular vazada	82
Figura 5.8	Carga lateral aplicada no topo do poste de seção retangular vazada no sentido da maior inércia da seção	82
Figura 5.9	Carga lateral aplicada no topo do poste de seção retangular vazada no sentido da menor inércia da seção	83
Figura 5.10	Carga lateral aplicada no topo do poste de seção duplo “T” no sentido da maior inércia da seção	83
Figura 5.11	Carga lateral aplicada no topo do poste de seção duplo “T” no sentido da menor inércia da seção	84
Figura 5.12	Tipo de elemento finito da malha da armadura de aço	85
Figura 5.13	Tipo de elemento finito da malha do concreto	85
Figura 5.14	Malha do concreto do poste de seção circular vazada (vista aproximada)	86
Figura 5.15	Malha do concreto do poste de seção retangular vazada (vista global)	86
Figura 5.16	Malha do concreto do poste de seção duplo “T” (vista aproximada)	87
Figura 6.1	Gráfico Carga-Deslocamento para o poste de seção circular vazada	88
Figura 6.2	Gráfico Carga-Deslocamento para o poste de seção retangular vazada com carregamento aplicado no sentido da maior inércia da seção	89
Figura 6.3	Gráfico Carga-Deslocamento para o poste de seção retangular vazada com carregamento aplicado no sentido da menor inércia da seção	89
Figura 6.4	Gráfico Carga-Deslocamento para o poste de seção duplo "T" com carregamento aplicado no sentido da maior inércia da seção	90
Figura 6.5	Gráfico Carga-Deslocamento para o poste de seção duplo "T" com metade do carregamento aplicado no sentido da menor inércia da seção	90
Figura 6.6	Comparação dos resultados de deslocamento dos postes de diferentes seções	91

Figura 6.7	Deformadas do poste de seção circular vazada	92
Figura 6.8	Deformadas do poste de seção retangular vazada com carga lateral aplicada no sentido da maior inércia da seção (a) e no sentido da menor inércia da seção (b)	92
Figura 6.9	Deformadas do poste de seção duplo "T" com carga lateral aplicada no sentido da maior inércia da seção (a) e com metade da carga aplicada no sentido da menor inércia da seção (b)	93
Figura 6.10	Diagrama de tensões do postes de seção circular vazada	94
Figura 6.11	Diagramas de tensões do poste de seção retangular vazada com carga lateral aplicada no sentido da maior inércia da seção (a) e no sentido da menor inércia da seção (b)	94
Figura 6.12	Diagramas de tensões do poste de seção duplo "T" com carga lateral aplicada no sentido da maior inércia da seção (a) e com metade da carga aplicada no sentido da menor inércia da seção (b)	95
Figura 6.13	Tensões na base do poste de seção circular vazada	95
Figura 6.14	Tensões na base do poste de seção retangular vazada com carga lateral aplicada no sentido da maior inércia da seção	96
Figura 6.15	Tensões na base do poste de seção retangular vazada com carga lateral aplicada no sentido da menor inércia da seção	96
Figura 6.16	Tensões na base do poste de seção duplo "T" com carga lateral aplicada no sentido da maior inércia da seção	97
Figura 6.17	Tensões na base do poste de seção duplo "T" com metade da carga lateral aplicada no sentido da menor inércia da seção	97
Figura 6.18	Comparação dos coeficientes de arrasto	99
Figura 6.19	Comparação das forças de vento	100
Figura 6.20	Comparação das forças cortantes totais atuantes	100
Figura 6.21	Comparação dos momentos fletores solicitantes	101
Figura 6.22	Comparação das armaduras longitudinais	101
Figura 6.23	Comparação das armaduras transversais	102
Figura 6.24	Comparação dos volumes de concreto	103
Figura 6.25	Comparação dos pesos de aço	103
Figura 6.26	Comparação das taxas de armadura	104
Figura 6.27	Comparação dos pesos estimados dos postes	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Fator S_2	36
Tabela 2.2	Valores mínimos do fator estatístico S_3	37
Tabela 2.3	Cargas máximas recomendadas para cabos na condição de trabalho de maior duração, sem dispositivo de proteção contra vibração	43
Tabela 6.1	Resultados das flechas máximas dos modelos analisados	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALT	Altitude
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AR	Alta Resistência
CA	Cabo de Alumínio Sem Alma de Aço
CAA	Cabo de Alumínio Com Alma de Aço
CAA-EF	Cabo de Alumínio Com Alma de Aço Extra Forte
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i>
CAL	Cabo de Alumínio Liga
CALA	Cabo de Alumínio Liga Com Alma de Aço
COELCE	Companhia Energética do Ceará
DN	Desnível da Linha de Transmissão
EAR	Extra Alta Resistencia
EHS	<i>Extra High Strength</i>
ELS	Estado Limite de Serviço
LN	Linha Neutra
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira Registrada
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SI	Sistema Internacional de Unidades
SIN	Sistema Interligado Nacional
UEM	Universidade Estadual de Maringá

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS

A_e	Área frontal efetiva da projeção ortogonal da edificação
A_s	Área de aço da armadura tracionada
A_{s1}	Primeira parcela da área de aço da armadura tracionada
A_{s2}	Segunda parcela da área de aço da armadura tracionada
A_{swd}	Área de todos os ramos da armadura transversal
B'	Distância do eixo do poste ao plano de aplicação de carga
C_a	Coefficiente de arrasto
C_{XC}	Coefficiente de arrasto nos cabos
C_{Xi}	Coefficiente de arrasto nos isoladores
C_{XTC}	Coefficiente de arrasto nos suportes cilíndricos ou cônicos
C_{XTP}	Coefficiente de arrasto nos suportes tronco piramidais
E	Módulo de elasticidade ou módulo de Young
F'	Resultante das forças verticais
F_a	Força de arrasto
F_C	Força devido ao vento nos cabos
F_i	Força devido ao vento nos isoladores
F_{TC}	Força devido ao vento nos suportes cilíndricos ou cônicos
F_{TP}	Força devido ao vento nos suportes tronco piramidais
H	Altura do poste
H_n	Resultante horizontal que atuará no poste
H_x	Resultante das forças parciais no plano horizontal na direção transversal

	da linha
H_y	Resultante das forças parciais no plano horizontal na direção longitudinal da linha
I	Momento de inércia do elemento
L	Comprimento nominal do poste
L_{eq}	Comprimento do vão equivalente
L_f	Comprimento de flambagem da peça
M_{1d}	Primeira parcela do momento fletor resistente
M_{2d}	Segunda parcela do momento fletor resistente
M_A	Momento resultante da resistência nominal no plano de aplicação dos esforços reais
M_d	Momento fletor de cálculo
M_E	Momento resultante da resistência nominal no plano superior do engastamento
P	Carga concentrada
P_{CR}	Carga crítica de flambagem
®	Marca registrada
R_C	Resultante das forças de compressão no poste
R_e	Número de Reynolds
R_n	Resistência nominal do poste
R_T	Resultante das forças de tração no poste
S_1	Fator topográfico
S_2	Fator de rugosidade do terreno, de dimensão da edificação e de sua altura sobre o terreno
S_3	Fator estatístico
S_i	Área de cadeia de isoladores projetado ortogonalmente sobre um plano vertical

T	Tensão de projeto no cabo
T_0	Tensão de projeto no cabo ($T_0 = T$)
T_1	Tensão de projeto no cabo do vão 1
T_2	Tensão de projeto no cabo do vão 2
V_c	Parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao da treliça
V_n	Peso dos cabos, isoladores e acessórios
V_{Rd2}	Força cortante resistente de cálculo relativa à ruína da biela
V_s	Força cortante solicitante
V_{sd}	Força cortante solicitante de cálculo
$V_{sd,mín}$	Força cortante solicitante mínima de cálculo
W	Módulo de resistência
W_A	Módulo de resistência do poste no plano de aplicação dos esforços reais
W_B	Módulo de resistência do poste no plano da seção superior ao engastamento

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

a	Dimensão da coluna na face de incidência do vento
a_{sw}	Área da armadura transversal por unidade de comprimento
$a_{sw,mín}$	Área mínima da armadura transversal por unidade de comprimento
b	Dimensão da coluna na direção paralela ao vento
b_f	Largura da mesa
b_w	Largura da seção
c	Cobrimento da armadura
d	Distância do topo do poste ao plano de aplicação de carga

d	Altura útil da seção
e	Comprimento de engaste do poste
f	Flecha máxima
f_{cd}	Resistência de cálculo do concreto à compressão
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
f_{yd}	Tensão de cálculo de escoamento do aço
f_{ywd}	Tensão na armadura transversal
f_{ywk}	Tensão característica de escoamento do aço da armadura transversal
h	Altura útil do poste
h	Altura da viga
h_f	Altura da mesa
k_1	Fator de ponderação para cargas máximas de peso dos cabos (vertical)
k_2	Fator de ponderação para o peso próprio da estrutura, das ferragens, dos isoladores e para cargas verticais reduzidas
k_3	Fator de ponderação para cargas transversais originadas da tração mecânica dos cabos
l	Comprimento do tronco
n	Número de condutores
q	Pressão dinâmica do vento
s	Espaçamento da armadura transversal
t	Temperatura
v	Velocidade média do fluido
v_0	Velocidade básica do vento
v_k	Velocidade característica do vento
x	Posição da linha neutra
$y_{máx}$	Distância do eixo à região mais tracionada ou mais comprimida

z Comprimento do vão

LETRAS GREGAS MAIÚSCULAS

Δ_T Variação de temperatura

ϕ Ângulo formado pela direção do vento e o eixo do suporte

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

α Fator de afetividade

β Ângulo do cabo com a linha horizonte

γ Ângulo da catenária em relação ao plano vertical que passa no suporte

γ_s Coeficiente de ponderação da resistência da armadura

ε Deformação específica

ε_{cd} Deformação de cálculo do concreto

ε_s Deformação do aço

ε_{sd} Deformação de cálculo do aço

ε_{yd} Deformação do aço no início do escoamento

η Viscosidade dinâmica do fluido

η_{ar} Viscosidade dinâmica do ar

θ Ângulo de incidência do vento

μ Ângulo do cabo com a linha horizonte

ν Coeficiente de Poisson

π Número Pi ($\pi = 3,14159265359 \dots$)

ρ Massa específica do fluido

ρ_{ar} Massa específica do ar

$\rho_{sw,mín}$	Taxa mínima de armadura transversal
σ	Tensão
ψ	Ângulo da linha em planta baixa

LETRAS ESPECIAIS

\emptyset_C	Diâmetro do cabo
\emptyset_l	Diâmetro da armadura longitudinal (principal)
\emptyset_t	Diâmetro da armadura transversal (estribos)
\emptyset_{TC}	Diâmetro médio do suporte cilíndrico ou cônico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	GENERALIDADES	21
1.2	JUSTIFICATIVA.....	24
1.3	OBJETIVOS	25
1.3.1	Objetivo geral	25
1.3.2	Objetivos específicos.....	25
1.4	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	25
2	POSTES DE CONCRETO ARMADO PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	27
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	27
2.2	CONSIDERAÇÕES DE PROJETO.....	31
2.2.1	Ações.....	31
2.2.2	Combinações de ações.....	32
2.2.3	Forças devidas ao vento.....	32
2.2.4	Tensão de projeto nos cabos.....	42
2.3	DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS	43
2.3.1	Esforços verticais	43
2.3.2	Esforços horizontais	47
2.3.3	Momentos fletores	50
2.4	DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA.....	53
2.5	VERIFICAÇÕES DA ESTRUTURA.....	53
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
3.1	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS.....	56
3.1.1	Parâmetros geométricos	58
3.1.2	Propriedades dos materiais.....	59
3.1.3	Parâmetros elétricos.....	60
3.1.4	Condições de solicitação	60
3.1.5	Condições de contorno	61
4	EXEMPLOS NUMÉRICOS.....	62
4.1	CASO I: SEÇÃO CIRCULAR VAZADA.....	62
4.2	CASO II: SEÇÃO RETANGULAR VAZADA	67

4.3	CASO III: SEÇÃO DUPLO “T”	71
5	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	76
5.1	CRIAÇÃO DOS MODELOS.....	77
5.2	DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTATO, DE VINCULAÇÃO E DE CARREGAMENTO....	79
5.3	GERAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.....	84
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	88
6.1	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	88
6.1.1	Deformações nas estruturas	88
6.1.2	Tensões nas estruturas	93
6.1.3	Comparação entre resultados numéricos e resultados analíticos.....	98
6.2	ANÁLISE PARAMÉTRICA	98
6.2.1	Comparativo dos coeficientes de arrasto.....	98
6.2.2	Comparativo dos esforços	99
6.2.3	Comparativo da armadura longitudinal	101
6.2.4	Comparativo da armadura transversal	102
6.2.5	Comparativo do consumo de materiais	102
6.2.6	Comparativo do peso dos postes.....	104
7	CONCLUSÕES.....	105
7.1	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	106
	REFERÊNCIAS.....	107

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

As usinas de energia elétrica são, geralmente, construídas longe dos centros consumidores (cidades e indústrias) e é por isso que a eletricidade produzida pelos geradores tem de viajar por longas distâncias, em um complexo sistema de transmissão.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a rede de transmissão de energia elétrica no Brasil é de 107,4 mil quilômetros de extensão – distância equivalente a mais de duas vezes e meia a circunferência da Terra. A grande extensão do sistema brasileiro se explica pela dimensão continental do País.

Ao sair dos geradores, independentemente da fonte geradora, a eletricidade começa a ser transportada através de cabos aéreos, revestidos por camadas isolantes e fixados em grandes estruturas. Denomina-se de rede de transmissão a esse conjunto de cabos e estruturas. Outros elementos importantes das redes de transmissão são os isolantes de vidro ou porcelana, que impedem descargas elétricas durante o trajeto.

No caminho, a eletricidade passa por diversas subestações, onde aparelhos transformadores aumentam ou diminuem sua voltagem, alterando a tensão elétrica. No início do percurso, os transformadores elevam a tensão, evitando a perda excessiva de energia. Quando a eletricidade chega perto dos centros de consumo, as subestações diminuem a tensão elétrica, para que ela possa chegar às residências, empresas e indústrias. A partir daí, os cabos prosseguem por via aérea ou subterrânea, formando as redes de distribuição.

Entretanto, apesar de mais baixa, a tensão ainda não é adequada para o consumo imediato e por isso, transformadores menores são instalados nos postes de rua. Estes reduzem ainda mais a voltagem da energia que vai diretamente para as residências, comércio e indústrias.

As empresas responsáveis pela distribuição também instalam em cada local de consumo um pequeno aparelho para medir a quantidade de energia utilizada por eles. A medição é feita por hora e denomina-se de horário de pico ao momento em que uma localidade utiliza maior quantidade de energia elétrica. Nos centros urbanos, o horário de pico se dá por volta das 18 horas, quando escurece e, normalmente, as pessoas chegam do trabalho acendendo as luzes, ligando aparelhos de ar-condicionado e a televisão e tomando banho com

a água aquecida por chuveiros elétricos.

Dessa forma, o consumo de eletricidade varia de acordo com a estação do ano e com a região do país, dependendo do nível de luminosidade e do clima, entre outros fatores.

Até 1999, o Brasil possuía basicamente dois subsistemas independentes, o Sul-Sudeste-Cento-Oeste e o Norte-Nordeste. Isso limitava a possibilidade de uma gestão mais eficiente das diversidades climáticas (regimes de chuvas) e energéticas das várias regiões do País e do sistema de transmissão que integra as usinas geradoras de médio e grande porte.

Atualmente, os subsistemas estão interligados, o que permite um contínuo e permanente intercâmbio de energia entre as regiões e uma operação mais econômica, flexível e segura das instalações componentes do Sistema Interligado Nacional (SIN).

O sistema brasileiro também está interligado à Venezuela (de onde chega a energia que abastece a capital de Roraima, Boa Vista), à Argentina, ao Uruguai e ao Paraguai (do qual o País é sócio em Itaipu Binacional). Essas linhas são operadas pela Eletrobrás.

A Eletrobrás possui mais da metade das linhas de transmissão do Brasil e tem participado ativamente da expansão do Sistema Interligado Nacional (SIN).

O sistema de transmissão brasileiro, considerado o maior do mundo, é controlado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que conta com a participação de empresas de todo o país, trabalhando de forma interligada.

Isso significa que a eletricidade que chega até as residências pode ter viajado centenas ou milhares de quilômetros em linhas de transmissão. Além disso, pode ter sido gerada por diferentes usinas ao longo do ano.

De acordo com Wazen (2011, p.15) para que os cabos aéreos que transportam a energia sejam sustentados de forma eficaz e segura, são necessárias estruturas específicas para cada nível de tensão e para diferentes tipos de relevos a serem transpostos. Assim, de acordo com as especificidades de cada projeto, as estruturas adotadas podem ser metálicas, de concreto ou mesmo de madeira.

As estruturas metálicas são torres treliçadas e têm sido amplamente utilizadas em linhas de transmissão. As estruturas de concreto são postes de concreto armado com seção circular vazada ou em perfil “I” e sua utilização em linhas de transmissão se iniciou no país apenas a partir da década de 50. Geralmente estas estruturas são consideradas esbeltas, em que apenas uma dimensão é relevante.

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.

Segundo Carril Jr. (2000, p.1) neste tipo de obra o vento é o fator predominante e, portanto, é essencial ter estimativas confiáveis do carregamento do vento e do seu efeito sobre a estrutura.

Na análise das estruturas, objeto desta pesquisa, deve ser levado em conta as recomendações das normas técnicas brasileiras ABNT NBR 5422:1985 - Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica; ABNT NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações; e ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto.

Segundo Pereira (2010, p. 57) na maioria dos processos de desenvolvimento de novos produtos pode ser obtida uma redução considerável de custo, tempo e recursos consumidos em ensaios e testes experimentais com a utilização de simulações numéricas. Isso significa que o produto completo deve ser modelado e seu comportamento simulado. Tal simulação deve considerar não apenas as estruturas complicadas, mas também uma combinação de diferentes fenômenos físicos e escalas. Portanto, mesmo com o impressionante poder computacional disponível atualmente, ainda assim, é uma tarefa desafiadora desenvolver e implementar rápidos métodos numéricos capazes de resolver problemas com um alto grau de confiança e precisão.

Ainda de acordo com Pereira (2010, p. 61) não se deve esquecer que, em contrapartida, as análises experimentais são fundamentais e de extrema importância para calibrar, aferir e validar os modelos numéricos.

Neste trabalho a análise numérica dos postes de concreto armado em linhas de transmissão de energia elétrica é feita com auxílio do programa computacional ABAQUS®, disponível do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, que se baseia no Método dos Elementos Finitos (MEF) e que tem inúmeras aplicações em muitas áreas da engenharia.

1.2 JUSTIFICATIVA

Para Lautenschläger (2010, p.21) linhas de transmissão envolvem unidades estruturais cujo projeto e execução devem ser cuidadosamente observados, pois a estabilidade de cada unidade é de vital importância para um sistema de transmissão.

A queda de uma estrutura numa linha de transmissão causa prejuízos para as concessionárias de energia e interrupção do fornecimento de energia à população.

O uso de postes de concreto em linhas de transmissão apresenta vantagens em relação ao uso de torres metálicas, tais como: fundações mais econômicas; maior rapidez na montagem; menor necessidade de área para instalação; maior durabilidade frente à agressividade ambiental; maior resistência ao fogo (queimadas); menor necessidade de manutenção; melhor aspecto visual; etc..

Contudo, a literatura sobre o assunto ainda é escassa. Além disso, estruturas em linhas de transmissão de energia é um assunto pouco abordado na formação dos engenheiros civis pelas universidades do Brasil.

Neste contexto, um estudo mais aprofundado do assunto é relevante e sua divulgação poderá contribuir para a qualidade de projetos de engenharia e de produtos das indústrias de pré-fabricados de concreto, e por sua vez, para a construção de estruturas mais seguras e até mais econômicas.

De acordo com Pereira (2010, p. 56-57) uma grande preocupação atual é que o Brasil não tem infraestrutura para um crescimento acelerado. Nos setores de Energia e Telecomunicações, destacam-se os problemas encontrados na operação e manutenção de linhas de transmissão de alta-voltagem e em torres de telecomunicações, devido, em grande parte, ao fato destas estruturas estarem permanentemente sujeitas aos efeitos meteorológicos. Porém, sem a utilização maciça de recursos computacionais torna-se inviável o desenvolvimento acelerado de novas tecnologias e de soluções para os problemas levantados. Daí a importância das simulações numéricas na solução da maioria dos problemas de engenharia. Dessa maneira, o meio acadêmico passa a ter um papel muito importante, e pode dar uma grande contribuição ao desenvolvimento de novas tecnologias e avanços na área de simulações computacionais aplicadas a esses problemas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral investigar o comportamento estrutural de grandes postes de concreto armado utilizados em linhas de transmissão de energia elétrica.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Apresentar os procedimentos de cálculo estrutural de postes de concreto armado.
- Realizar simulações numéricas de postes de concreto armado com auxílio do software de elementos finitos ABAQUS® e comparar os resultados obtidos com os resultados teóricos.
- Identificar regiões de fragilidade na estrutura.
- Definir os parâmetros de maior influência nos casos estudados.
- Estabelecer um comparativo entre postes de diferentes seções, destacando as vantagens e desvantagens de cada um.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este item apresenta a forma como está organizada a dissertação, com a ordem e descrição dos capítulos que a compõem, como segue:

- a) No Capítulo 2 são apresentados de maneira ampla os principais pontos sobre postes de concreto armado utilizados em linhas de transmissão de energia elétrica, visando à fundamentação teórica do problema. Foram expostos os tipos de postes de concreto utilizados em linhas de transmissão, bem como, os critérios de dimensionamento deste tipo de estrutura, tais como: ações, esforços e determinação de armadura.
- b) No Capítulo 3 são descritos os casos e o plano de experimentos estabelecido para o presente trabalho. Definindo-se as variáveis envolvidas.
- c) No Capítulo 4 são desenvolvidos exemplos numéricos sobre os casos propostos para melhor elucidar os métodos de cálculo para postes de concreto armado em linhas de transmissão e para servirem de base para as simulações numéricas.

- d) O Capítulo 5 diz respeito às simulações numéricas dos postes de concreto armado a serem realizadas com a ferramenta computacional ABAQUS®, para averiguação do comportamento das estruturas calculadas.
- e) No Capítulo 6, os resultados obtidos são analisados, interpretados e confrontados, visando-se estabelecer um comparativo.
- f) Por fim, o Capítulo 7 apresenta as principais conclusões encontradas nesta dissertação e traz algumas sugestões para futuros trabalhos acerca do mesmo tema.

2 POSTES DE CONCRETO ARMADO PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os postes de concreto armado são elementos estruturais lineares, usualmente modelados como viga em balanço, nos quais o esforço de flexão é preponderante.

As vantagens deste tipo de estrutura em relação às torres treliçadas são: maior facilidade de montagem; menor área de implantação e menor custo de manutenção. Em contrapartida, são mais susceptíveis às forças de vento e apresentam um custo mais elevado.

De acordo com informações de fabricantes, os postes são geralmente produzidos para alturas entre 15 e 30 metros, podendo chegar até 50 metros. Para comprimentos acima de 24 metros ou em caso de dificuldade de transporte ou de acesso à obra, os postes podem ser fornecidos em dois ou mais segmentos a serem conectados no local por meio de flanges, encaixe macho-fêmea ou concretagem em campo.



Figura 2.1: Detalhe de flange e estação de alinhamento (fábrica)

Fonte: <<http://www.scac.com.br/Linha+de+Transmissao>>. Acesso em: 22/12/14.

As seções mais comuns são: duplo “T”, retangular vazada e circular vazada, com diâmetros externos variando entre 30 cm e 100 cm.

Os postes podem ter seção variável ao longo da altura. Esta medida gera uma grande economia na fabricação da estrutura e na execução das fundações.



Figura 2.2: Poste com seção duplo “T”

Fonte: <http://www.postesnordeste.com.br/linhas_transmissao.htm>. Acesso em: 22/12/14.



Figura 2.3: Poste com seção retangular vazada sendo içado por guincho

Fonte: <<http://www.incopostes.com.br/linhas-de-transmissao.html>>. Acesso em: 22/12/14.

As estruturas podem ser classificadas, quanto à função que desempenham na linha, em:

- **Estruturas de suspensão:** Sua finalidade é apoiar os cabos condutores e para-raios, mantendo-os afastados do solo e entre si, de acordo com as normas de segurança.
- **Estruturas em ângulos:** É utilizada em locais onde existe a necessidade mudança de direção da linha de transmissão.
- **Estruturas de derivação:** É utilizada caso seja necessária uma derivação em um ponto da linha.
- **Estruturas de ancoragem:** São estruturas posicionadas no início ou final da Linha de Transmissão. São projetadas para resistirem a cargas assimétricas.



Figura 2.4: Estrutura em ângulo

Fonte: <<http://www.incopostes.com.br/linhas-de-transmissao.html>>. Acesso em: 22/12/14.

Quanto à forma, as estruturas podem ser classificadas em:

- **Estruturas singelas monolíticas:** Estrutura composta por um poste, em peça única que, uma vez transferida até o local de instalação, está apta para as operações de levantamento e fincamento.
- **Estruturas singelas seccionadas:** Estruturas a serem conectadas no local de

instalação. Considerando a emenda com flanges, é eliminado o tempo de cura próprio da execução de uma emenda com armadura e concreto em campo, permitindo a montagem imediata quando o poste chega ao local.

- **Estruturas geminadas:** A estrutura geminada é composta por dois ou mais postes, integrados através de cruzetas e colares de concreto estrategicamente posicionados ao longo da estrutura, que resultam em maior rigidez e inércia para absorção de esforços atuantes superiores.

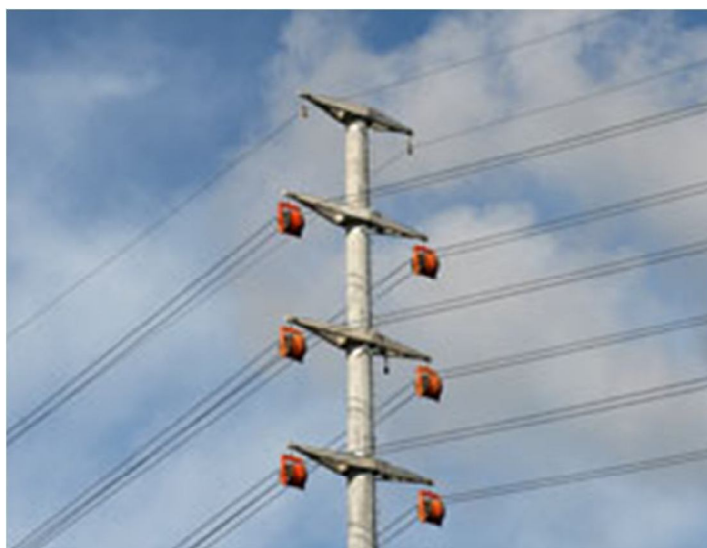


Figura 2.5: Estrutura singela – circuito duplo

Fonte: <<http://www.scac.com.br/Linha+de+Transmissao>>. Acesso em: 22/12/14.



Figura 2.6: Estrutura geminada

Fonte: <<http://www.scac.com.br/Linha+de+Transmissao>>. Acesso em: 22/12/14.

2.2 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

2.2.1 Ações

Segundo a norma ABNT NBR 5422:1985 as ações a que a estrutura está sujeita, são as seguintes:

- **Ações permanentes:** aquelas que praticamente não variam ao longo da vida útil da estrutura, tais como, peso próprio da estrutura, peso dos isoladores e cargas transmitidas pelos cabos.
- **Ações variáveis:** aquelas que apresentam variações significativas ao longo da vida útil da estrutura, tais como, a ação do vento e gradientes de temperatura.
- **Ações excepcionais:** ações de duração muito curta na estrutura, mas que precisam ser consideradas em projeto, como aquelas que ocorrem especificadamente durante o transporte e na montagem da linha. Também se consideram excepcionais as cargas para a prevenção do fenômeno de cascata (queda sucessiva de estruturas quando da falha de algum componente da linha).

As ações nos cabos que são transmitidas às estruturas decorrem do seu peso próprio e da pressão de vento horizontal, uniformemente distribuída ao longo do vão da linha.

A norma ABNT NBR 5422:1985 recomenda multiplicar os valores obtidos para as cargas permanentes pelos seguintes fatores mínimos:

- $k_1=1,15$: para cargas máximas de peso dos cabos (vertical);
- $k_2=1,00$: para o peso próprio da estrutura, das ferragens, dos isoladores e para cargas verticais reduzidas;
- $k_3=1,10$: para cargas transversais originadas da tração mecânica dos cabos.

Segundo Dias (2007, p. 47) a variação de temperatura provoca nos cabos dilatações ou retrações ao longo do seu comprimento. No entanto, e uma vez que, estes são fixados às estruturas de suporte com um dispositivo (folga) que permite acomodar as variações de comprimento correspondentes às variações de temperatura existentes, os esforços axiais gerados são insignificantes, e em regra, são desprezados.

As operações de içamento impõem frequentemente cargas dinâmicas e assimétricas. Os pontos de içamento de todos os elementos estruturais devem resistir mecanicamente pelo menos 2,0 vezes os esforços estáticos produzidos pelo método de içamento utilizado. Um

fator de 1,5 pode ser utilizado se as operações de içamento de estruturas forem perfeitamente controladas.

Falhas resultantes de defeito de um elemento da linha por sobrecarga devido à ação do vento ou de evento casual (queda de avião, sabotagem, etc.) sugerem medidas de projeto da estrutura para evitar o fenômeno de cascata, como a aplicação em estruturas de suspensão de carga longitudinal em um cabo qualquer, equivalente ao esforço estático residual posterior ao rompimento de um cabo. Outros métodos poderão ser usados, desde que sejam de comprovada eficiência.

2.2.2 Combinações de ações

Segundo a norma ABNT NBR 5422:1985 as cargas de projeto devem ser combinadas convenientemente entre si, de modo a se obter um conjunto de hipóteses de cálculo para fins da verificação da estabilidade da estrutura.

O vento deve ser considerado atuando na direção que resultar a condição mais severa de carregamento.

2.2.3 Forças devidas ao vento

Segundo a norma ABNT NBR 6123:1988, de um modo geral, a componente da força global na direção do vento na edificação ou em parte dela, força de arrasto (F_a), é obtida por:

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_e \quad (2.1)$$

Onde:

F_a : é a força de arrasto [N];

C_a : é o coeficiente de arrasto, adimensional;

q : é a pressão dinâmica do vento [N/m²];

A_e : é a área frontal efetiva: área da projeção ortogonal da edificação, estrutura ou elemento estrutural sobre um plano perpendicular à direção do vento (“área de sombra”) [m²].

2.2.3.1 Pressão dinâmica do vento

De acordo com a norma ABNT NBR 5422:1985 a pressão dinâmica (q) é dada pela fórmula:

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot V_k^2 \quad (2.2)$$

Onde:

q : é a pressão dinâmica do vento [N/m²];

ρ_{ar} : é a massa específica do ar [kg/m³];

V_k : é a velocidade característica do vento [m/s].

O valor da massa específica do ar (ρ) é obtido através da seguinte equação:

$$\rho_{ar} = \frac{1,293}{1+0,00367 \cdot t} \cdot \left(\frac{16000+64 \cdot t - ALT}{16000+64 \cdot t + ALT} \right) \quad (2.3)$$

Onde:

ρ_{ar} : é a massa específica do ar [kg/m³];

t : é a temperatura [°C];

ALT : é a altitude média da região da implantação da linha [m].

A norma ABNT NBR 6123:1988, no item 2.2, estabelece como condições normais de pressão e temperatura, 1 [atm] e 15[°C], respectivamente. Isso permite que a Equação 2.2 seja simplificada, da seguinte forma:

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 \quad (2.4)$$

Onde:

q : é a pressão dinâmica do vento [N/m²];

V_k : é a velocidade característica do vento [m/s].

2.2.3.2 Velocidade característica do vento

Para o cálculo da pressão dinâmica do vento deve ser usada a velocidade característica (V_k), determinada de acordo com a norma ABNT NBR 6123:1988, pela seguinte expressão:

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (2.5)$$

Onde:

V_k : é a velocidade característica do vento [m/s];

V_0 : é a velocidade básica do vento [m/s];

S_1 : é o fator topográfico;

S_2 : é o fator de rugosidade do terreno, de dimensões da edificação e de sua altura sobre o terreno;

S_3 : é o fator estatístico.

A velocidade básica do vento (V_0) que corresponde à velocidade de uma rajada de vento de 3 [s], excedida na média uma vez em 50 anos, a 10 [m] acima do terreno, em campo aberto e plano, pode ser obtida pelo gráfico de isopletas da velocidade básica do vento no Brasil (Figura 2.7).

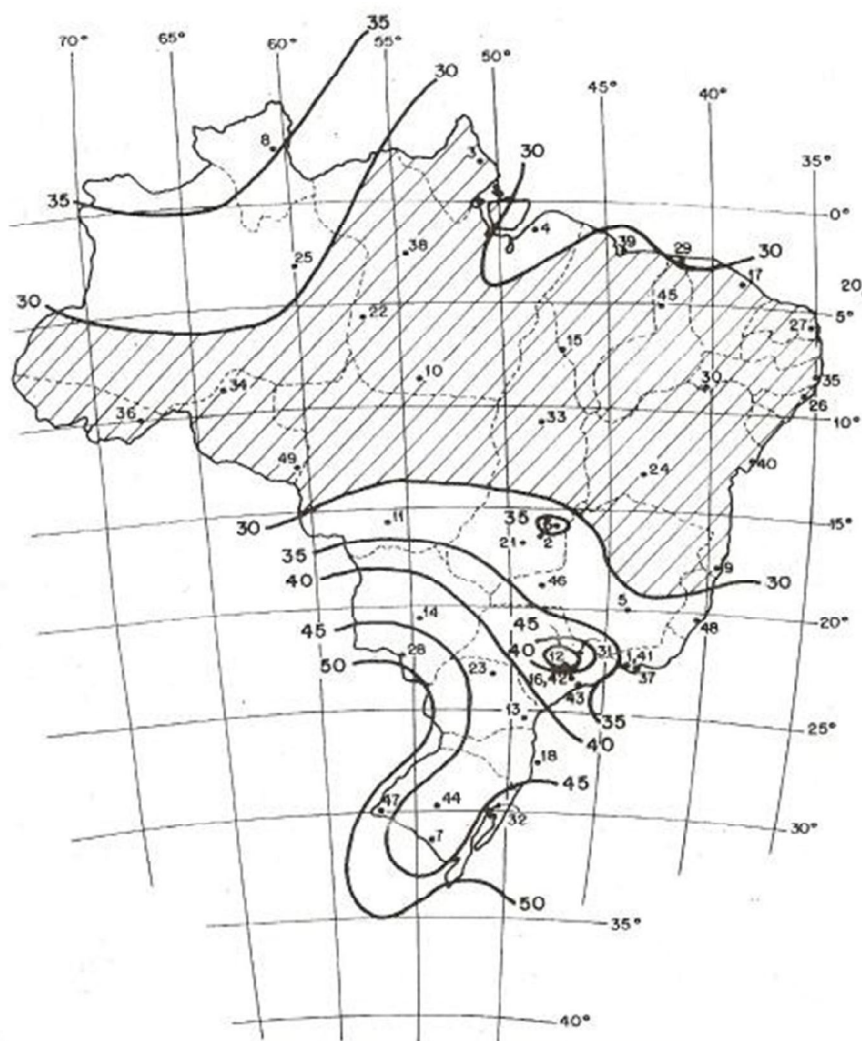


Figura 2.7: Mapa de isopletas de velocidade básica (V_0), com intervalos de 5 [m/s]

Fonte: ABNT NBR 6123 (1988).

O fator topográfico (S_1) leva em consideração as variações de relevo do terreno da seguinte forma:

- a) terreno plano ou fracamente acidentado: $S_1 = 1,00$;
- b) taludes e morros:

- Se $\theta \leq 3^\circ \rightarrow S_1(z) = 1,00$;
- Se $6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ \rightarrow S_1(z) = 1,00 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \cdot \tan(\theta - 3^\circ) \geq 1,00$;
- Se $\theta \geq 45^\circ \rightarrow S_1(z) = 1,00 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \cdot 0,31 \geq 1,00$.

Onde:

z: é a altura medida a partir da superfície do terreno, no ponto considerado [m];

d: é a diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro [m];

θ : é a inclinação média do talude ou encosta do morro [°].

c) vales profundos, protegidos de vento de qualquer natureza: $S_1 = 0,90$.

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

A norma ABNT NBR 6123:1988 classifica a rugosidade do terreno em cinco categorias, como segue:

- **Categoria I:** superfícies lisas de grandes dimensões.
- **Categoria II:** terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas.
- **Categoria III:** terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores e edificações baixas e esparsas (cota média do topo dos obstáculos de 3,00 m).
- **Categoria IV:** terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada (cota média do topo dos obstáculos de 10,00 m).
- **Categoria V:** terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados (cota média do topo dos obstáculos de 25,00 m).

A fim de considerar as dimensões da edificação, a norma ABNT NBR 6123:1988 define as seguintes classes:

- **Classe A:** todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior

dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m.

- **Classe B:** toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m.
- **Classe C:** toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

Desta forma os valores de S_2 para as diversas categorias de rugosidade de terreno e classes de dimensões das edificações definidas pela norma ABNT NBR 6123:1988 são dados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Fator S_2

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).

O fator estatístico (S_3) é baseado em conceitos estatísticos e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Os valores mínimos do fator S_3 são os indicados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Valores mínimos do fator estatístico S_3

GRUPO	DESCRIÇÃO	FATOR S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.).	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos e construções rurais, etc.).	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.).	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos Grupos 1 a 3 durante a construção.	0,83

Fonte: ABNT NBR 6123 (1988).

2.2.3.3 Ação do vento nos cabos

A norma ABNT NBR 5422:1985 apresenta no item 8.2.2 a seguinte fórmula para a determinação da força devida a ação do vento sobre os cabos de um vão de linha, perpendicular ao cabo:

$$F_C = q \cdot C_{xc} \cdot \alpha \cdot \varnothing_C \cdot \frac{z}{2} \cdot \text{SIN}^2 \theta \quad (2.6)$$

Onde:

F_C : é a força devida ao vento nos cabos [N];

q : é a pressão dinâmica do vento [N/m²];

C_{xc} : é a coeficiente de arrasto, igual a 1,0;

α : é o fator de afetividade;

\varnothing_C : é o diâmetro do cabo [m];

z : é o comprimento do vão considerado [m];

θ : é o ângulo de incidência do vento ($\leq 90^\circ$) em relação à direção do vão [°].

O fator de afetividade (α) é obtido a partir do diagrama da Figura 2.8, em função do vão dos cabos e da categoria do terreno.

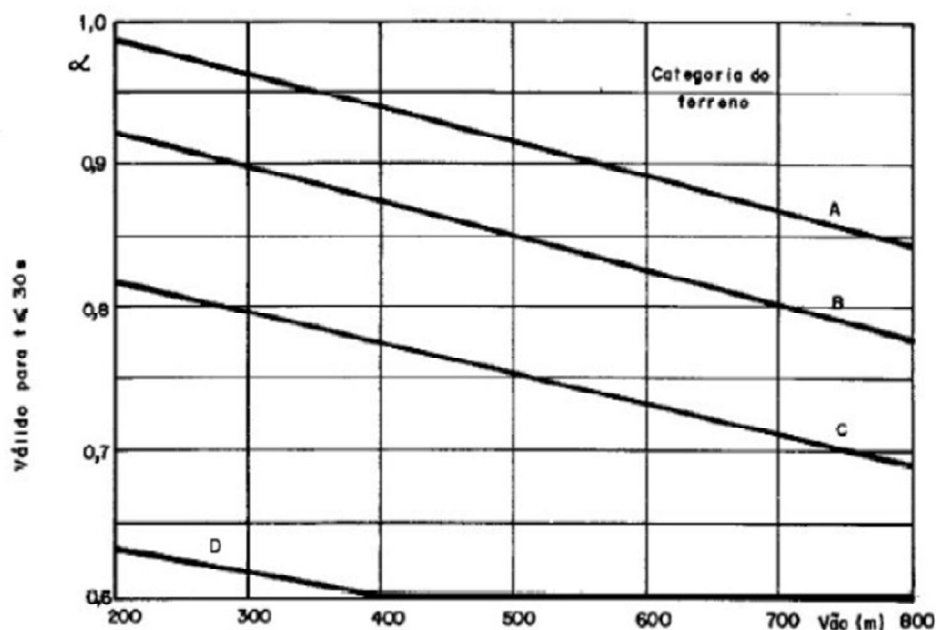


Figura 2.8: Fator de afetividade (α)

Fonte: ABNT NBR 5422 (1985).

A norma ABNT NBR 5422:1985 define quatro categorias de terreno com características distintas, como segue:

- **Categoria A:** vastas extensões de água; áreas planas costeiras; desertos planos.
- **Categoria B:** terreno aberto com poucos obstáculos.
- **Categoria C:** terreno com obstáculos numerosos e pequenos.
- **Categoria D:** áreas urbanizadas, terrenos com muitas árvores altas.

Singh (2009, p. 36) salienta que a força devida ao vento, distribuída uniformemente ao longo do condutor, aplicada na horizontal e transversalmente ao eixo longitudinal dos cabos, atuando simultaneamente com peso do condutor, fará com que a catenária se localize em um plano inclinado com um ângulo (γ), em relação ao plano vertical que passa pelo suporte (estrutura), como mostra a Figura 2.9.

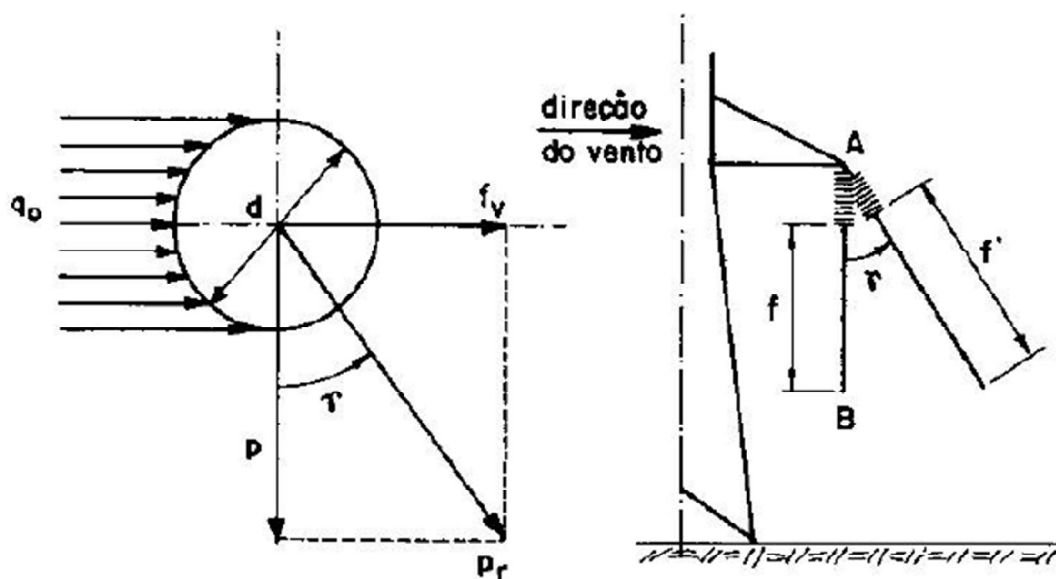


Figura 2.9: Efeito da pressão do vento sobre os condutores

Fonte: Labegalini et al (1992) apud Singh (2009, p.36).

Ainda de acordo com Singh (2009, p.36-37) para o estudo do comportamento mecânico dos cabos é necessário que se conheça além do diâmetro e peso, a carga de ruptura, o coeficiente de expansão térmica e o módulo de elasticidade, sendo que estas grandezas podem ser obtidas dos catálogos dos fabricantes.

2.2.3.4 Ação do vento nos isoladores

De acordo com a norma ABNT NBR 5422:1985 item 8.2.3 a força decorrente da ação do vento sobre os isoladores é dada pela fórmula:

$$F_i = q \cdot C_{xi} \cdot S_i \quad (2.7)$$

Onde:

F_i : é a força devido ao vento nos isoladores [N];

q : é a pressão dinâmica do vento [N/m²];

C_{xi} : é a coeficiente de arrasto, igual a 1,2;

S_i : é a área de cadeia de isoladores, projetada ortogonalmente sobre um plano vertical [m²].

2.2.3.5 Ação do vento nos suportes (estruturas)

De acordo com a norma ABNT NBR 5422:1985 item 8.2.4.2 para suportes constituídos principalmente por elementos cilíndricos ou cônicos (trancos) de diâmetro maior que 20 cm, a força do vento aplicada nos centros de gravidade dos trancos com comprimento l , é dada pela fórmula:

$$F_{TC} = q \cdot C_{xTC} \cdot \emptyset_{TC} \cdot l \cdot \sin^3 \phi \quad (2.8)$$

Onde:

F_{TC} : é a força devido ao vento nos suportes cilíndricos ou cônicos [N];

q : é a pressão dinâmica do vento [N/m²];

C_{xTC} : é a coeficiente de arrasto para um vento perpendicular ao eixo do tronco, tomado da Figura 2.10 em função do número de Reynolds (R_e) calculado através da Equação 2.9;

\emptyset_{TC} : é o diâmetro médio do tronco [m];

l : é o comprimento do tronco [m];

ϕ : é o ângulo formado pela direção do vento e o eixo do tronco [°].

$$R_e = \frac{\rho \cdot V \cdot \emptyset_{TC}}{\eta} \quad (2.9)$$

Onde:

R_e : é o número de Reynolds, adimensional;

ρ : é a massa específica do fluido (ar) [kg/m³];

V : é a velocidade média do fluido (velocidade do vento) [m/s];

\emptyset_{TC} : é o diâmetro (médio do tronco) [m];

η : é a viscosidade dinâmica do fluido (ar) [m²/s] ($\eta_{ar} = 1,45 \cdot 10^{-5}$ [m²/s] a 15 [c]).

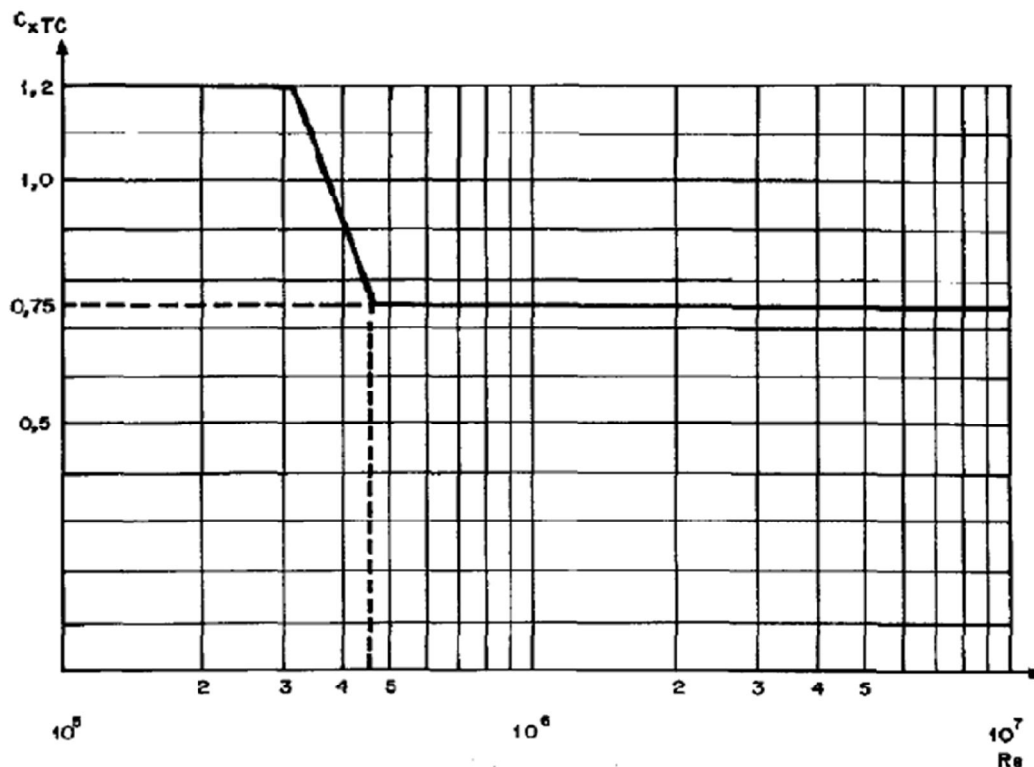


Figura 2.10: Coeficiente de arrasto para suportes compostos de elementos cilíndricos de diâmetro superior a 20 cm

Fonte: ABNT NBR 5422 (1985).

De acordo com a norma ABNT NBR 5422:1985 item 8.2.4.3 para suportes constituídos principalmente por elementos troncos piramidais a força do vento aplicada nos centros de gravidade dos troncos com comprimento l , é dada pela fórmula:

$$F_{TP} = q \cdot C_{xTP} \cdot a \cdot l \quad (2.10)$$

Onde:

F_{TP} : é a força devido ao vento nos suportes tronco-piramidais [N];

q : é a pressão dinâmica do vento [N/m²];

C_{xTP} : é a coeficiente de arrasto para um vento perpendicular à face a , tomado da Figura 2.11, em função da relação a/l , sendo b a dimensão da coluna na direção paralela ao vento, na mesma seção transversal de a ;

a : é a dimensão da coluna na face de incidência do vento, obtida da seção transversal ao nível do centro geométrico do trecho do elemento [m];

l : é o comprimento do tronco [m].

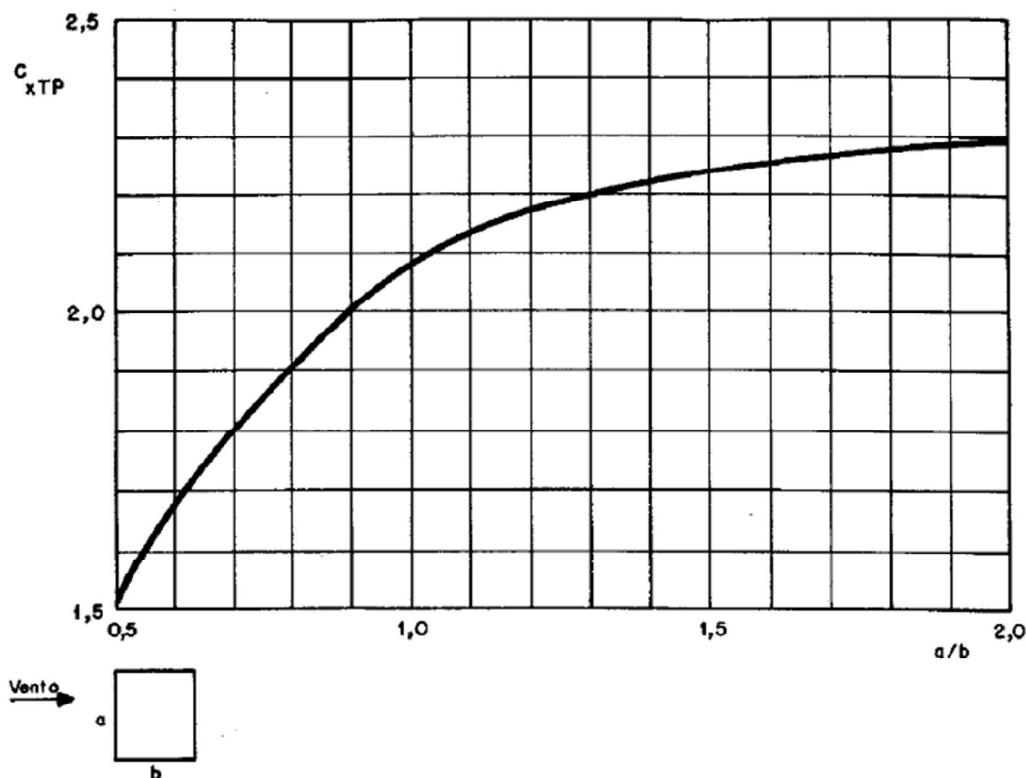


Figura 2.11: Coeficiente de arrasto para suportes constituídos de elementos prismáticos

Fonte: ABNT NBR 5422 (1985).

2.2.4 Tensão de projeto nos cabos

Como as flechas e tensão em cabos estão associados a valores de temperatura, peso do cabo e pressão do vento sob o cabo, a norma ABNT NBR 5422:1985 estabelece três condições básicas para definição da tensão de projeto, devendo-se considerar o pior caso.

- **1ª Condição:** na hipótese de velocidade máxima de vento, o esforço de tração axial nos cabos não pode ser superior a 50% da carga nominal de ruptura dos mesmos.
- **2ª Condição:** na condição de temperatura mínima, recomenda-se que o esforço de tração axial nos cabos não ultrapasse 33% da carga de ruptura dos mesmos.
- **3ª Condição:** na condição de trabalho de maior duração, caso não tenham sido adotadas medidas de proteção contra os efeitos de vibração, recomenda-se limitar o esforço de tração nos cabos aos valores máximos indicados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Cargas máximas recomendadas para cabos na condição de trabalho de maior duração, sem dispositivos de proteção contra vibração

CABOS	% DE CARGA DE RUPTURA
Aço AR	16
Aço EAR	14
Aço-cobre	14
Aço-alumínio	14
CA	21
CAA	20
CAL	18
CALA	16
CAA-EF	16

Fonte: ABNT NBR 5422 (1985).

A empresa Eletropaulo verificou que tensões de projeto a 0 [°C] superiores a 900 [daN] por condutor, tornavam o custo da rede mais elevado devido à necessidade da utilização de postes especiais de grande resistência. Como a tensão mecânica do condutor é inversamente proporcional à flecha catenária do perfil da rede, adotaram tensões admissíveis menores que resultam em flechas maiores com conseqüente redução de tensão mecânica do condutor. Por isso, a RT 2001 recomenda tensão admissível igual à 10% da tensão de ruptura do cabo.

2.3 DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS

2.3.1 Esforços verticais

Conforme AES ELETROPAULO RT 2003 os esforços verticais no poste são resultado de cargas que atuam no sentido paralelo ao eixo do poste, porém, distantes desse eixo, acarretando em esforços de compressão e flexão no poste. Isto ocorre através do peso da linha e de situações de desnível da linha.

O peso da linha é constituído pelo peso dos cabos, peso dos isoladores, peso das cruzetas, peso das ferragens, peso do eletricitista, etc..

A parcela do peso do cabo depende da configuração da linha. Caso, o poste analisado faça parte de vãos contínuos devemos considerar o peso do cabo como sendo o valor do comprimento do vão equivalente (L_{eq}) multiplicado pelo peso por metro linear do cabo. Caso, o poste analisado seja final de linha deve-se considerar o valor igual à metade da

multiplicação do comprimento do vão equivalente (L_{eq}) pelo peso por metro linear do cabo. Ou, no caso de vãos e cabos diferentes, considerar a soma das metades das multiplicações do comprimento do vão pelo peso linear de cabo de cada vão.

O vão equivalente (L_{eq}) é determinado pela seguinte expressão:

$$L_{eq} = \sqrt{\frac{L1^3+L2^3+L3^3+\dots+Ln^3}{L1+L2+L3+\dots+Ln}} \quad (2.11)$$

Onde:

L_{eq} : é o comprimento do vão equivalente [m];

$L1, L2, L3, \dots, Ln$: são os vãos correspondentes ao lançamento de um trecho da linha.

No caso de linhas de transmissão em desnível, pode-se ter além do peso um esforço adicional devido à tensão no cabo, podendo ser tanto esforço de compressão como também esforço de tração no poste, conforme o exemplo genérico simplificado apresentado na Figura 2.12.

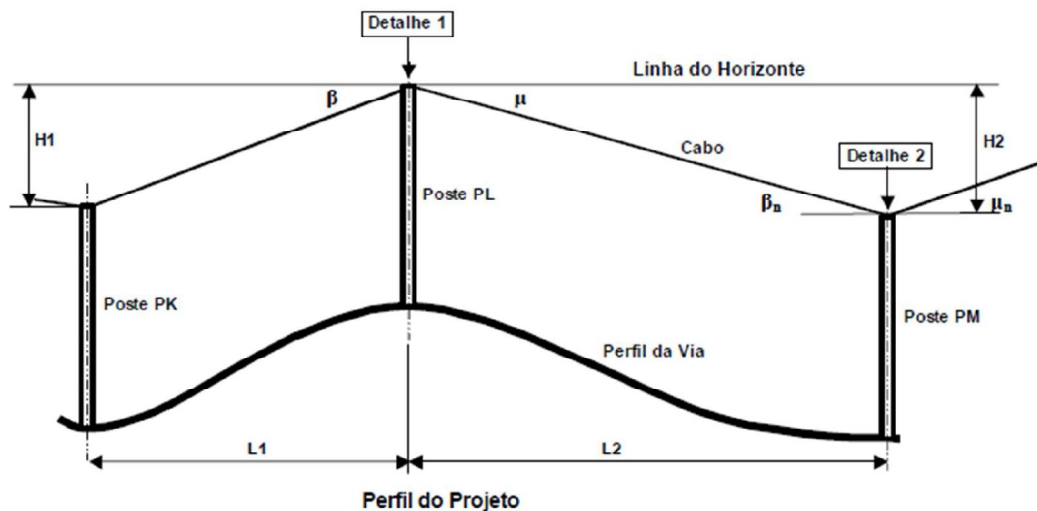


Figura 2.12: Representação genérica de trecho de linha de transmissão em desnível

Fonte: RT 2.003 – AES Eletropaulo (2003, p. 5).

No caso do poste PL (Detalhe 1), tem-se uma situação de poste comprimido pela linha, que apresenta a configuração de forças ilustrada na Figura 2.13.

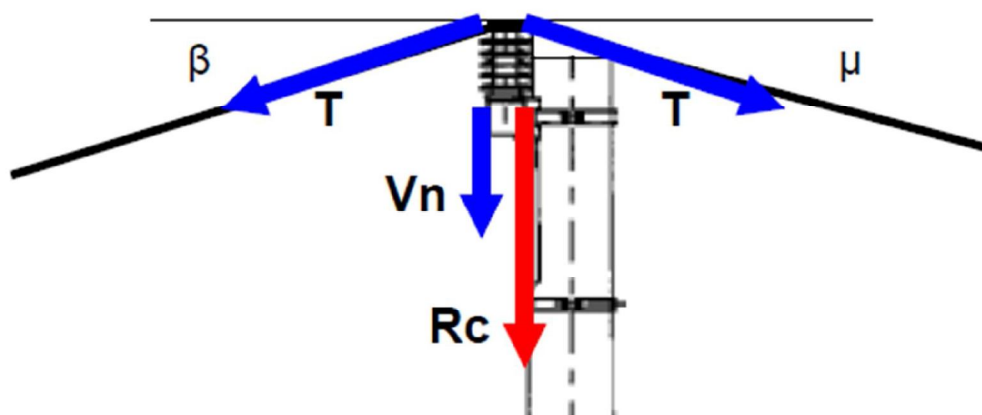


Figura 2.13: Configuração de forças de poste comprimido pela linha de transmissão

Fonte: RT 2.003 – AES Eletropaulo (2003, p. 7).

Onde:

β e μ : são ângulos do cabo com a linha horizonte, convencionando os ângulos abaixo da linha horizonte como positivos [°];

Vn : é o peso dos cabos, isoladores e acessórios [N];

T : é a tensão de projeto no cabo [N];

R_c : é a resultante das forças de compressão no poste [N].

NOTAS:

$$\sin \beta = \frac{H1}{\sqrt{(H1^2+L1^2)}} \text{ e } \sin \mu = \frac{H2}{\sqrt{(H2^2+L2^2)}}$$

$$R_c = \{T \cdot (\sin \beta + \sin \mu)\} + Vn$$

Os postes com carregamento vertical comprimindo sua seção apresentam diminuição de resistência devido ao efeito de flambagem quando a relação entre o comprimento e seção é muito grande. Estes parâmetros podem ser aferidos pela fórmula da carga crítica de flambagem de Euler (Equação 2.12). Entretanto, os postes de seção circular apresentam bons níveis de resistência à compressão e seções ocas são as mais eficientes frente ao efeito de flambagem.

$$P_{CR} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_f^2} \quad (2.12)$$

Onde:

P_{CR} : é a carga crítica de flambagem [N];

E : é o módulo de elasticidade longitudinal do material [Pa];

I : é o menor dos momentos de inércia da seção [m^4];

L_f : é o comprimento de flambagem da peça [m].

No caso do poste PM (Detalhe 2), tem-se outra situação, a de poste tracionado pela linha, que apresenta a configuração de forças ilustrada na Figura 2.14.

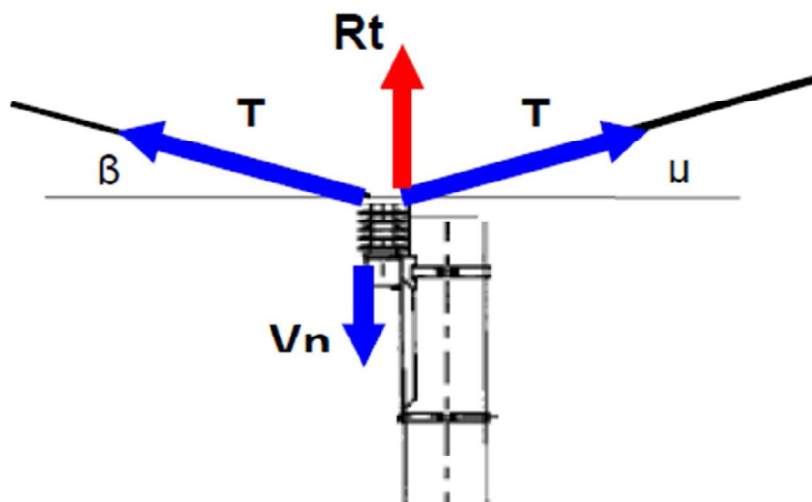


Figura 2.14: Configuração de forças de poste tracionado pela linha de transmissão

Fonte: RT 2.003 – AES Eletropaulo (2003, p. 7).

Onde:

β e μ : são ângulos do cabo com a linha horizonte, convencionando os ângulos acima da linha horizonte como negativos [°];

Vn : é o peso dos cabos, isoladores e acessórios [N];

T : é a tensão de projeto no cabo [N];

R_t : é a resultante das forças de tração no poste [N].

NOTAS:

$$R_t = \{-T \cdot (\sin \beta + \sin \mu)\} + Vn$$

Nestes casos, simplificando a favor da segurança, pode-se desprezar o valor de Vn . Também, deve ser analisada a condição de resistência ao arrancamento dos isoladores.

2.3.2 Esforços horizontais

Conforme AES ELETROPAULO RT 2003 os esforços horizontais no poste são resultado de cargas que atuam no sentido perpendicular ao eixo do poste, acarretando em esforços cortantes e de flexão no poste. Isto ocorre através da ação do vento na estrutura e de situações de mudanças de direção na linha.

No caso de resultantes provenientes de ângulos de traçado da linha de transmissão, tem-se a configuração de forças como indicado na Figura 2.15.

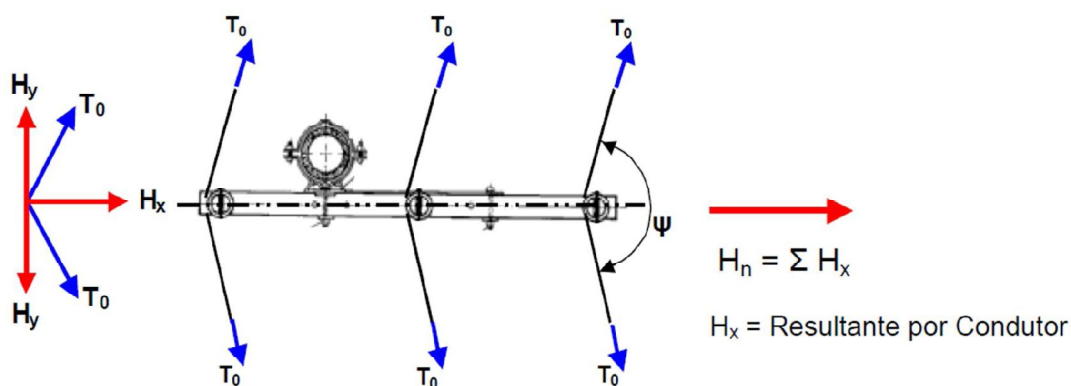


Figura 2.15: Configuração de forças em poste em ângulo da linha de transmissão

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

Onde:

ψ : ângulo da linha verificado em planta-baixa [°];

T_0 : é a tensão de projeto no cabo ($T_0 = T$) [N];

H_y : é a resultante das forças parciais no plano horizontal na direção longitudinal da linha [N];

H_x : é a resultante das forças parciais no plano horizontal na direção transversal da linha [N];

H_n : é a resultante horizontal que atuará no poste [N].

Neste caso, também se pode determinar o valor da resultante pela lei dos cossenos, como se demonstra a seguir:

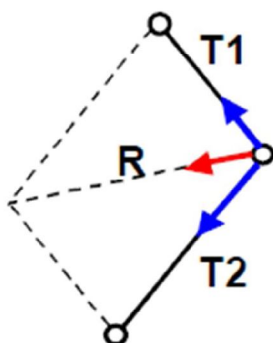


Figura 2.16: Configuração de forças em trecho de mudança de direção da linha

Fonte: RT 2.003 – AES Eletropaulo (2003, p. 9).

$$R = \sqrt{T_1^2 + T_2^2 + (2 \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \cos \psi)} \quad (2.13)$$

Onde:

R : é a resultante horizontal que atuará no poste [N];

T_1 : é a tensão de projeto no cabo do vão 1 [N];

T_2 : é a tensão de projeto no cabo do vão 2 [N];

ψ : é o ângulo interno entre T_1 e T_2 [°].

Porém, considerando o alinhamento das cruzetas na bissetriz do ângulo ψ e todas as tensões de projeto iguais a T_0 , quando os vãos são mecanicamente contínuos, fica garantido que o poste não sofrerá esforços de torção e que as somatórias das resultantes H_y se anulam, e dessa forma, tem-se apenas a resultante H_x , obtida pela expressão:

$$H_x = T_0 \cdot \sqrt{2 \cdot (1 + \cos \psi)} \quad (2.14)$$

Onde:

H_x : é a resultante por condutor de mesma bitola [N];

T_0 : é a tensão de projeto no cabo ($T_0 = T$) [N];

ψ : é o ângulo da linha verificado em planta-baixa [°].

A resultante horizontal total que atuará no poste pode ser obtida pela expressão abaixo:

$$H_n = n \cdot H_x \quad (2.15)$$

Onde:

H_n : é a resultante horizontal que atuará no poste [N];

n : é o número de condutores.

Ainda conforme AES ELETROPAULO RT 2003 quando se tem diversas forças horizontais aplicadas em diversas alturas, é preciso transferi-las para o ponto virtual de aplicação de esforços horizontais no topo do poste com o valor da força horizontal resultante que seja equivalente aos diversos momentos provocados pelas diversas forças horizontais existentes.

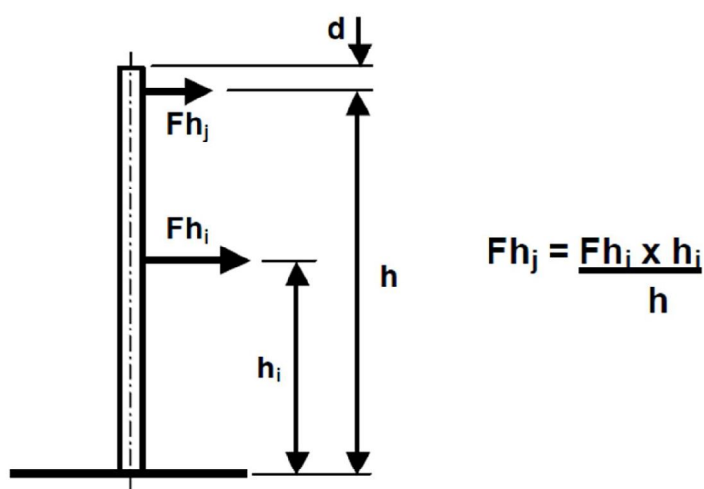


Figura 2.17: Transferência de forças horizontais para o topo do poste

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

Transferindo as forças horizontais para o ponto de aplicação virtual deve-se levar também em consideração o ângulo em planta destas componentes e através da soma vetorial (lei dos cossenos) chegar ao valor resultante da força equivalente que atua no topo do poste.

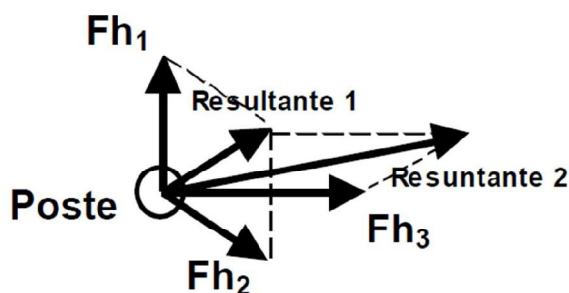


Figura 2.18: Determinação da força horizontal equivalente

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

2.3.3 Momentos fletores

A seguir é apresentado o diagrama de momentos fletores conforme definido no Anexo B da norma ABNT NBR 8451:2011.

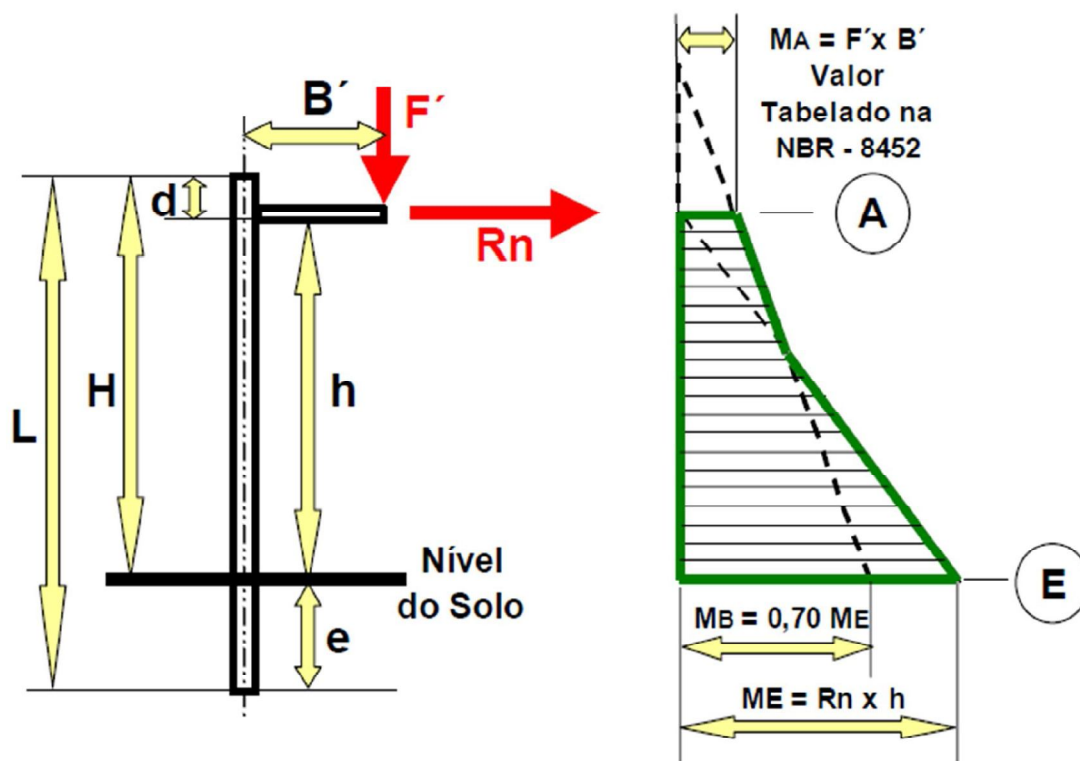


Figura 2.19: Diagrama de momento fletor estabelecido na NBR 8451:2011

Fonte: RT 2.003 – AES Eletropaulo (2003, p. 11).

Onde:

L : é o comprimento nominal do poste [m];

H : é a altura do poste [m];

h : é a altura útil do poste [m];

d : é a distância do topo do poste ao plano de aplicação de cargas ($d = 0,10 [m]$) [m];

e : é o comprimento do engaste do poste ($e = L/10 + 0,60$) [m];

R_n : é a resultante das forças horizontais ou resistência nominal do poste [N];

F' : é a resultante das forças verticais [N];

B' : é a distância do eixo do poste ao plano de aplicação de cargas [m].

De acordo com a norma ABNT NBR 8451:2011, um poste de concreto é caracterizado por três parâmetros: a resistência nominal, o comprimento nominal e o formato. O primeiro se refere ao esforço que o poste deve suportar, de forma a ser suficiente para garantir a inexistência de trincas, exceto as capilares, e obedecer a flechas limites. O segundo é a distância entre o topo e a base do poste, ou seja, a soma da altura do poste e o comprimento de engastamento. O último parâmetro é o formato do poste, que pode ser postes de seção duplo “T”, seção circular ou seção retangular.

O modelo de cálculo definido para o dimensionamento prevê um vínculo restrito (engaste) em uma das extremidades e a inexistência de vínculo na extremidade oposta.

Tendo o conhecimento do esforço atuante e da altura útil é imediato o traçado do diagrama de momento fletor atuante no poste, sendo o maior valor encontrado na superfície superior ao engaste e determinado através da Eq. 2.16. A partir da resistência nominal, também é traçado o diagrama de esforço cortante. O valor deste é constante ao longo do poste.

$$M_E = R_n \cdot h \quad (2.16)$$

Onde:

M_E : é o momento resultante da resistência nominal no plano superior do engastamento [$N \cdot m$];

R_n : é a resistência nominal do poste [N];

h : é a altura útil do poste [m].

A norma ABNT NBR 8451:2011 recomenda um superdimensionamento das seções próximas ao topo do poste. Um momento fletor nominal, com valor determinado pela Eq. 2.17, deve ser considerado no plano de aplicação dos esforços reais.

$$M_A = 0,9 \cdot M_E \cdot \frac{W_A}{W_B} \quad (2.17)$$

Onde:

M_A : é o momento resultante da resistência nominal no plano de aplicação dos esforços reais [$N \cdot m$];

M_E : é o momento resultante da resistência nominal no plano superior do engastamento [$N \cdot m$];

W_A : é o módulo de resistência do poste no plano de aplicação dos esforços reais $[m^3]$;

W_B : é o módulo de resistência do poste na seção superior ao engastamento $[m^3]$.

O módulo de resistência é a razão entre o momento de inércia e a distância do eixo da peça à região mais tracionada, como indica a Eq. 2.18. Para elementos de seções simétricas $y_{máx}$ é igual à metade da altura da seção transversal.

$$W = \frac{I}{y_{máx}} \quad (2.18)$$

Onde:

W : é o módulo de resistência $[m^3]$;

I : é o momento de inércia do elemento $[m^4]$;

$y_{máx}$: é a distância do eixo à região mais tracionada $[m]$.

A norma ABNT NBR 8451:2011 prescreve que os postes devem suportar cargas excepcionais de até 40% acima da carga nominal sem apresentar deformações residuais e/ou trincas permanentes (Cargas Excepcionais = $1,40 \cdot R_n$), e que a carga de ruptura deve ser igual ou superior a 100% acima da carga nominal (Cargas de Ruptura = $2,00 \cdot R_n$).

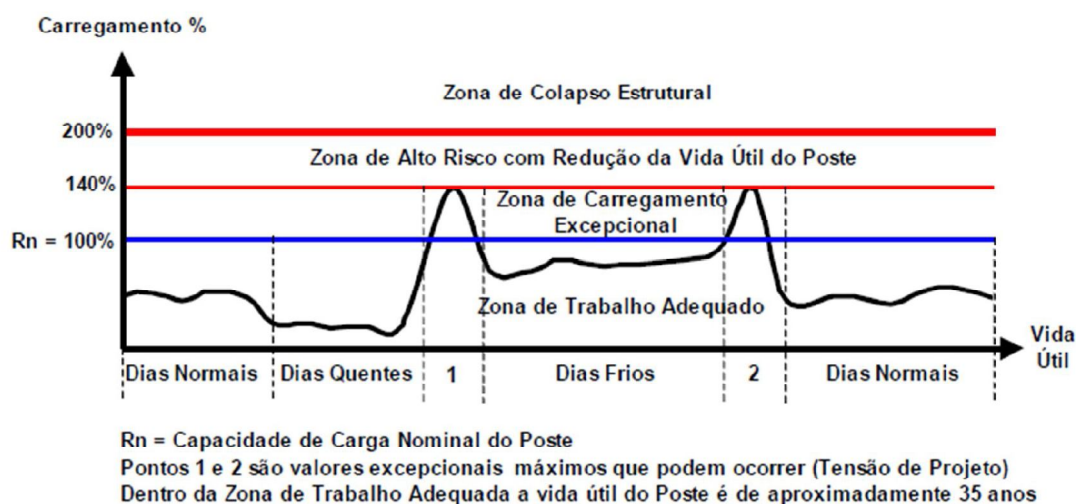


Figura 2.20: Variação de carregamento na estrutura ao longo do tempo

Fonte: RT 2.003 – AES Eletropaulo (2003, p. 13).

É indicado também no item 5.3 da norma ABNT NBR 8451:2011, que para postes de seção duplo T, a direção de menor resistência deve ser capaz de resistir à metade dos esforços atuantes na direção de maior resistência.

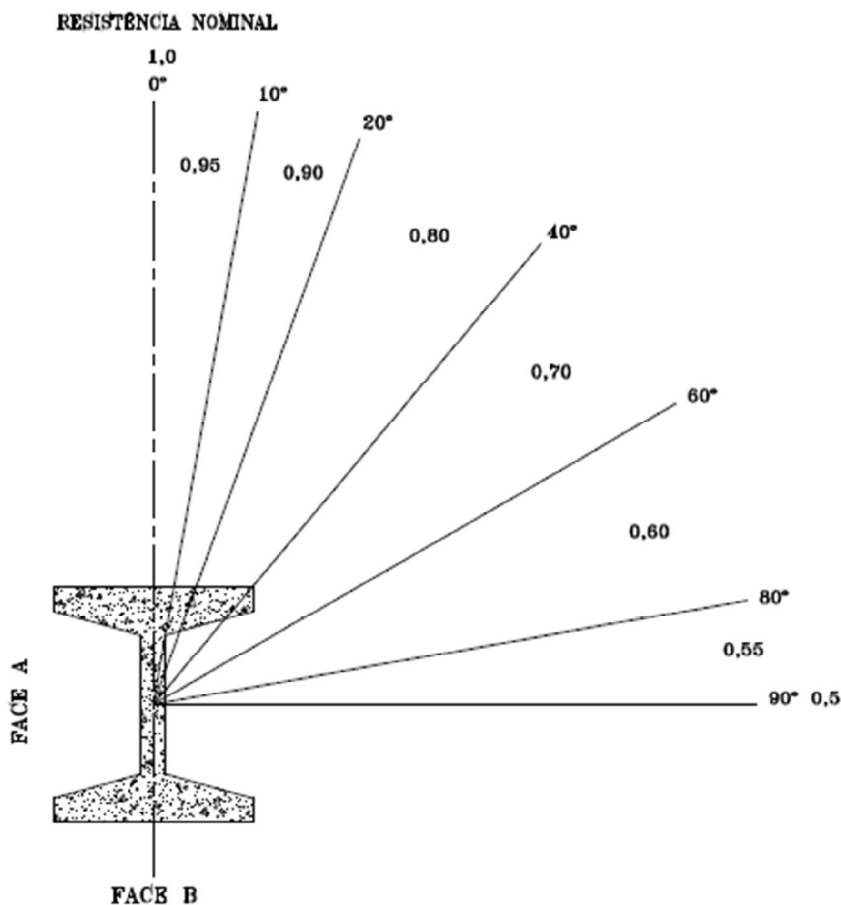


Figura 2.21: Coeficientes para redução da resistência nominal em poste de concreto armado de seção duplo “T”

Fonte: ET 300/2009 R-04 – COELCE (2009, p. 19).

2.4 DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA

Segundo GUILLOU et al. (2011, p. 5) obtido o momento de cálculo, o poste é dimensionado como um elemento linear de concreto armado sujeito à flexão simples, seguindo as recomendações da NBR 6118.

O dimensionamento de postes que possuem seção transversal duplo “T” é feito considerando uma seção “T”, e o resultado é duplicado para o lado oposto.

2.5 VERIFICAÇÕES DA ESTRUTURA

De acordo com a norma ABNT NBR 8451:2011 para o recebimento de um lote de postes, deve-se proceder a uma inspeção geral; a verificação do controle de qualidade; e a

realização de ensaios.

Os ensaios são destinados à verificação de: momento fletor no plano de aplicações dos esforços reais (M_A); elasticidade; resistência à ruptura e absorção de água.

Os requisitos específicos que os postes de concreto armado devem atender, de acordo com a ABNT NBR 8451:2011, são apresentados a seguir.

Os postes submetidos a uma força igual à resistência nominal não devem apresentar flechas, no plano de aplicação dos esforços reais, superiores a:

- 5% do comprimento nominal, quando a força for aplicada na direção de menor resistência no poste de seção duplo “T”;
- 3,5% do comprimento nominal para as demais situações.

A flecha residual, medida depois que se anula a aplicação de um esforço correspondente a 140% da resistência nominal para concreto armado e 150% para concreto protendido, no plano de aplicação dos esforços reais, não deve ser superior a:

- 0,5% do comprimento nominal, quando a força for aplicada na direção de menor resistência no poste de seção duplo “T”;
- 0,35% do comprimento nominal para as demais situações.

Todos os postes submetidos a uma tração igual à resistência nominal não devem apresentar fissuras, exceto as capilares. As fissuras que aparecerem durante a aplicação dos esforços correspondentes a 140% da resistência nominal, após a retirada deste esforço, devem fechar-se ou tornar-se capilares.

A resistência à ruptura não deve ser inferior a duas vezes a resistência nominal. Os postes simétricos de seção duplo “T” devem apresentar na direção de menor resistência, uma resistência igual a 50% da indicada para a direção de maior resistência.

O teor de absorção de água no concreto do poste não pode exceder um dos seguintes valores:

- 5,0% para a média das amostras;
- 6,5% para o corpo-de-prova.

A resistência de ruptura à compressão do concreto deve ser igual ou maior que 30 [MPa].



Figura 2.22: Ensaio de poste de concreto

Fonte: < <http://www.lem.ep.usp.br/pef2604/TerceiraAulaPEF2604.pdf>>. Acesso em: 01/07/15.

O valor teórico da flecha pode ser obtido pela expressão analítica para determinação da flecha máxima em vigas engastadas com carga concentrada na extremidade (Equação 2.19).

$$f = -\frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (2.19)$$

Onde:

f : é a flecha máxima [m];

P : é a carga concentrada [N];

L : é o comprimento do elemento estrutural [m];

E : é o módulo de elasticidade longitudinal do material [Pa];

I : é o menor dos momentos de inércia da seção [m^4].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre postes de concreto utilizados em linhas de transmissão de energia elétrica para a fundamentação teórica do problema. Os materiais de estudo utilizados foram livros, dissertações de mestrado, artigos de periódicos científicos e normas técnicas.

Após a revisão bibliográfica, foram definidos os modelos objetos de pesquisa, sendo apresentados os parâmetros geométricos, as propriedades dos materiais e também as condições de carregamento. A definição dos modelos se baseou na revisão bibliográfica e em pré-dimensionamento, com o critério de que todos os postes tivessem o mesmo momento de inércia e altura.

Sobre os modelos definidos foi feita a aplicação prática dos métodos de cálculo das normas técnicas ABNT NBR 5422:1985, ABNT NBR 6123:1988 e ABNT NBR 6118:2014, com o intuito de determinar a armadura necessária para cada caso e, ao mesmo tempo, elucidar os procedimentos de cálculo estrutural para postes de concreto armado.

Com as estruturas já dimensionadas, foram realizadas simulações tridimensionais com auxílio do programa ABAQUS® para melhor analisar o comportamento estrutural dos postes de concreto armado e para promover verificações dos requisitos específicos de serviço (ELS) que devem atender de acordo com a norma técnica ABNT NBR 8451:2011.

Com o objetivo de avaliar a precisão dos resultados e a eficiência do software utilizado, foi realizada uma análise comparativa entre os resultados de deformações obtidos pelo programa ABAQUS® com os resultados analíticos.

Por fim, os resultados obtidos para os postes de diferentes seções foram confrontados e interpretados, visando-se estabelecer parâmetros comparativos. Nesta etapa foram desenvolvidos gráficos com auxílio da ferramenta computacional Excel visando facilitar a leitura dos resultados.

3.1 CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS

As análises numéricas neste estudo correspondem a um trecho reto de uma linha de transmissão de alta tensão com suportes de mesma altura. O elemento modelado e analisado é um poste de concreto armado do tipo singelo monolítico utilizado como estrutura de

suspensão de uma linha de transmissão de 138 [kV]. Trata-se de uma estrutura autoportante intermediária de uma linha.



Figura 3.1: Aparência de estrutura típica de uma linha de transmissão de energia

Fonte: U.S.NRC NUREG-1437, Vol. 1, Cap. 4, (2011, p. 61).



Figura 3.2: Estrutura autoportante de concreto de uma linha de transmissão

Fonte: Apostila – Transmissão de Energia Elétrica – Curso Básico, (2008, p. 7).

3.1.1 Parâmetros geométricos

3.1.1.1 Parâmetros geométricos da linha de transmissão

Nos casos estudados, as características geométricas da linha são as que seguem:

- a) comprimento do vão equivalente: $L_{eq} = 100[m]$;
- b) desnível da linha de transmissão: $DN = 0,00[m]$.

3.1.1.2 Parâmetros geométricos dos postes de concreto armado

No presente trabalho, os modelos estudados diferem no formato adotado. Fixou-se a altura e o momento de inércia da seção para permitir o comparativo entre eles. Dessa forma, os postes analisados se dividem em:

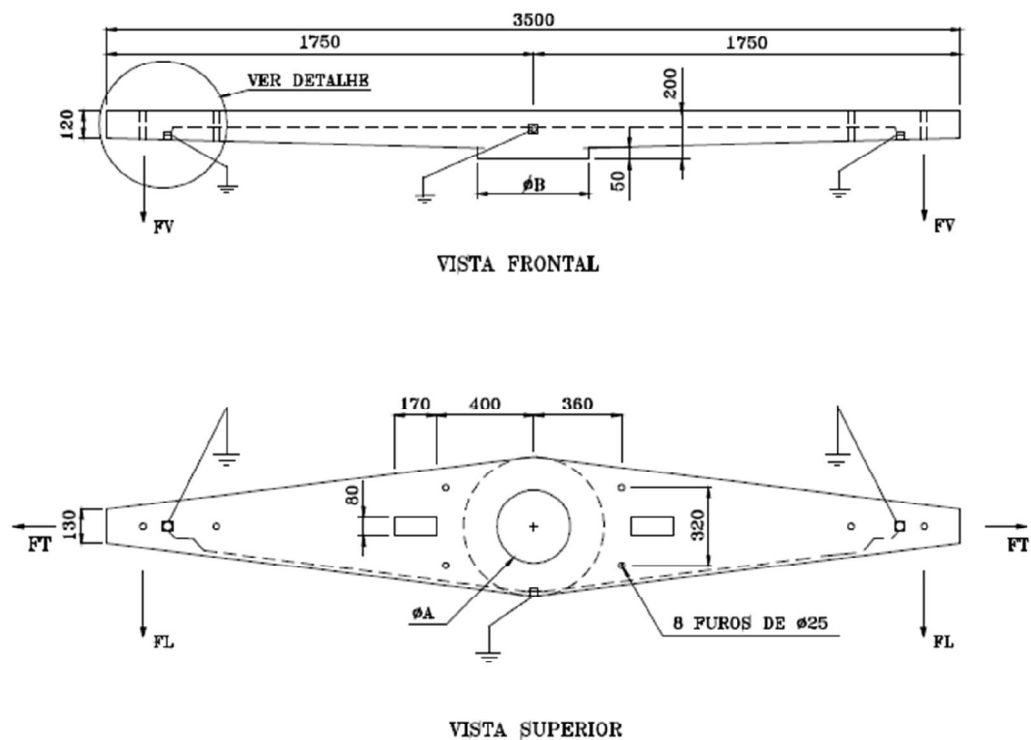
- I. seção circular vazada;
- II. seção retangular vazada;
- III. seção duplo “T”.

As dimensões dos postes são apresentadas a seguir:

- a) comprimento nominal: $L = 23[m]$;
- b) dimensões da seção circular vazada: diâmetro externo igual a 0,78 [m] e espessura do concreto igual a 0,08 [m];
- c) dimensões da seção retangular vazada: largura igual a 0,52 [m], comprimento igual a 0,72 [m] e espessura do concreto igual a 0,08 [m];
- d) dimensões da seção duplo “T”: largura igual a 0,54 [m], comprimento igual a 0,74 [m] e espessura do concreto igual a 0,08 [m].

3.1.1.3 Parâmetros geométricos das cruzetas de concreto armado

Para as cruzetas optou-se pelo modelo simples de concreto armado com 3,50 [m] de comprimento, referência COELCE DAR-44. Segue abaixo, na Figura 3.3, o desenho desta cruzeta.

**LEGENDA:**

FL = ESFORÇO LONGITUDINAL
 FT = ESFORÇO TRANSVERSAL
 FV = ESFORÇO VERTICAL

Figura 3.3: Cruzeta de concreto armado com 3500 [mm] de comprimento

Fonte: ET 314/2006 R-00 – COELCE (2006, p. 19).

3.1.2 Propriedades dos materiais

As estruturas em estudo são constituídas de concreto armado, que é associação do concreto simples com uma armadura de barras de aço CA-50. A seguir são apresentados os principais parâmetros destes materiais.

3.1.2.1 Propriedades do concreto

- a) resistência característica à compressão: $f_{ck} = 40$ [MPa];
- b) densidade: 2400 [kg/m³];
- c) módulo de elasticidade: $E = 42501,01$ [MPa];
- d) coeficiente de Poisson: $\nu = 0,2$.

3.1.2.2 Propriedades do aço da armadura

- a) resistência característica à tração: $f_{yk} = 500[\text{MPa}]$;
- b) densidade: $7850[\text{kg}/\text{m}^3]$;
- c) módulo de elasticidade: $E = 210000[\text{MPa}] = 210[\text{GPa}]$;
- d) coeficiente de Poisson: $\nu = 0,3$.

3.1.3 Parâmetros elétricos

Linha convencional de 138 [kV] de circuito duplo com seis cabos condutores de fase e dois cabos de para-raios.

3.1.3.1 Dados do cabo condutor

- a) tipo: CAA – cabo de alumínio com alma de aço;
- b) nomenclatura: Rail;
- c) diâmetro externo: $0,02961[\text{m}]$;
- d) massa linear: $1605,80[\frac{\text{kg}}{\text{km}}]$;
- e) Capacidade de corrente: $980 [\text{A}]$.

3.1.3.2 Dados do cabo para-raios

- a) tipo: Cordoalha de aço de 7 fios duplamente galvanizada;
- b) nomenclatura: EHS – extra alta resistência;
- c) diâmetro externo: $\frac{3}{8}'' = 0,00953[\text{m}]$;
- d) massa linear: $406,00[\frac{\text{kg}}{\text{km}}]$;
- e) Carga de ruptura: $7,00 [\text{tf}]$.

3.1.4 Condições de solicitação

Como condição de ação de agentes externos estabeleceu-se a incidência de vento perpendicular aos cabos (pior situação) com distribuição uniforme ao longo de todo o vão, mas não foram consideradas variações térmicas ($\Delta_T = 0$).

Para a determinação da pressão dinâmica do vento foram feitas as seguintes premissas:

- a) $V_0 = 40[\text{m}/\text{s}]$ - valor arbitrado;

- b) $S_1 = 1,00$ – terreno plano;
- c) $S_2 = 1,04$ – terreno categoria I e edificação classe B, valor obtido na Tabela 2.1;
- d) $S_3 = 0,95$ – edificação com baixo teor de ocupação, valor obtido na Tabela 2.2.

O cálculo da pressão dinâmica do vento é demonstrado a seguir:

- Velocidade característica do vento:

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

$$(\Rightarrow)V_k = 40[m/s] \cdot 1,00 \cdot 1,04 \cdot 0,95(\Rightarrow)$$

$$(\Rightarrow)V_k = 39,52[m/s]$$

- Pressão dinâmica do vento:

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 = 0,613 \cdot 39,52^2 = 957,40[N/m^2]$$

3.1.5 Condições de contorno

Consideraram-se os postes de concreto com vinculação engastada com comprimento de engaste “e” igual a:

$$e = 0,1 \cdot L + 0,60 = 0,1 \cdot 23[m] + 0,60 = 2,90[m].$$

4 EXEMPLOS NUMÉRICOS

Neste capítulo é feita a aplicação prática dos métodos de cálculo para postes de concreto armado empregados em linhas de transmissão de energia elétrica para os casos objeto de estudo.

4.1 CASO I: SEÇÃO CIRCULAR VAZADA

4.1.1 Determinação das ações verticais

- Peso próprio do poste:

$$p \cdot p_{\text{poste}} = 25[kN/m^3] \cdot 4,04[m^3] = 101,00[kN]$$

- Peso próprio de cada cruzeta:

$$p \cdot p_{\text{cruzeta}} = 25[kN/m^3] \cdot 0,15[m^3] = 3,75[kN]$$

- Peso de cada cabo condutor de fase:

$$p \cdot p_{\text{condutor}} = 1605,80[kg/km] \cdot 0,10[km] = 160,58[kg] = 1,57[kN]$$

- Peso de cada cabo para-raios:

$$p \cdot p_{\text{pararaios}} = 406,00[kg/km] \cdot 0,10[km] = 40,60[kg] = 0,40[kN]$$

- Somatório das forças verticais atuantes na estrutura:

$$P = 101,00[kN] + 3 \cdot 3,75[kN] + 6 \cdot k_1 \cdot 1,57[kN] + 2 \cdot k_1 \cdot 0,40[kN] (=)$$

$$(=) P = 101,00[kN] + 3 \cdot 3,75[kN] + 6 \cdot 1,15 \cdot 1,57[kN] + 2 \cdot 1,15 \cdot 0,40[kN]$$

$$\therefore P = 124,00[kN]$$

4.1.2 Determinação das ações horizontais

- Ação do vento nos cabos para-raios:

$$F_c = q \cdot C_{xc} \cdot \alpha \cdot \phi_c \cdot \frac{Z}{2} \cdot \sin^2 \theta (=)$$

$$(=) F_c = 957,40 \cdot 1,00 \cdot 0,92 \cdot 0,00953 \cdot \frac{100}{2} \cdot \sin^2 90^\circ (=)$$

$$(=) F_c = 419,71[N] = 0,42[kN]$$

NOTAS:

$\alpha = 0,92$ - Valor obtido do diagrama da Figura 2.8 para terreno categoria B.

➤ Ação do vento nos cabos condutores:

$$F_c = q \cdot C_{xc} \cdot \alpha \cdot \phi_c \cdot \frac{Z}{2} \cdot \sin^2 \theta (=)$$

$$(\Rightarrow) F_c = 957,40 \cdot 1,00 \cdot 0,92 \cdot 0,02961 \cdot \frac{100}{2} \cdot \sin^2 90^\circ (=)$$

$$(\Rightarrow) F_c = 1304,03[N] = 1,30[kN]$$

➤ Ação do vento no poste:

$$F_{TC} = q \cdot C_{xTC} \cdot \phi_{TC} \cdot l \cdot \sin^3 \phi (=)$$

$$(\Rightarrow) F_{TC} = 957,40 \cdot 0,75 \cdot 0,78 \cdot 20,10 \cdot \sin^3 90^\circ (=)$$

$$(\Rightarrow) F_{TC} = 11257,59[N] = 11,26[kN]$$

NOTAS:

$C_{xTC} = 0,75$ - Valor obtido do diagrama da Figura 2.10 a partir do número de Reynolds.

Cálculo auxiliar (Número de Reynolds):

$$R_e = \frac{\rho \cdot V \cdot \phi_{TC}}{\eta} = \frac{2 \cdot 0,613 \cdot 39,52 \cdot 0,78}{1,45 \cdot 10^{-5}} = 2,60 \cdot 10^6$$

➤ Transferência da força global do vento atuante no poste para o seu topo:

$$F_{hj} = \frac{F_{hi} \cdot h_i}{h_j} = \frac{11,26 \cdot 10,05}{19,90} = 5,69[kN]$$

➤ Somatório das forças horizontais atuantes na estrutura:

$$R_n = 5,69[kN] + 2 \cdot 2 \cdot 0,42[kN] + 6 \cdot 2 \cdot 1,30[kN](=)$$

$$\therefore R_n = 22,97[kN] = 22,97[daN]$$

NOTAS:

A unidade decaNewton (daN) é uma unidade de força e equivale à dez Newtons (10 N). Esta é a unidade usualmente adotada por fabricantes e concessionárias de energia para representar a resistência nominal dos postes de concreto armado e classificá-los. Tem-se tornado frequente a utilização do decaNewton (daN) por ser uma forma de usar uma unidade

do Sistema Internacional (SI) que equivale a aproximadamente um quilograma-força (1 kgf).

4.1.3 Determinação dos esforços

➤ Força cortante:

$$V_s = 22,97[kN]$$

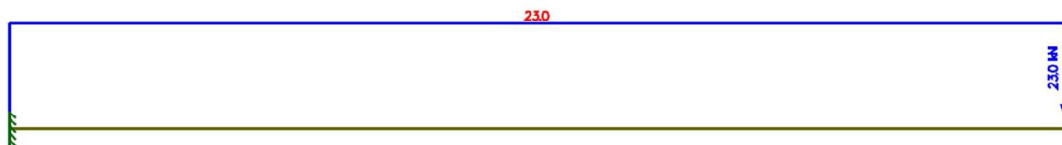


Figura 4.1: Diagrama de força cortante obtido com o software FTool V 2.12

Fonte: Autoria própria.

➤ Momento fletor:

$$M_E = R_n \cdot h = 22,97 \cdot 20,10 = 461,09[kN \cdot m] = 46109,40[kN \cdot cm]$$

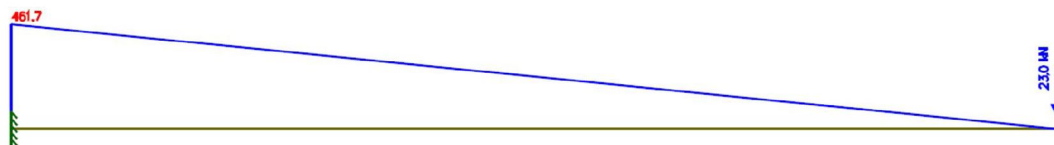


Figura 4.2: Diagrama de momento fletor obtido com o software FTool V 2.12

Fonte: Autoria própria.

➤ Momento no topo do poste:

$$M_A = 0,9 \cdot M_E \cdot \frac{W_A}{W_B} = 0,9 \cdot 461,09 \cdot 1 = 414,98[kN \cdot m] = 41498,10[kN \cdot cm]$$

NOTAS:

O poste é regular, isto é, a seção mantém-se constante ao longo da altura. Dessa forma, os módulos de resistência da seção na base e no topo são iguais.

A cruzeta é simétrica e, portanto, os momentos no plano de aplicação dos esforços se anulam.

A armadura longitudinal calculada para o maior momento será distribuída em toda extensão do poste.

4.1.4 Verificação da flambagem:

$$P_{CR} = \frac{\pi \cdot E \cdot I}{L_f^2} (=)$$

$$(\Rightarrow) P_{CR} = \frac{\pi \cdot 42501010000 \cdot 0,0109}{(2 \cdot 20,10)^2} = 900125,97[\text{N}] = 900,13[\text{kN}]$$

$$P = 124,00[\text{kN}] < P_{CR} = 900,13[\text{kN}] \rightarrow \mathbf{OK!}$$

Cálculo auxiliar (momento de inércia da seção):

$$I = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (0,78^4 - 0,62^4)}{64} = 0,0109[\text{m}^4]$$

4.1.5 Determinação da armadura longitudinal

➤ Dimensionamento através dos diagramas de interação de Montoya et al.:

$$\nu = \frac{N_d}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{124,00}{1758,40 \cdot \frac{4,00}{1,40}} = 0,025$$

$$\mu = \frac{M_d}{A_c \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{1,40 \cdot 46109,40}{1758,40 \cdot 78,00 \cdot \frac{4,00}{1,40}} = 0,16$$

$$\nu = 0,025; \mu = 0,16 \rightarrow \omega = 0,40$$

$$\omega = \frac{A_{tot} \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}} (=)$$

$$(\Rightarrow) 0,40 = \frac{A_{tot} \cdot \frac{50}{1,15}}{1758,40 \cdot \frac{4,00}{1,40}} (=)$$

$$(\Rightarrow) A_{tot} = 46,22[\text{cm}^2]$$

Solução adotada: 15 Ø 20[mm], que equivale a 47,10[cm²].

4.1.6 Determinação da armadura transversal

➤ Verificação da compressão na biela:

$$V_{Sd} = 1,4 \cdot 22,97 = 32,16[\text{kN}]$$

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{25}\right) \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d (=)$$

$$(\Rightarrow)V_{Rd2} = 0,27 \cdot \left(1 - \frac{4,0}{25}\right) \cdot \frac{4,0}{1,4} \cdot 78 \cdot 73,5 = 3714,98[kN]$$

$$\therefore V_{Sd} \leq V_{Rd2} \rightarrow \mathbf{OK!}$$

Cálculo auxiliar (estimativa da altura útil):

$$d = h - c - \phi_t - \frac{\phi_l}{2} = 78,00 - 2,50 - 1,00 - \frac{2,00}{2} = 73,5[cm]$$

➤ Força cortante relativa à armadura transversal mínima:

$$V_{Sw,min} = \rho_{Sw,min} \cdot 0,9 \cdot b_w \cdot d \cdot f_{ywd} = \frac{0,1404}{100} \cdot 0,9 \cdot 78 \cdot 73,5 \cdot \frac{50}{1,15} = 314,97[kN]$$

$$V_C = 0,09 \cdot f_{ck}^{2/3} \cdot b_w \cdot d = 0,09 \cdot 4,0^{2/3} \cdot 78 \cdot 73,5 = 1300,16[kN]$$

$$V_{Sd,min} = V_{Sw,min} + V_C = 314,97[kN] + 1300,16[kN] = 1615,13[kN]$$

$$V_{Sd} \ll V_{Sd,min} \rightarrow a_{Sw} = a_{Sw,min}$$

NOTAS:

$\rho_{Sw,min} = 0,1404\%$ - Valor para concreto C40 e aço CA-50.

➤ Cálculo da armadura:

$$a_{Sw,min} = \frac{A_{Sw}}{s} = \rho_{Sw,min} \cdot b_w = \frac{0,1404}{100} \cdot 78 = 0,110[cm^2/cm]$$

$$\frac{A_{Sw}}{s} = 0,110[cm^2/cm](=)$$

$$(=)A_{Sw} = 0,110[cm^2] \cdot s(=)$$

$$(=)A_{Sw} = 0,110[cm^2/cm] \cdot 14[cm](=)$$

$$(=)A_{Sw} = 1,54 [cm^2]$$

Solução adotada: ϕ_t 10[mm], que com dois ramos equivale a 1,57[cm²].

4.1.7 Detalhamento da armadura

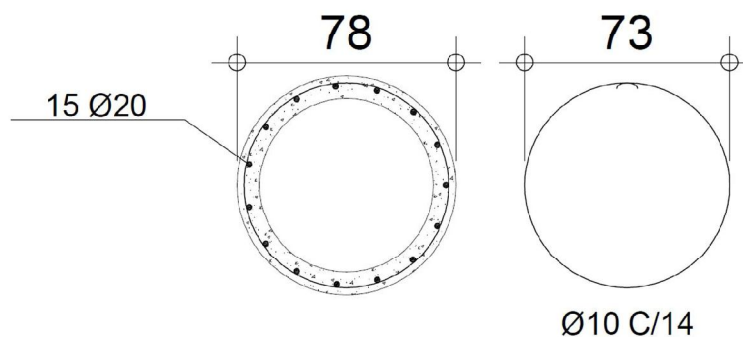


Figura 4.3: Detalhamento armadura com seção circular vazada

Fonte: Autoria própria.

4.2 CASO II: SEÇÃO RETANGULAR VAZADA

4.2.1 Determinação das ações verticais

- Peso próprio do poste:

$$p \cdot p_{\text{poste}} = 25[kN/m^3] \cdot 3,97[m^3] = 99,25[kN]$$

- Peso próprio de cada cruzeta:

Idem seção circular vazada.

- Peso de cada cabo condutor de fase:

Idem seção circular vazada.

- Peso de cada cabo para-raios:

Idem seção circular vazada.

- Somatório das forças verticais atuantes na estrutura:

$$P = 99,25[kN] + 3 \cdot 3,75[kN] + 6 \cdot k_1 \cdot 1,57[kN] + 2 \cdot k_1 \cdot 0,40[kN] (=)$$

$$(=) P = 99,25[kN] + 3 \cdot 3,75[kN] + 6 \cdot 1,15 \cdot 1,57[kN] + 2 \cdot 1,15 \cdot 0,40[kN]$$

$$\therefore P = 122,25[kN]$$

4.2.2 Determinação das ações horizontais

- Ação do vento nos cabos para-raios:

Idem seção circular vazada.

- Ação do vento nos cabos condutores:

Idem seção circular vazada.

- Ação do vento no poste:

$$F_{TP} = q \cdot C_{xTP} \cdot a \cdot l(=)$$

$$(=)F_{TC} = 957,40 \cdot 1,80 \cdot 0,52 \cdot 20,10 \cdot \sin^3 90^\circ (=)$$

$$(=)F_{TC} = 18,01[kN]$$

NOTAS:

$C_{xTP} = 1,80$ - Valor obtido do diagrama da Figura 2.11 a partir da relação a/b.

- Transferência da força global do vento atuante no poste para o seu topo:

$$F_{hj} = \frac{F_{hi} \cdot h_i}{h_j} = \frac{18,01 \cdot 10,05}{19,90} = 9,10[kN]$$

- Somatório das forças horizontais atuantes na estrutura:

$$R_n = 9,10[kN] + 2 \cdot 2 \cdot 0,42[kN] + 6 \cdot 2 \cdot 1,30[kN](=)$$

$$\therefore R_n = 26,38[kN] = 2638[daN]$$

4.2.3 Determinação dos esforços

- Força cortante:

$$V_s = 26,38[kN]$$

- Momento fletor:

$$M_E = R_n \cdot h = 26,38 \cdot 20,10 = 530,24[kN \cdot m] = 53023,80[kN \cdot cm]$$

- Momento no topo do poste:

$$M_A = 0,9 \cdot M_E \cdot \frac{W_A}{W_B} = 0,9 \cdot 530,24 \cdot 1 = 477,22[kN \cdot m] = 47721,60[kN \cdot cm]$$

4.2.4 Verificação da flambagem:

$$P_{CR} = \frac{\pi \cdot E \cdot I}{L_f^2} (=)$$

$$(=)P_{CR} = \frac{\pi \cdot 42501010000 \cdot 0,0109}{(2 \cdot 20,10)^2} = 900125,97[N] = 900,13[kN]$$

$$P = 122,25[kN] < P_{CR} = 900,13[kN] \rightarrow \mathbf{Ok!}$$

Cálculo auxiliar (momento de inércia da seção):

$$I = \frac{B \cdot H^3 - b \cdot h^3}{12} = \frac{0,52 \cdot 0,72^3 - 0,36 \cdot 0,56^3}{12} = 0,0109[m^4]$$

4.2.5 Determinação da armadura longitudinal

➤ Dimensionamento através dos diagramas de interação de Montoya et al.:

$$\nu = \frac{N_d}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{122,25}{1728,00 \cdot \frac{4,00}{1,40}} = 0,025$$

$$\mu = \frac{M_d}{A_c \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{1,40 \cdot 53023,80}{1728,00 \cdot 52,00 \cdot \frac{4,00}{1,40}} = 0,29$$

$$\nu = 0,025; \mu = 0,29 \rightarrow \omega = 0,70$$

$$\omega = \frac{A_{tot} \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}} (=)$$

$$(\Rightarrow) 0,70 = \frac{A_{tot} \cdot \frac{50}{1,15}}{1728,00 \cdot \frac{4,00}{1,40}} (=)$$

$$(\Rightarrow) A_{tot} = 79,49[cm^2]$$

$$A = \frac{A_{tot}}{4} = \frac{79,49}{4} = 19,87[cm^2]$$

Solução adotada: 7 Ø 20[mm] por lateral, que equivale a 21,98 [cm²] por lateral.

NOTAS:

A norma ABNT NBR 8451:2011 indica que os postes de concreto armado devem resistir ao momento fletor nominal em qualquer direção e sentido considerado. Por essa razão, para o poste de seção retangular vazada a armadura longitudinal foi calculada no sentido da menor rigidez da seção.

4.2.6 Determinação da armadura transversal

➤ Verificação da compressão na biela:

$$V_{Sd} = 1,4 \cdot 26,38 = 36,93[kN]$$

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{25}\right) \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d(=)$$

$$(\Rightarrow)V_{Rd2} = 0,27 \cdot \left(1 - \frac{4,0}{25}\right) \cdot \frac{4,0}{1,4} \cdot 52 \cdot 47,5 = 1600,56[kN]$$

$$\therefore V_{Sd} \leq V_{Rd2} \rightarrow \mathbf{OK!}$$

Cálculo auxiliar (estimativa da altura útil):

$$d = h - c - \phi_t - \frac{\phi_l}{2} = 52,00 - 2,50 - 1,00 - \frac{2,00}{2} = 47,5[cm]$$

➤ Força cortante relativa à armadura transversal mínima:

$$V_{Sw,min} = \rho_{Sw,min} \cdot 0,9 \cdot b_w \cdot d \cdot f_{ywd} = \frac{0,1404}{100} \cdot 0,9 \cdot 72 \cdot 47,5 \cdot \frac{50}{1,15} = 187,89[kN]$$

$$V_C = 0,09 \cdot f_{ck}^{2/3} \cdot b_w \cdot d = 0,09 \cdot 4,0^{2/3} \cdot 72 \cdot 47,5 = 775,61[kN]$$

$$V_{Sd,min} = V_{Sw,min} + V_C = 187,89[kN] + 775,61[kN] = 963,50[kN]$$

$$V_{Sd} \ll V_{Sd,min} \rightarrow a_{Sw} = a_{Sw,min}$$

NOTAS:

$\rho_{Sw,min} = 0,1404\%$ - Valor para concreto C40 e aço CA-50.

➤ Cálculo da armadura:

$$a_{Sw,min} = \frac{A_{Sw}}{s} = \rho_{Sw,min} \cdot b_w = \frac{0,1404}{100} \cdot 72 = 0,101[cm^2/cm]$$

$$\frac{A_{Sw}}{s} = 0,101[cm^2/cm](=)$$

$$(=)A_{Sw} = 0,101[cm^2] \cdot s(=)$$

$$(=)A_{Sw} = 0,101[cm^2/cm] \cdot 15[cm](=)$$

$$(=)A_{Sw} = 1,52 [cm^2]$$

Solução adotada: ϕ_t 10[mm], que com dois ramos equivale a 1,57[cm²].

4.2.7 Detalhamento da armadura

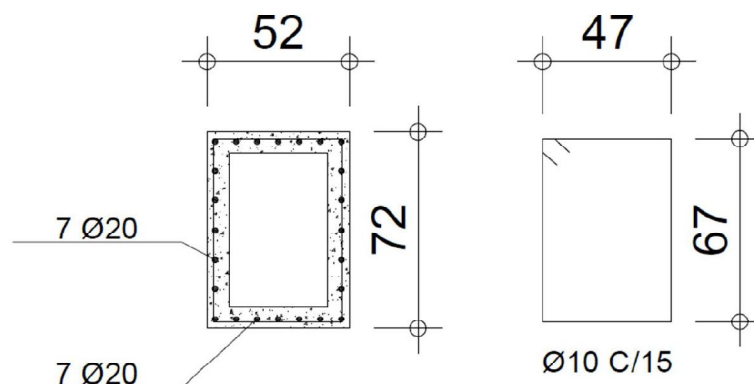


Figura 4.4: Detalhamento armadura com seção retangular vazada

Fonte: Autoria própria.

4.3 CASO III: SEÇÃO DUPLO “T”

4.3.1 Determinação das ações verticais

- Peso próprio do poste:

$$p \cdot p_{\text{poste}} = 25[kN/m^3] \cdot 3,05[m^3] = 76,25[kN]$$

- Peso próprio de cada cruzeta:

Idem seção circular vazada.

- Peso de cada cabo condutor de fase:

Idem seção circular vazada.

- Peso de cada cabo para-raios:

Idem seção circular vazada.

- Somatório das forças verticais atuantes na estrutura:

$$P = 76,25[kN] + 3 \cdot 3,75[kN] + 6 \cdot k_1 \cdot 1,57[kN] + 2 \cdot k_1 \cdot 0,40[kN] (=)$$

$$(=) P = 76,25[kN] + 3 \cdot 3,75[kN] + 6 \cdot 1,15 \cdot 1,57[kN] + 2 \cdot 1,15 \cdot 0,40[kN]$$

$$\therefore P = 99,25[kN]$$

4.3.2 Determinação das ações horizontais

- Ação do vento nos cabos para-raios:

Idem seção circular vazada.

- Ação do vento nos cabos condutores:

Idem seção circular vazada.

- Ação do vento no poste:

$$F_{TP} = q \cdot C_{xTP} \cdot a \cdot l(=)$$

$$(=)F_{TC} = 957,40 \cdot 1,95 \cdot 0,54 \cdot 20,10 \cdot \sin^3 90^\circ (=)$$

$$(=)F_{TC} = 20,26[kN]$$

NOTAS:

$C_{xTP} = 1,95$ - Valor obtido do diagrama da Figura 2.11 a partir da relação a/b.

- Transferência da força global do vento atuante no poste para o seu topo:

$$F_{hj} = \frac{F_{hi} \cdot h_i}{h_j} = \frac{20,26 \cdot 10,05}{19,90} = 10,23[kN]$$

- Somatório das forças horizontais atuantes na estrutura:

$$R_n = 10,23[kN] + 2 \cdot 2 \cdot 0,42[kN] + 6 \cdot 2 \cdot 1,30[kN](=)$$

$$\therefore R_n = 27,51[kN] = 2751[daN]$$

4.3.3 Determinação dos esforços

- Força cortante:

$$V_s = 27,51[kN]$$

- Momento fletor:

$$M_E = R_n \cdot h = 27,51 \cdot 20,10 = 552,95[kN \cdot m] = 55295,10[kN \cdot cm]$$

- Momento no topo do poste:

$$M_A = 0,9 \cdot M_E \cdot \frac{W_A}{W_B} = 0,9 \cdot 552,95 \cdot 1 = 497,66[kN \cdot m] = 49765,50[kN \cdot cm]$$

4.3.4 Verificação da flambagem:

$$P_{CR} = \frac{\pi \cdot E \cdot I}{L_f^2}(=)$$

$$(=)P_{CR} = \frac{\pi \cdot 42501010000 \cdot 0,0108}{(2 \cdot 20,10)^2} = 891867,93[N] = 891,87[kN]$$

$$P = 99,25[kN] < P_{CR} = 891,87[kN] \rightarrow \mathbf{OK!}$$

Cálculo auxiliar (momento de inércia da seção):

$$I = \frac{B \cdot H^3 - b \cdot h^3}{12} = \frac{0,54 \cdot 0,74^3 - 0,46 \cdot 0,58^3}{12} = 0,0108[m^4]$$

4.3.5 Determinação da armadura longitudinal

➤ Estimativa da altura útil:

$$d = h - c - \phi_t - \frac{\phi_l}{2} = 74,00 - 2,50 - 0,80 - \frac{2}{2} = 69,70[cm]$$

➤ Cálculo da primeira parcela do momento fletor resistente:

$$M_{1d} = (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot (d - 0,5 \cdot h_f)(=)$$

$$(=)M_{1d} = (54,00 - 8,00) \cdot 8,00 \cdot 0,85 \cdot \frac{4,00}{1,40} \cdot (69,70 - 0,5 \cdot 8,00)(=)$$

$$(=)M_{1d} = 58717,03[kN \cdot cm]$$

➤ Cálculo da segunda parcela do momento fletor resistente:

$$M_{2d} = M_d - M_{1d}(=)$$

$$(=)M_{2d} = 1,4 \cdot 55295,10 - 58717,03(=)$$

$$(=)M_{2d} = 77413,14 - 58717,03(=)$$

$$(=)M_{2d} = 18696,11[kN \cdot cm]$$

➤ Posição da linha neutra:

$$M_{2d} = 0,68 \cdot f_{cd} \cdot x \cdot b_w \cdot (d - 0,4 \cdot x)(=)$$

$$(=)18696,11 = 0,68 \cdot \frac{4,00}{1,40} \cdot x \cdot 8,00 \cdot (69,70 - 0,4 \cdot x)(=)$$

$$(=)18696,11 = 15,54 \cdot x \cdot (69,70 - 0,4 \cdot x)(=)$$

$$(=)18696,11 = 1083,14 \cdot x - 6,22 \cdot x^2(=)$$

$$(=)6,22 \cdot x^2 - 1083,14 \cdot x + 18696,11 = 0 \rightarrow x = 19,43[cm]$$

➤ Verificação do domínio:

$$x_{2,lim} = 0,259 \cdot d = 0,259 \cdot 69,70 = 18,05[cm]$$

$$x_{3,lim} = 0,628 \cdot d = 0,628 \cdot 69,70 = 43,77[cm]$$

$$x_{2,lim} < x \leq x_{3,lim} \rightarrow \text{Domínio 3} \rightarrow \mathbf{Ok!}$$

- Cálculo da armadura:

$$A_{s1} = \frac{M_{1d}}{f_{yd} \cdot (d - 0,5 \cdot h_f)} = \frac{58717,03}{\frac{50}{1,15} \cdot (69,70 - 0,5 \cdot 8,00)} = 20,56[\text{cm}^2]$$

$$A_{s2} = \frac{M_{2d}}{f_{yd} \cdot (d - 0,4 \cdot x)} = \frac{18696,11}{\frac{50}{1,15} \cdot (69,70 - 0,4 \cdot 19,43)} = 6,94[\text{cm}^2]$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 20,56 + 6,94 = 27,50[\text{cm}^2]$$

Solução adotada: 9 Ø 20[mm], que equivale a 28,27[cm²].

4.3.6 Determinação da armadura transversal

- Verificação da compressão na biela:

$$V_{Sd} = 1,4 \cdot 27,51 = 38,51[\text{kN}]$$

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{25}\right) \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d(=)$$

$$(=) V_{Rd2} = 0,27 \cdot \left(1 - \frac{4,0}{25}\right) \cdot \frac{4,0}{1,4} \cdot 54 \cdot 69,70 = 2438,94[\text{kN}]$$

$$\therefore V_{Sd} \leq V_{Rd2} \rightarrow \mathbf{Ok!}$$

- Força cortante relativa à armadura transversal mínima:

$$V_{Sw,min} = \rho_{Sw,min} \cdot 0,9 \cdot b_w \cdot d \cdot f_{ywd} = \frac{0,1404}{100} \cdot 0,9 \cdot 54 \cdot 69,70 \cdot \frac{50}{1,15} = 206,78[\text{kN}]$$

$$V_C = 0,09 \cdot f_{ck}^{2/3} \cdot b_w \cdot d = 0,09 \cdot 4,0^{2/3} \cdot 54 \cdot 69,70 = 853,58[\text{kN}]$$

$$V_{Sd,min} = V_{Sw,min} + V_C = 206,78[\text{kN}] + 853,58[\text{kN}] = 1060,36[\text{kN}]$$

$$V_{Sd} \ll V_{Sd,min} \rightarrow a_{Sw} = a_{Sw,min}$$

NOTAS:

$\rho_{Sw,min} = 0,1404\%$ - Valor para concreto C40 e aço CA-50.

- Cálculo da armadura:

$$a_{Sw,min} = \frac{A_{Sw}}{s} = \rho_{Sw,min} \cdot b_w = \frac{0,1404}{100} \cdot 54 = 0,076[\text{cm}^2/\text{cm}]$$

$$\frac{A_{Sw}}{s} = 0,076[\text{cm}^2/\text{cm}](=)$$

$$(\Rightarrow) A_{sw} = 0,076[cm^2] \cdot s(\Rightarrow)$$

$$(\Rightarrow) A_{sw} = 0,076[cm^2/cm] \cdot 13[cm](\Rightarrow)$$

$$(\Rightarrow) A_{sw} = 0,99 [cm^2]$$

Solução adotada: $\varnothing_t 8,00[mm]$, que com dois ramos equivale a $1,01[cm^2]$.

4.3.7 Detalhamento da armadura

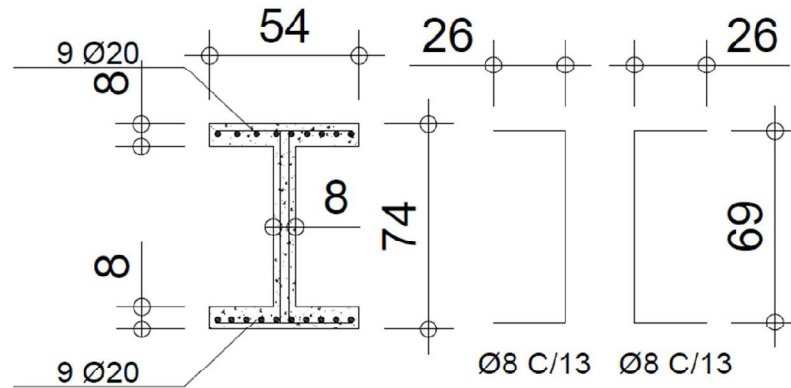


Figura 4.5: Detalhamento armadura com seção duplo "T"

Fonte: Autoria própria.

5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Neste capítulo são apresentadas as simulações numéricas tridimensionais dos postes de concreto armado objetos de estudo, realizadas através do programa comercial ABAQUS®, versão V 6.12, que se baseia no Método dos Elementos Finitos.

Ao todo, foram realizadas cinco simulações contemplando as seguintes situações:

- a) seção circular vazada;
- b) seção retangular vazada com carga lateral aplicada no sentido da maior inércia da seção;
- c) seção retangular vazada com carga lateral aplicada no sentido da menor inércia da seção;
- d) seção duplo “T” com carga lateral aplicada no sentido da maior inércia da seção;
- e) seção duplo “T” com metade da carga lateral aplicada no sentido da menor inércia da seção.

A realização destas simulações numéricas teve como objetivo determinar os efeitos das ações sobre os elementos estruturais isolados visando se efetuar verificações de estados limites de serviços e avaliar as estruturas projetadas quanto ao atendimento dos requisitos específicos estabelecidos pela norma ABNT NBR 8451:2011. E, também, para demonstrar algumas técnicas de modelagem de estruturas com o software ABAQUS®.

Segundo Lautenschläger (2010, p.98), muitas vezes, o desempenho da estrutura não está relacionado diretamente à carga máxima de ruptura da estrutura, e sim aos deslocamentos máximos admissíveis, adotados como critérios de projeto.

Neste trabalho a análise numérica foi do tipo linear, isto é, admitindo comportamento elástico-linear para os materiais, para os quais a relação entre tensão e deformação é regida pela Lei de Hooke (Equação 5.1).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5.1)$$

Onde:

σ : é a tensão [Pa];

E : é o módulo de elasticidade ou módulo de Young [Pa];

ε : é a deformação específica, adimensional.

Na modelagem das estruturas estão compreendidas, basicamente, as seguintes etapas:

- a) criação dos elementos estruturais;
- b) indicação das propriedades mecânicas dos materiais empregados;
- c) estabelecimento das relações de interação entre os elementos estruturais de concreto e de aço;
- d) fornecimento dos valores dos carregamentos atuantes e das condições de vinculação da estrutura;
- e) definição da malha de elementos finitos;
- f) processamento;
- g) pós-processamento.

Através desta análise estrutural foi possível se observar as distribuições de esforços internos, os níveis de tensões, a configuração das deformações e os deslocamentos, em toda a estrutura. Estes resultados constam no Capítulo 6.

Para verificar a validade dos modelos propostos foram comparados os resultados de flechas obtidos através das simulações computacionais com os valores teóricos obtidos pela expressão analítica para determinação de flecha máxima em vigas engastadas com carga concentrada na extremidade (Equação 2.19).

5.1 CRIAÇÃO DOS MODELOS

Neste estudo para a criação e o processamento dos modelos utilizou-se o sistema ABAQUS/CAE, v. 6.12, selecionando o banco de dados do tipo *Standard/Explicit*.

De acordo com Lautenschläger (2010, p.104), este tipo de banco de dados é indicado para análises estáticas e dinâmicas, lineares ou não lineares, sendo aquela que possui mais recursos no programa.

Na modelagem computacional com o software ABAQUS® as diversas partes da estrutura, tais como: maciço de concreto, barras e estribos de aço, são criados individualmente no módulo *Part*. Em seguida, no módulo *Property* são criados os materiais, definindo-se suas propriedades mecânicas, e associando os materiais com as partes da estrutura. Por fim, todas

as partes, já contendo as características do material, são agrupadas no módulo *Assembly*, de modo a compor a estrutura.

As geometrias e dimensões dos postes em estudo são aquelas já apresentadas no item 3.1.1.2 deste trabalho, sendo que em todos os casos o comprimento do poste é de 20,10 [m], uma vez que, foi deduzido o comprimento de engaste ao comprimento nominal do poste.

As disposições das armaduras de aço nos postes seguem os detalhamentos indicados nos exemplos numéricos, que se refere o Capítulo 4.

O concreto adotado no presente trabalho é denominado de C40, corresponde a um concreto de resistência característica à compressão $f_{ck} = 40[\text{MPa}]$, tem módulo de elasticidade $E = 42501,01[\text{MPa}]$, módulo de Poisson $\nu = 0,2$ e densidade igual à $2400[\text{kg}/\text{m}^3]$.

Considerou-se o aço CA-50 com tensão de escoamento $f_{yk} = 500[\text{MPa}]$, módulo de elasticidade $E = 210[\text{GPa}]$, coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$ e densidade com valor igual à $7850[\text{kg}/\text{m}^3]$.

Foram atribuídos valores de densidade aos materiais para levar em conta o peso próprio das estruturas. Segundo Lautenschläger (2010, p.108), o software ABAQUS® considera a ação da gravidade como um carregamento, sendo que, os materiais somente são sensíveis à ação da gravidade quando possuem uma densidade.

Vale ressaltar que o software de elementos finitos ABAQUS/CAE, não tem um sistema de unidades nativo. Assim o usuário deve definir as unidades de acordo com as características do modelo a ser desenvolvido no programa. Nesse caso, convencionou-se seguir o padrão internacional de unidades (SI).

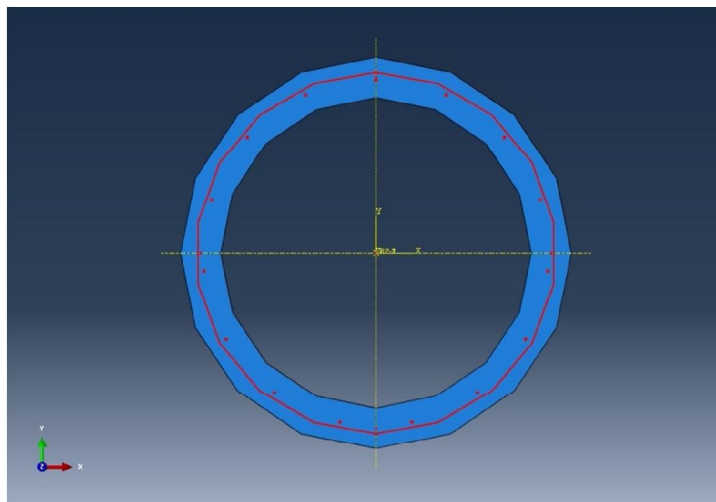


Figura 5.1: Modelo do poste de seção circular vazada (vista de topo)

Fonte: Autoria própria.

5.2 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTATO, DE VINCULAÇÃO E DE CARREGAMENTO

No ABAQUS® para a definição das condições de contato, de vinculação e de carregamento são utilizados os módulos *Step*, *Interaction* e *Load*.

Para a condição de perfeita aderência entre a armadura e o concreto, foi utilizada a técnica de *Embedded Region* disponível no ABAQUS®. Com esta técnica são criadas condições de vinculações entre os elementos de concreto e aço, nas quais existe concordância de deslocamentos. A Figura 5.2 mostra este procedimento onde a armadura de aço é definida como imersa no concreto, selecionando-se o concreto como região hospedeira.

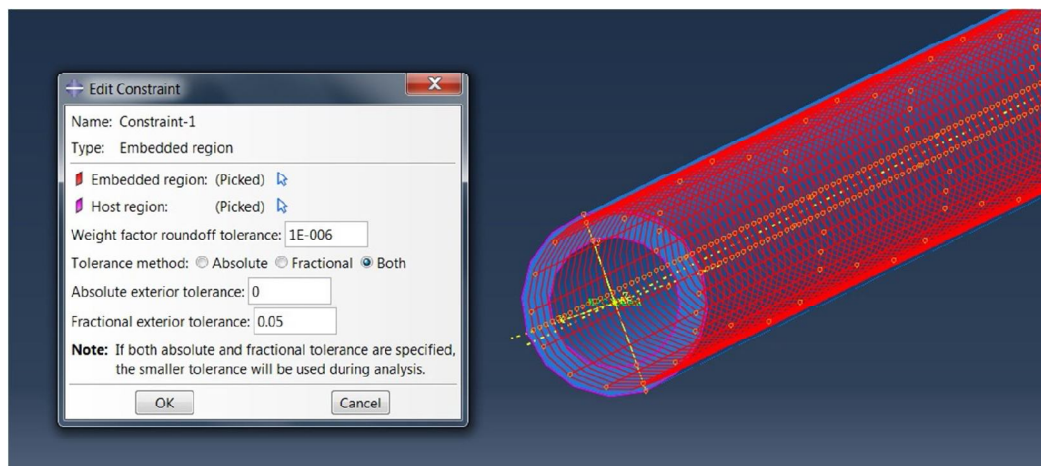


Figura 5.2: Condição de interação entre o aço e o concreto no poste de seção circular vazada

Fonte: Autoria própria.

Para o engastamento da estrutura e para a aplicação da carga, primeiramente, foram criados pontos de referência no centro da base e do topo dos postes. Estes pontos foram interligados as superfícies da base e do topo através da opção *MPC Constrain* do ABAQUS®, definindo-se os pontos como *Control Point* (ponto controle) e as superfícies como *Slave Nodes* (ponto escravos). Esta condição de restrição estabelece que haja união perfeita entre estes pontos de referência e os postes, não permitindo descolamentos relativos. As Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 demonstram este procedimento em todos os postes.

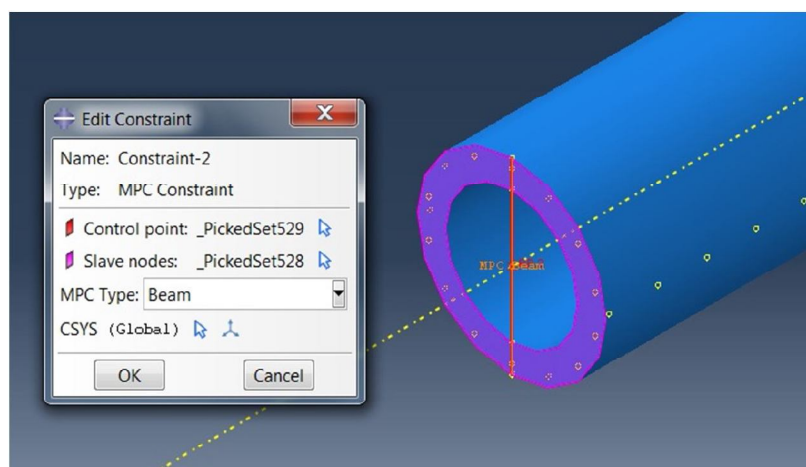


Figura 5.3: Condição de interação de ponto de referência com o poste de seção circular vazada

Fonte: Autoria própria.

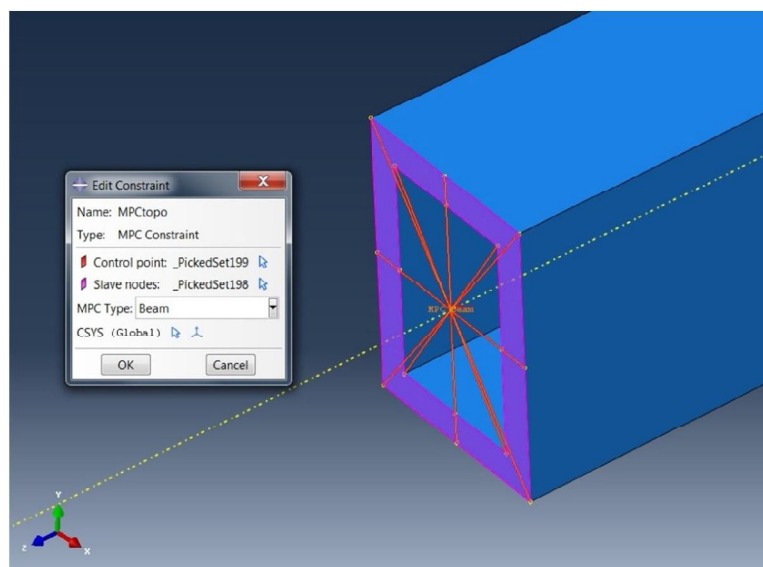


Figura 5.4: Condição de interação de ponto de referência com o poste de seção retangular vazada

Fonte: Autoria própria.

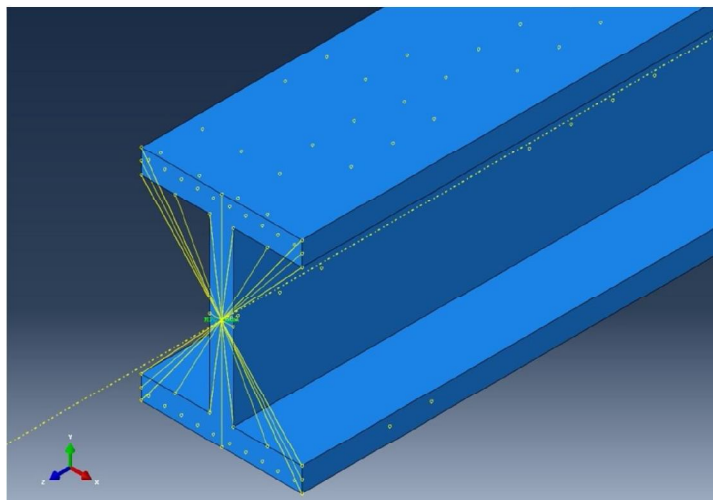


Figura 5.5: Condição de interação de ponto de referência com o poste de seção duplo “T”

Fonte: Autoria própria.

Em seguida, foram aplicadas as condições de vinculação de engaste nos pontos de referência na base de cada poste, conforme se observa na Figura 5.6.

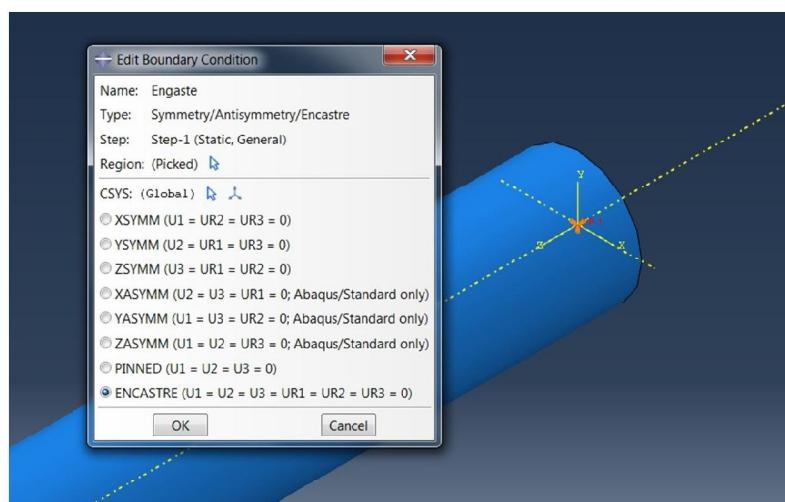


Figura 5.6: Engaste na base do poste de seção circular vazada

Fonte: Autoria própria.

Também foram aplicadas cargas concentradas com direção transversal ao eixo dos postes, nos pontos de referência no topo de cada poste. A intensidade destas cargas seguem os somatórios de cargas horizontais atuantes nos postes obtidas nos exemplos numéricos do Capítulo 4 deste trabalho. Para uma simulação no poste de seção duplo “T” se optou por reduzir a carga pela metade e aplicá-la no sentido de menor inércia da seção. Estes procedimentos podem ser visto nas Figuras 5.7, 5.8, 5.9, 5,10 e 5.11.

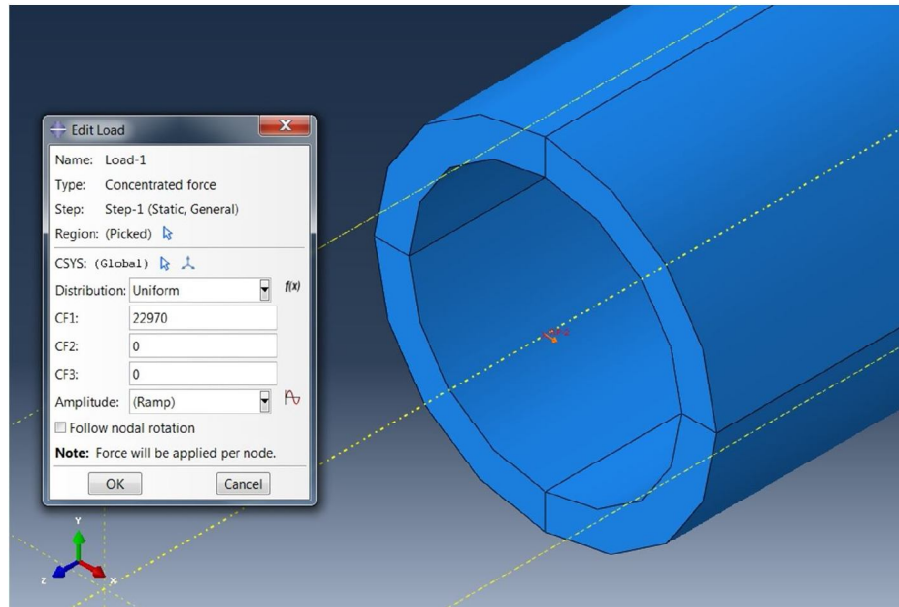


Figura 5.7: Carga lateral aplicada no topo do poste de seção circular vazada

Fonte: Autoria própria.

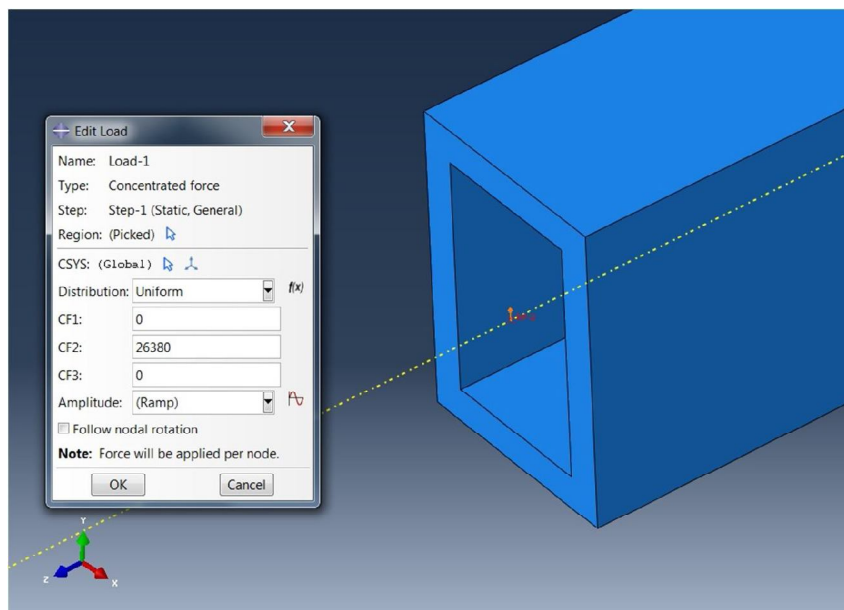


Figura 5.8: Carga lateral aplicada no topo do poste de seção retangular vazada no sentido da maior inércia da seção

Fonte: Autoria própria.

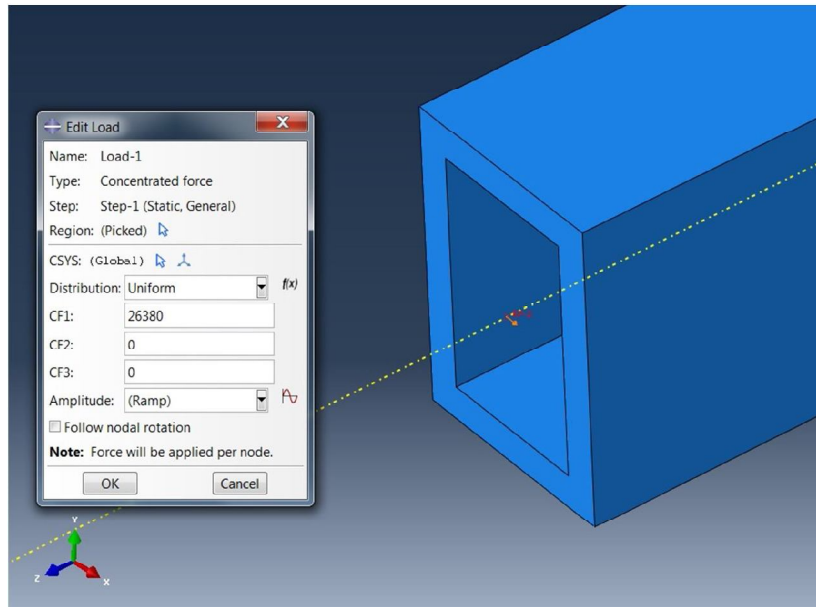


Figura 5.9: Carga lateral aplicada no topo do poste de seção retangular vazada no sentido da menor inércia da seção

Fonte: Autoria própria.

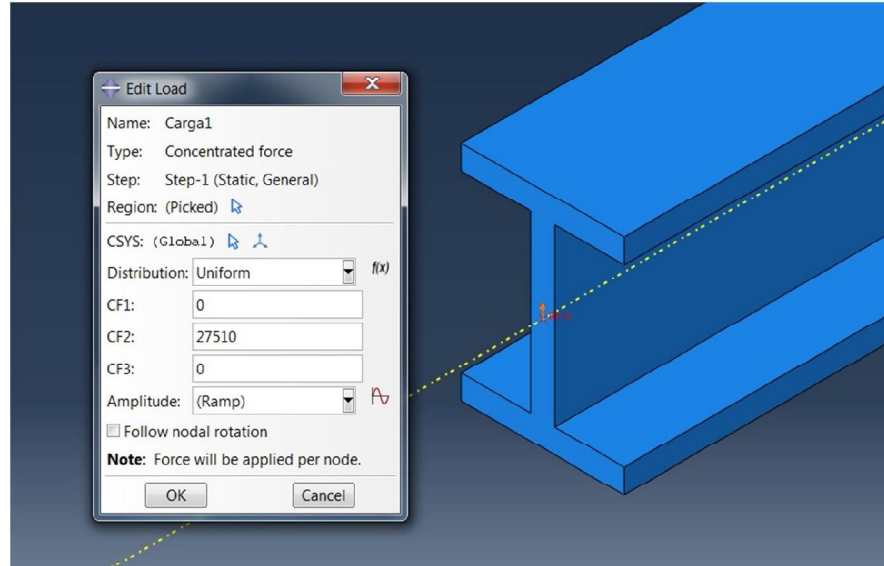
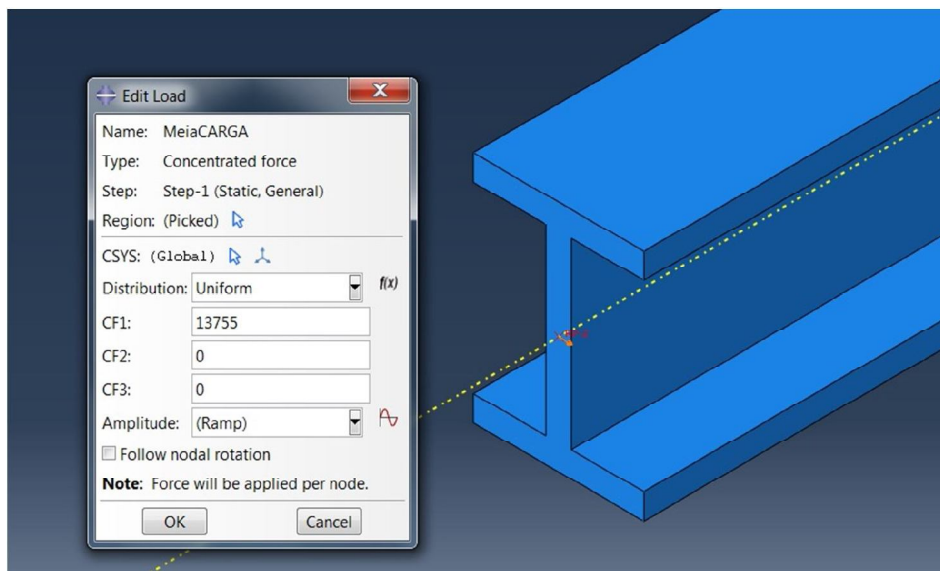


Figura 5.10: Carga lateral aplicada no topo do poste de seção duplo "T" no sentido da maior inércia da seção

Fonte: Autoria própria.



**Figura 5.11: Carga lateral aplicada no topo do poste de seção duplo “T”
no sentido da menor inércia da seção**

Fonte: Autoria própria.

5.3 GERAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

A geração da malha dos modelos é feita no ABAQUS® através do módulo *Mesh*. Para a malha da armadura de aço foram utilizados elementos do tipo T3D3 (elemento de treliça tridimensional quadrático com três nós) e para a malha do concreto, elementos do tipo C3D20 (elemento cúbico quadrático com vinte nós). As figuras seguintes mostram as malhas de elementos finitos utilizadas para os postes.

O software ABAQUS® apresenta formas de verificação de malha, através da opção *Verify Mesh*; Todas as malhas utilizadas nas simulações foram verificadas e aprovadas.

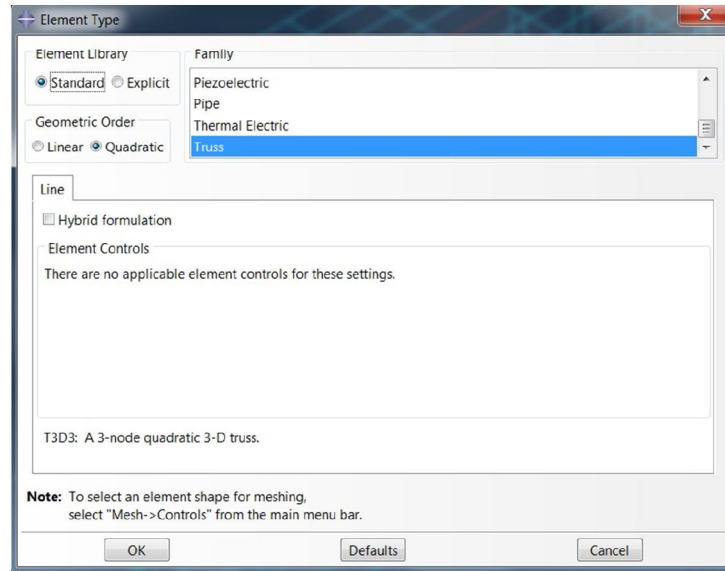


Figura 5.12: Tipo de elemento finito da malha da armadura de aço

Fonte: Autoria própria.

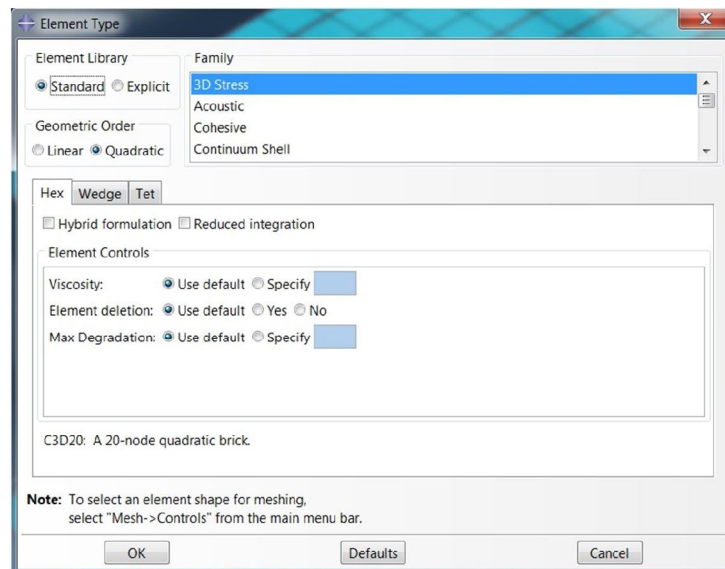


Figura 5.13: Tipo de elemento finito da malha do concreto

Fonte: Autoria própria.

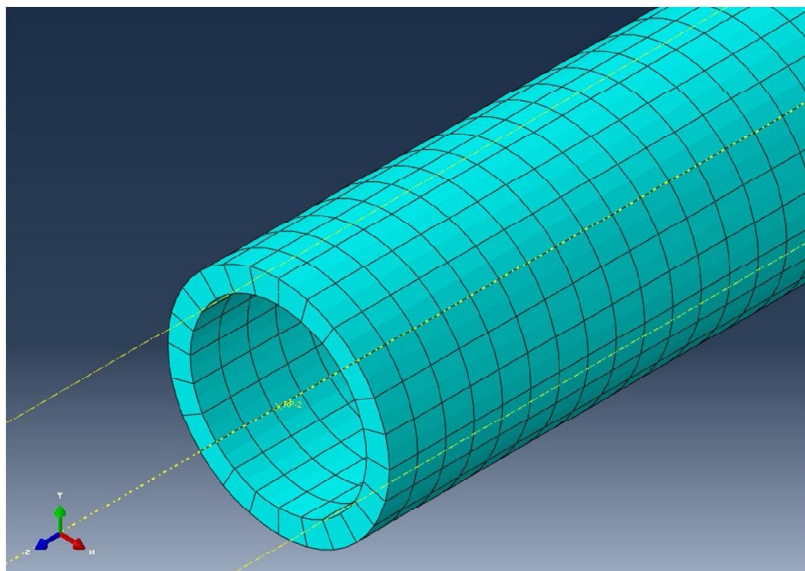


Figura 5.14: Malha do concreto do poste de seção circular vazada (vista aproximada)

Fonte: Autoria própria.

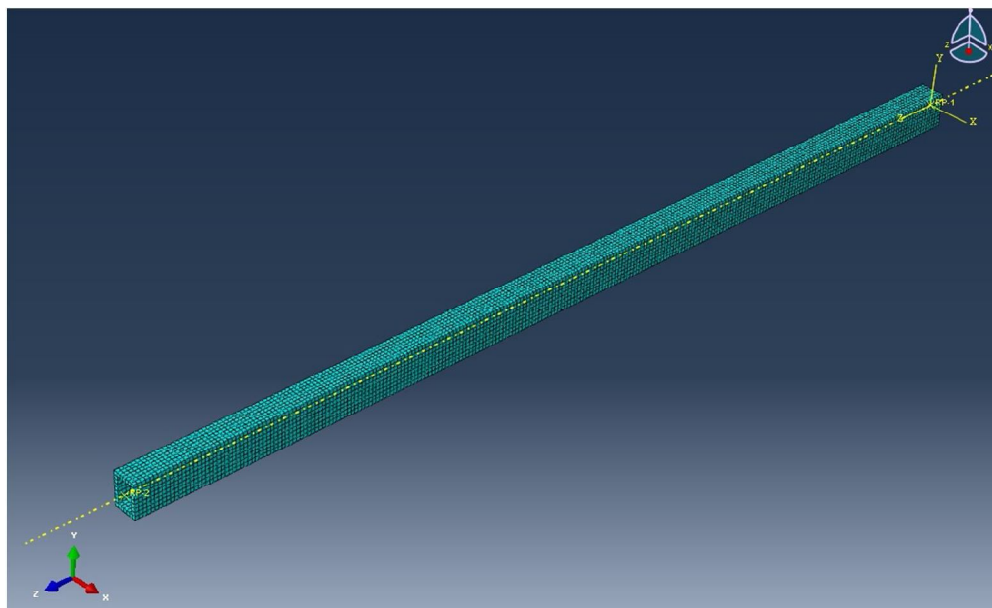


Figura 5.15: Malha do concreto do poste de seção retangular vazada (vista global)

Fonte: Autoria própria.

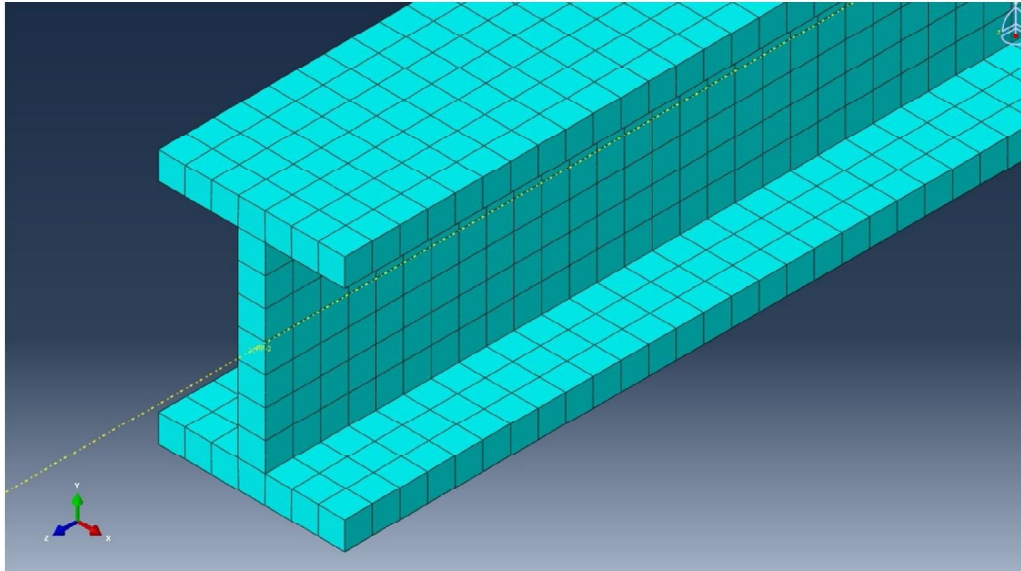


Figura 5.16: Malha do concreto do poste de seção duplo “T” (vista aproximada)

Fonte: Autoria própria.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

6.1.1 Deformações nas estruturas

Os resultados de deslocamento obtidos através da modelagem numérica são apresentados da Figura 6.1 à Figura 6.6, em gráficos carga-deslocamento considerando o ponto central da seção de topo dos postes e incrementos de 10% da carga total de cada caso.

As flechas máximas obtidas foram: 11,90 [cm] para o poste de seção circular vazada; 12,40 [cm] para o poste de seção retangular vazada com carga aplicada no sentido da maior inércia da seção; 22,43 [cm] para o poste de seção retangular vazada com carga aplicada no sentido da menor inércia da seção; 15,56 [cm] para o poste de seção duplo “T” com carga aplicada no sentido da maior inércia da seção; e 39,16 [cm] para o poste de seção duplo “T” com meia carga aplicada no sentido da menor inércia da seção.

Estes valores encontram-se dentro dos requisitos permitidos pela norma ABNT NBR 8451:2011, que seriam de flecha máxima até 5% do comprimento nominal, quando a força for aplicada na direção de menor resistência no poste de seção duplo “T” e até 3,5% do comprimento nominal para as demais situações.

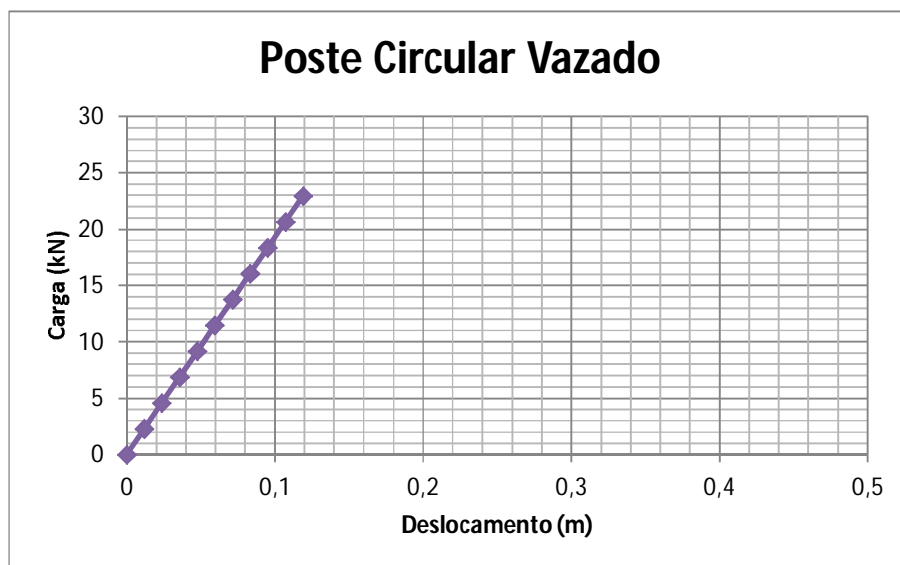


Figura 6.1: Gráfico Carga-Deslocamento para o poste de seção circular vazada

Fonte: Autoria própria.

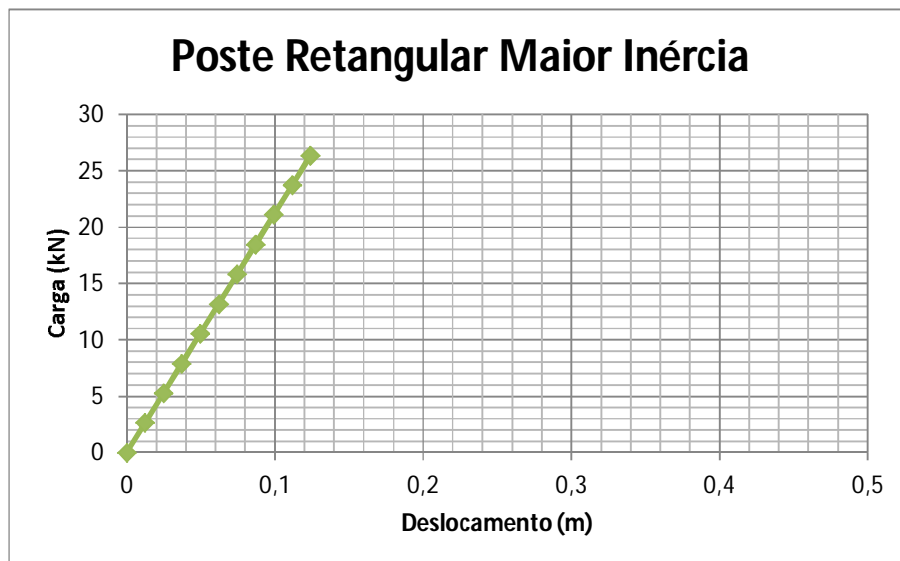


Figura 6.2: Gráfico Carga-Deslocamento para o poste de seção retangular vazada com carregamento aplicado no sentido da maior inércia da seção

Fonte: Autoria própria.

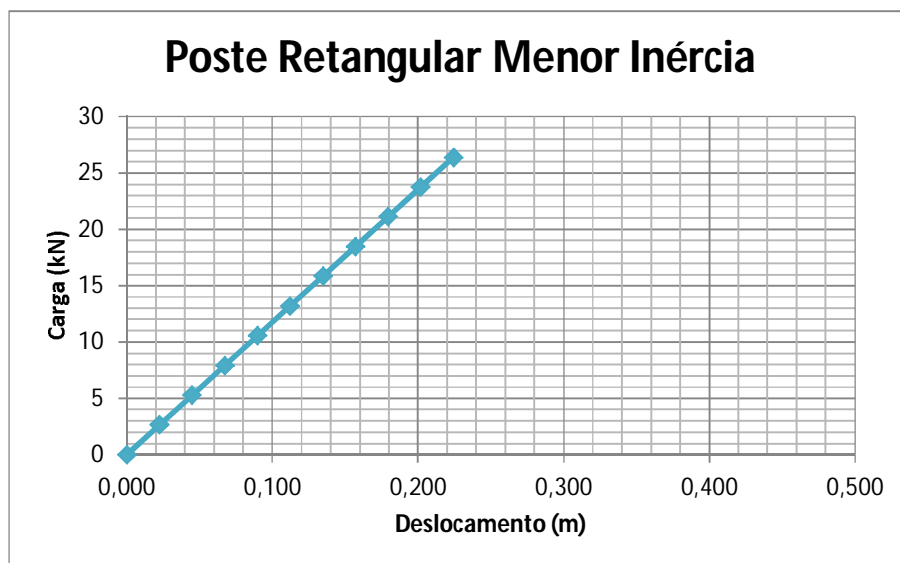


Figura 6.3: Gráfico Carga-Deslocamento para o poste de seção retangular vazada com carregamento aplicado no sentido da menor inércia da seção

Fonte: Autoria própria.

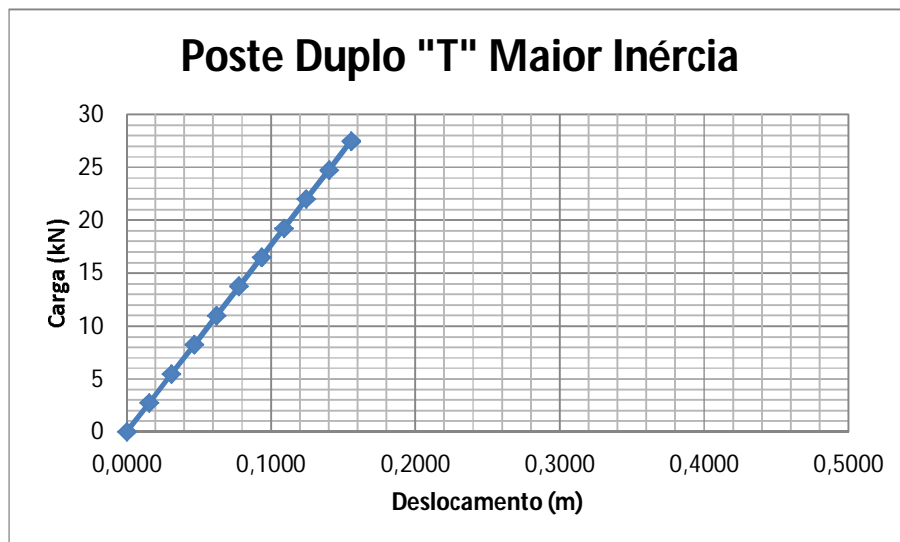


Figura 6.4: Gráfico Carga-Deslocamento para o poste de seção duplo “T” com carregamento aplicado no sentido da maior inércia da seção

Fonte: Autoria própria.

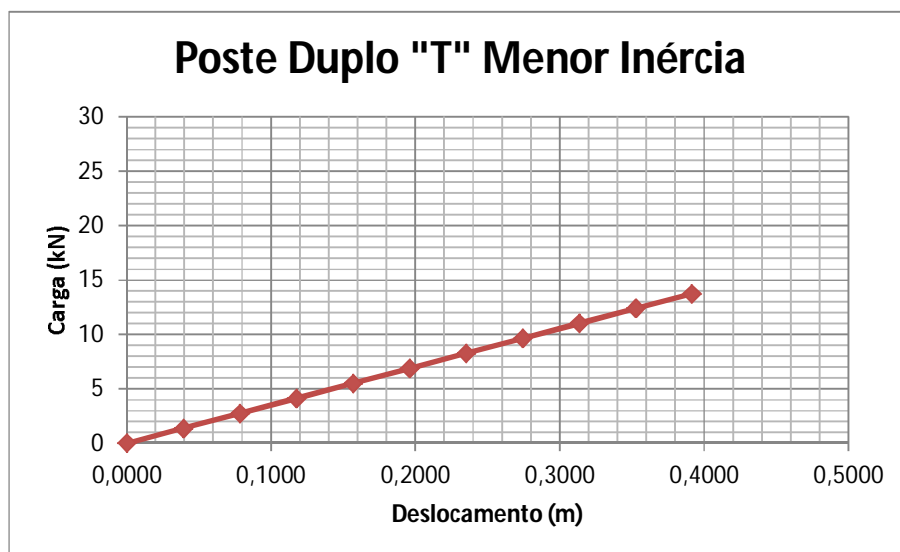


Figura 6.5: Gráfico Carga-Deslocamento para o poste de seção duplo “T” com metade do carregamento aplicado no sentido da menor inércia da seção

Fonte: Autoria própria.

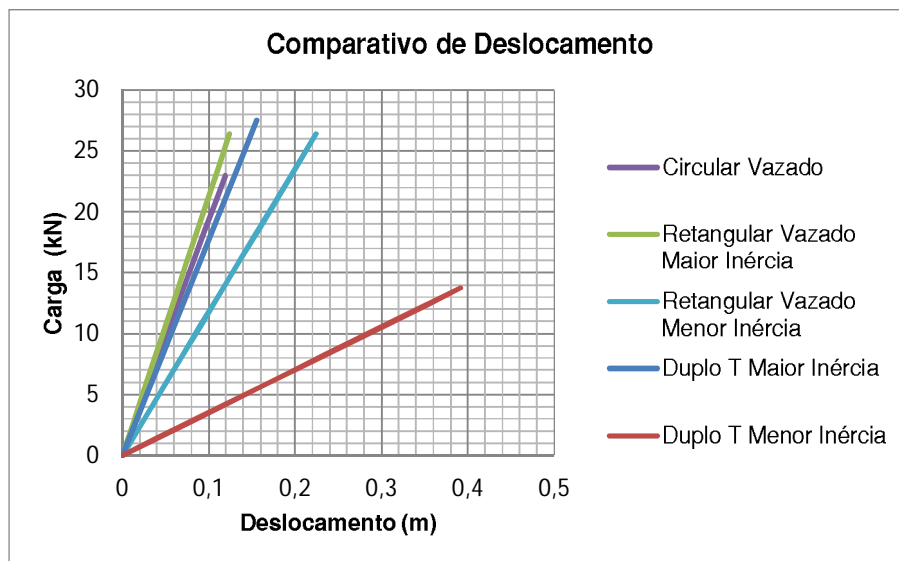


Figura 6.6: Comparação dos resultados de deslocamento dos postes de diferentes seções

Fonte: Autoria própria.

Pela comparação dos resultados de deslocamento dos postes de diferentes seções percebe-se que o poste de seção de seção duplo “T” apresenta no sentido da menor inércia a deformação mais acentuada e que, os postes de seção circular vazada e retangular vazada se encontram na mesma faixa de deformação.

Destaca-se também a linearidade dos gráficos carga-deslocamento que vai de encontro com a premissa assumida de que os materiais têm um comportamento linear.

As imagens das estruturas deformadas obtidas através das simulações numéricas podem ser observadas nas Figuras 6.7, 6.8 e 6.9.

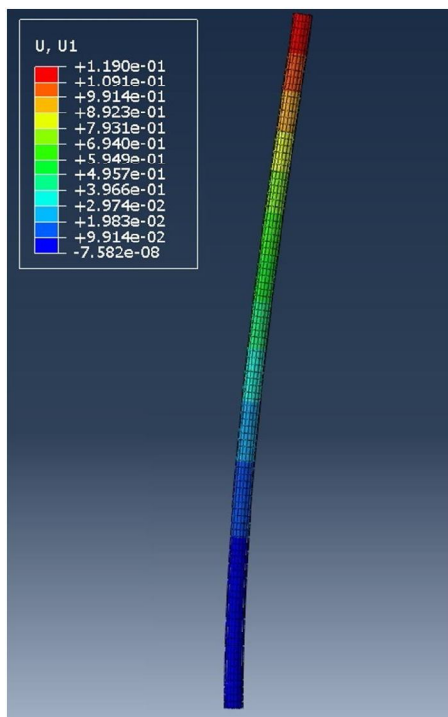


Figura 6.7: Deformada do poste de seção circular vazada

Fonte: Autoria própria.

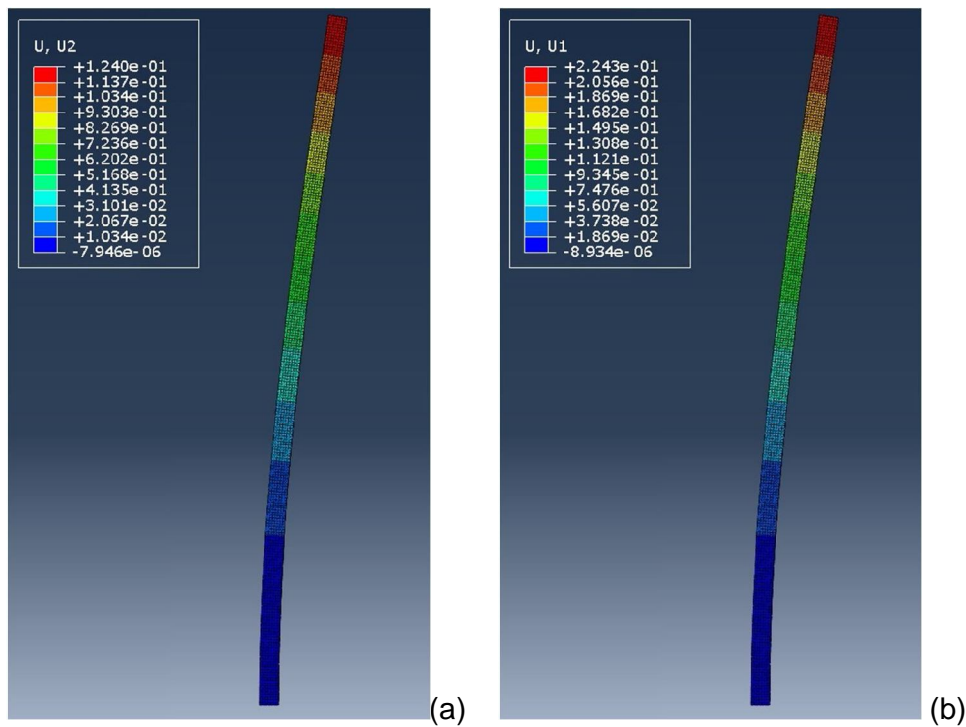


Figura 6.8: Deformadas do poste de seção retangular vazada com carga lateral aplicada no sentido de maior inércia da seção (a) e com carga lateral aplicada no sentido de menor inércia da seção (b)

Fonte: Autoria própria.

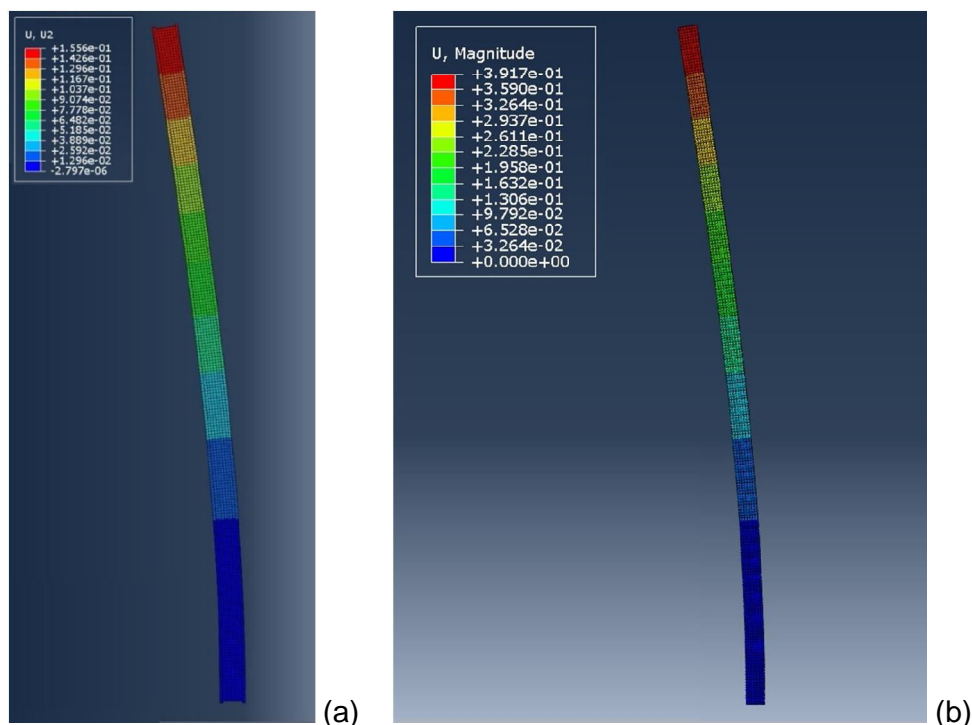


Figura 6.9: Deformadas do poste de seção duplo “T” com carga lateral aplicada no sentido de maior inércia da seção (a) e com metade da carga lateral aplicada no sentido de menor inércia da seção (b)

Fonte: Autoria própria.

6.1.2 Tensões nas estruturas

As tensões máximas de compressão e tração obtidas através das simulações numéricas ao longo das estruturas em situação deformada e na base das mesmas, podem ser vistas das Figuras 6.10 à 6.12 e da Figura 6.13 à Figura 6.17, respectivamente.

Os valores de tensões máximas obtidas foram: 18,18 [MPa] para o poste de seção circular vazada; 20,35 [MPa] para o poste de seção retangular vazada com carga aplicada no sentido da maior inércia da seção; 26,62 [MPa] para o poste de seção retangular vazada com carga aplicada no sentido da menor inércia da seção; 23,90 [MPa] para o poste de seção duplo “T” com carga aplicada no sentido da maior inércia da seção; e 39,44 [MPa] para o poste de seção duplo “T” com meia carga aplicada no sentido da menor inércia da seção.

Verifica-se, portanto, que em todos os casos a tensão máxima na estrutura é inferior à resistência de compressão do concreto definida em 40 [MPa]. Isto significa que os postes resistiriam à situação para a qual foram projetados.

Percebe-se que os níveis de tensão diminuem ao longo da altura dos postes. De maneira que, poderiam ser reduzidas as seções dos postes ao longo da altura.

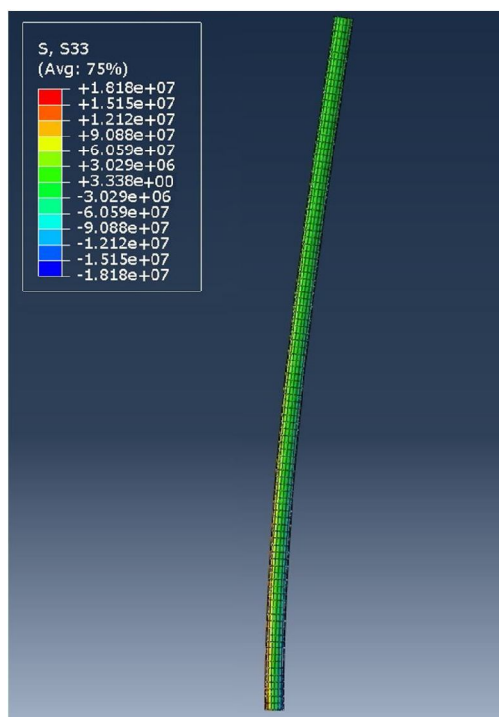


Figura 6.10: Diagrama de tensões do poste de seção circular vazada

Fonte: Autoria própria.

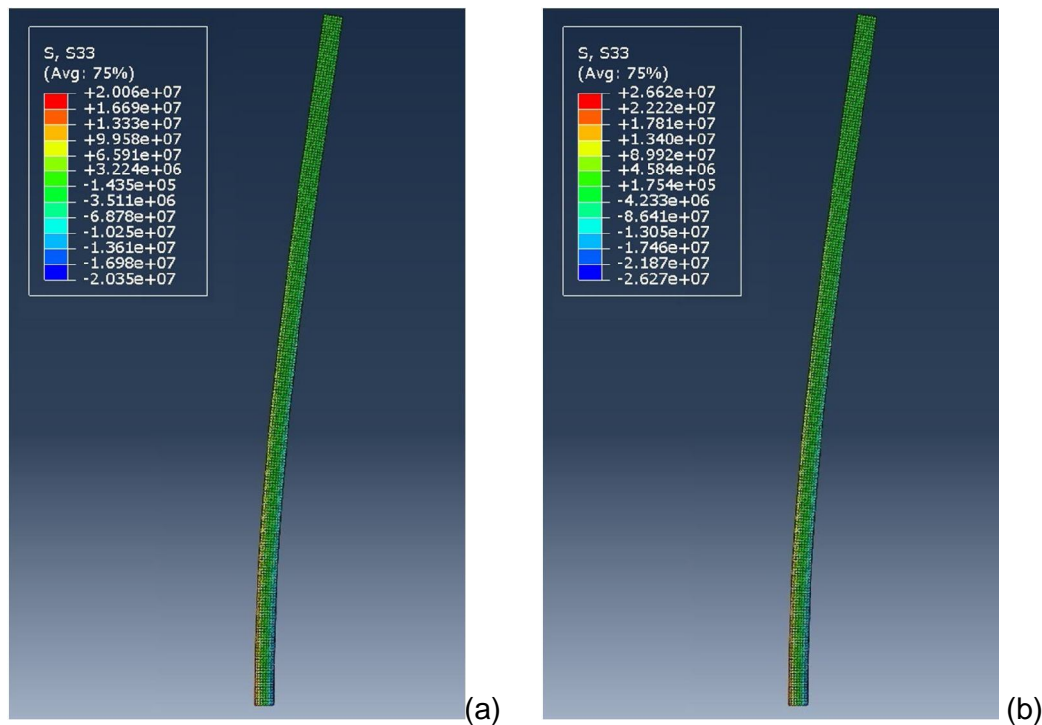


Figura 6.11: Diagramas de tensões do poste de seção retangular vazada com carga lateral aplicada no sentido de maior inércia da seção (a) e com carga lateral aplicada no sentido de menor inércia da seção (b)

Fonte: Autoria própria.

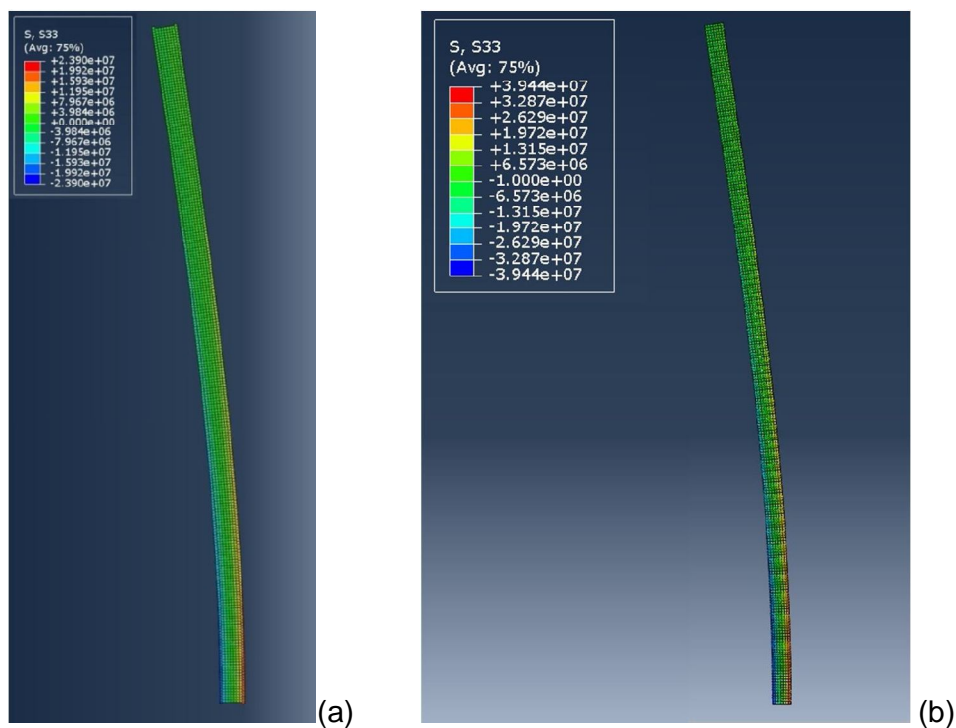


Figura 6.12: Diagramas de tensões do poste de seção de seção duplo “T” com carga lateral aplicada no sentido de maior inércia da seção (a) e com metade da carga lateral aplicada no sentido de menor inércia da seção (b)

Fonte: Autoria própria.

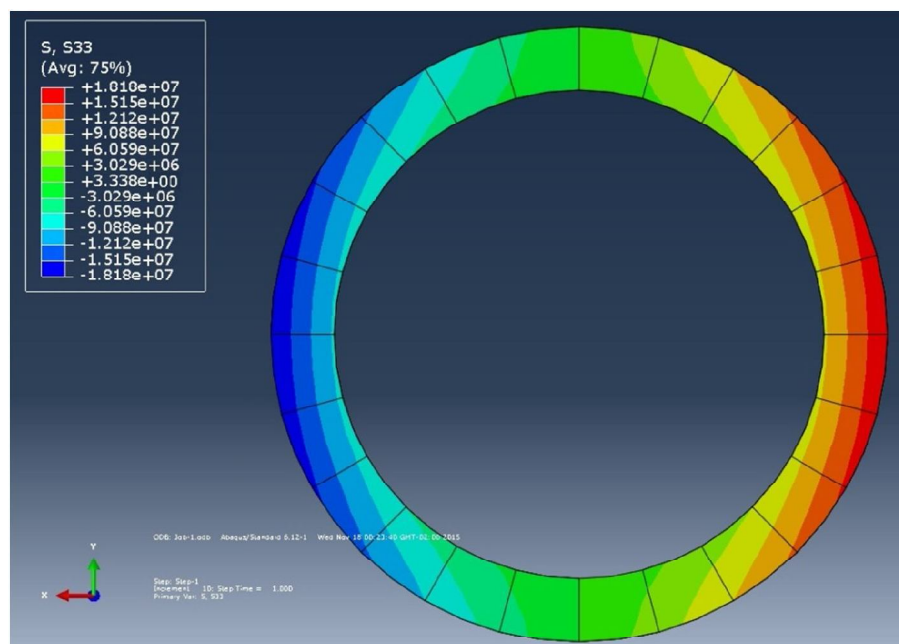


Figura 6.13: Tensões na base do poste de seção circular vazada

Fonte: Autoria própria.

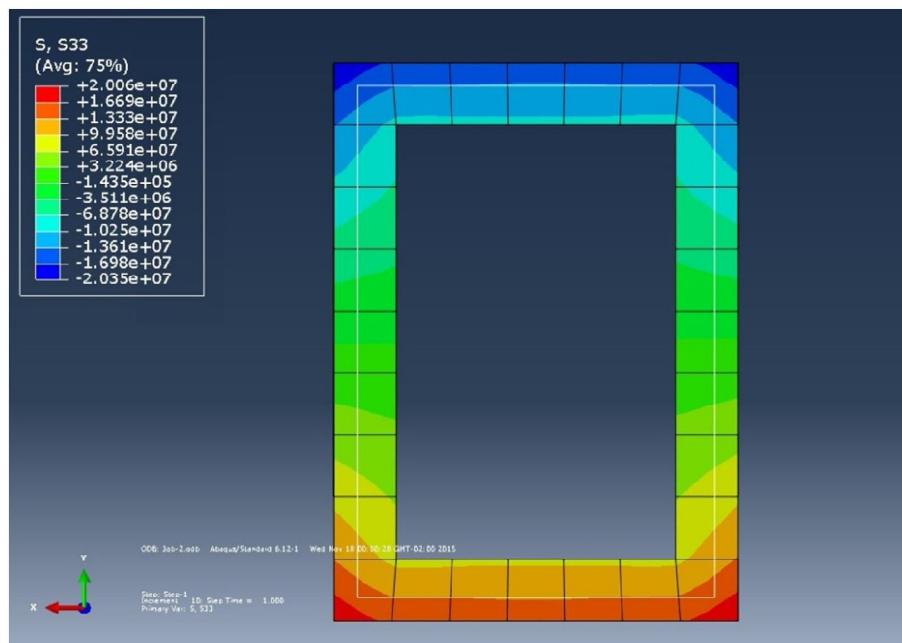


Figura 6.14: Tensões na base do poste de seção retangular vazada com carga lateral aplicada no sentido da maior inércia da seção

Fonte: Autoria própria.

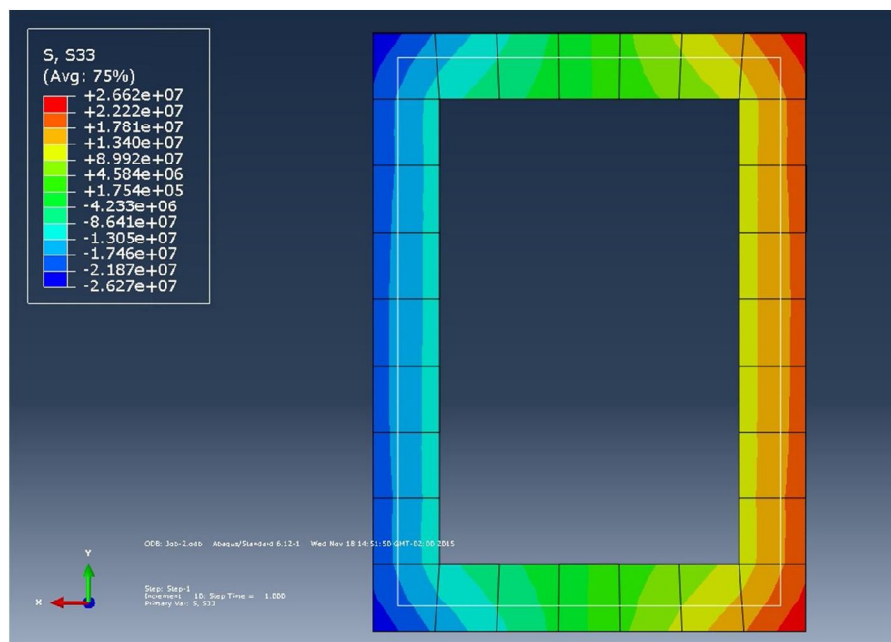


Figura 6.15: Tensões na base do poste de seção retangular vazada com carga lateral aplicada no sentido da menor inércia da seção

Fonte: Autoria própria.

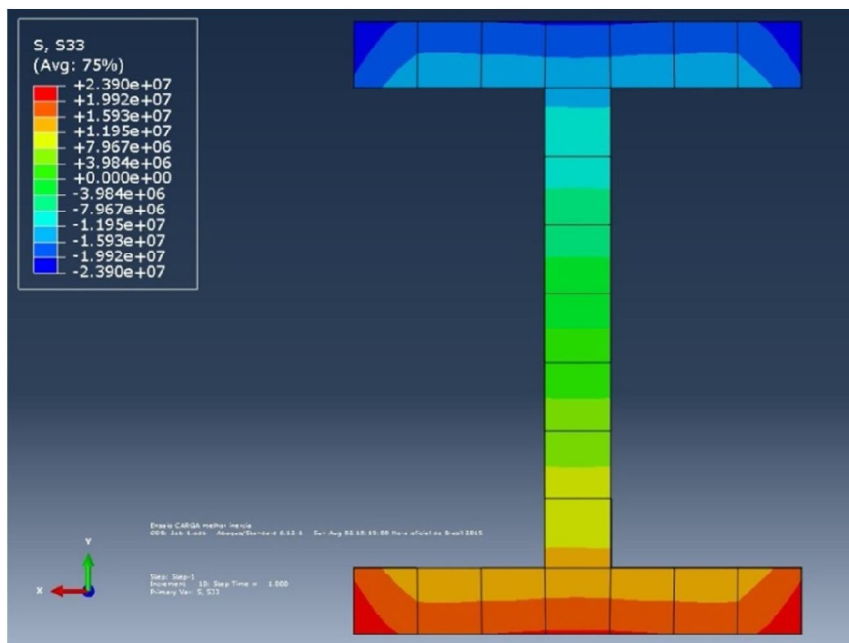


Figura 6.16: Tensões na base do poste de seção duplo “T” com carga lateral aplicada no sentido da maior inércia da seção

Fonte: Autoria própria.

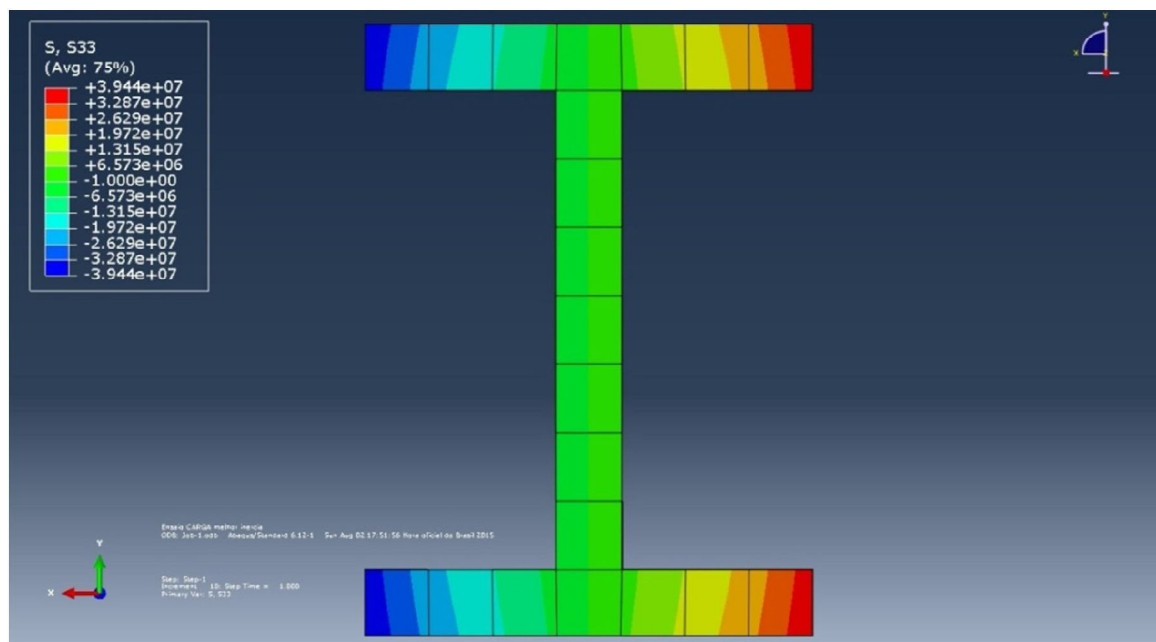


Figura 6.17: Tensões na base do poste de seção duplo “T” com metade da carga lateral aplicada no sentido da menor inércia da seção

Fonte: Autoria própria.

6.1.3 Comparação entre resultados numéricos e resultados analíticos

Com o objetivo de avaliar a precisão dos resultados e a eficiência do software utilizado, foi realizada uma comparação entre os resultados de deformações obtidos pelo programa ABAQUS® com os resultados analíticos, como segue na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Resultados das flechas máximas dos modelos analisados

Modelo	Circular Vazada	Retangular Maior Inércia	Retangular Menor Inércia	Duplo “T” Maior Inércia	Duplo “T” Menor Inércia
Analítico	13,42 cm	15,41 cm	26,66 cm	16,22 cm	41,72 cm
Simulação Computacional	11,90 cm	12,40 cm	22,43 cm	15,56 cm	39,16 cm
Erro Relativo Percentual	-11,32 %	-19,53 %	-15,87 %	-4,07 %	-6,14 %

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que os valores de deflexão estimados pelo programa ABAQUS® estão próximos dos valores teóricos, sendo que a maior dispersão ocorreu no caso do poste de seção retangular vazada.

Constatou-se que em todos os casos a deflexão da simulação numérica é menor que a analítica. Isso pode ser explicado pelo fato dos cálculos teóricos não considerarem a parcela de inércia das barras de aço. Além disso, os cálculos teóricos devem ser mais conservadores.

Também não se podem desprezar os erros de arredondamento que se propagam nos cálculos numéricos até ao resultado.

6.2 ANÁLISE PARAMÉTRICA

6.2.1 Comparativo dos coeficientes de arrasto

Pela confrontação dos coeficientes de arrasto, evidencia-se a seção circular com o menor valor para esse parâmetro, representando menos da metade dos valores obtidos para as demais seções. Isso é coerente, pois é devido ao fato da seção circular ter melhor eficiência aerodinâmica. Os valores dos coeficientes de arrasto obtidos para cada caso se encontram no

gráfico da Figura 6.18.

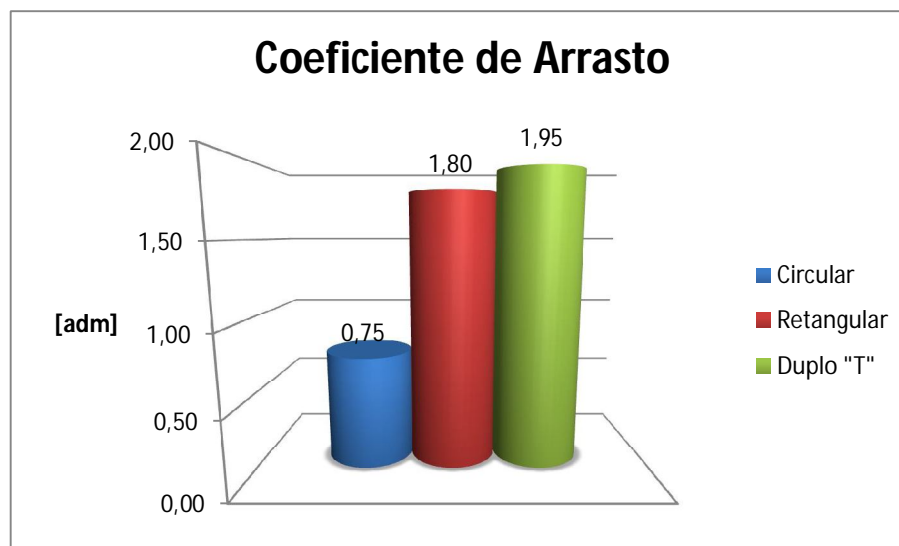


Figura 6.18: Comparação dos coeficientes de arrasto

Fonte: Autoria própria.

6.2.2 Comparativo dos esforços

Como neste estudo a única variável foi o tipo de seção do poste, sendo mantidas todas as outras condições, os esforços determinados para cada caso foram influenciados basicamente pelas características geométricas das seções, sendo regidos principalmente pelo coeficiente de arrasto, como discutido anteriormente.

O poste com seção duplo "T" acusou os esforços mais elevados. Em segundo lugar, não muito distante, veio o poste com seção retangular vazada. Já a seção circular aponta os esforços mais baixos, justamente, por sofrer menos influência da ação do vento.

De acordo com o exposto seguem os gráficos com os valores de força de vento, de força cortante total e de momento fletor encontrados para os exemplos, nas Figuras 6.19, 6.20 e 6.21, respectivamente.

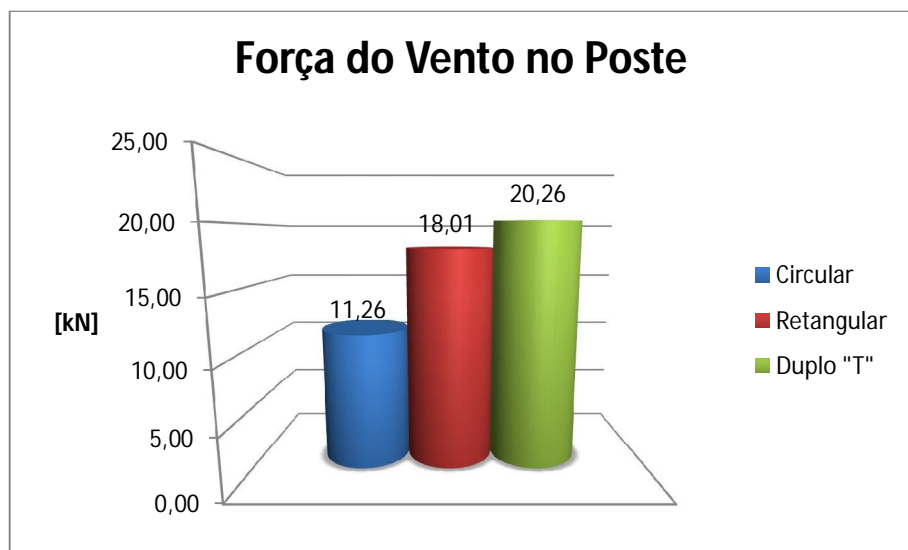


Figura 6.19: Comparação das forças de vento

Fonte: Autoria própria.

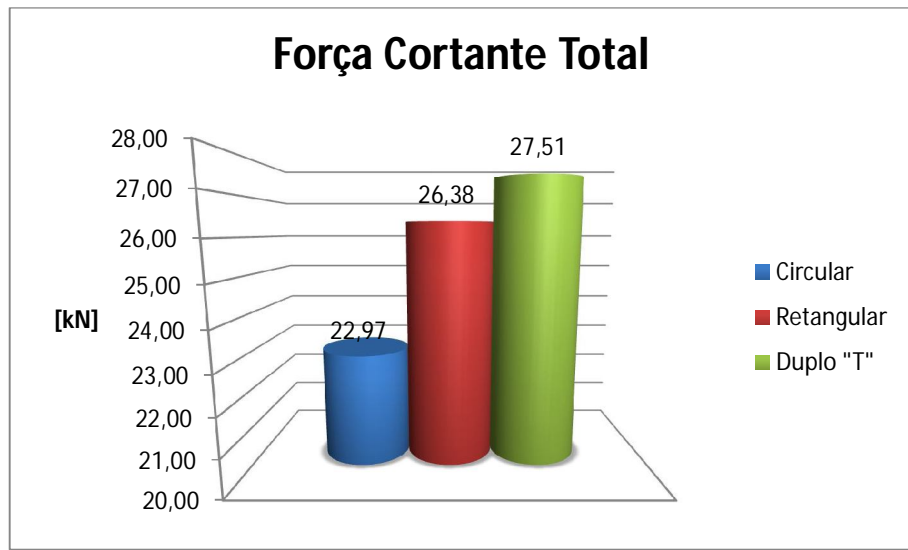


Figura 6.20: Comparação das forças cortantes totais atuantes

Fonte: Autoria própria.

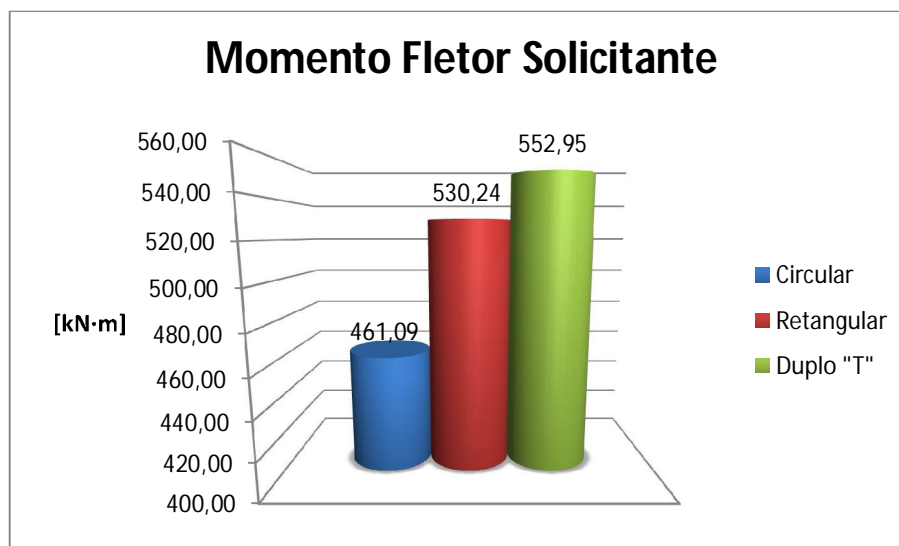


Figura 6.21: Comparação dos momentos fletores solicitantes

Fonte: Autoria própria.

6.2.3 Comparativo da armadura longitudinal

Neste quesito o poste de seção retangular vazada exigiu a maior área de aço, seguido dos postes de seção duplo "T". e de seção circular vazada. No gráfico da Figura 6.22 podem ser vistos os valores de área de armadura longitudinal para cada caso.

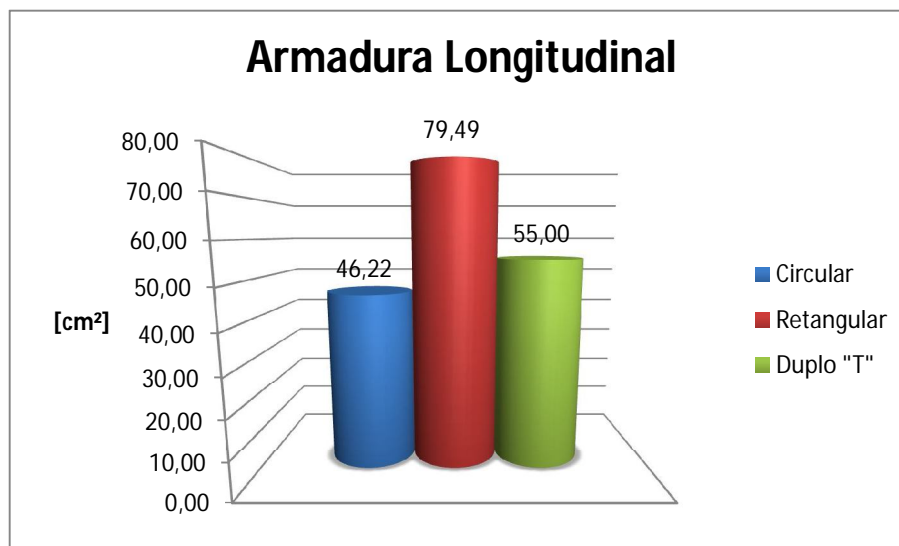


Figura 6.22: Comparação das armaduras longitudinais

Fonte: Autoria própria.

6.2.4 Comparativo da armadura transversal

Verificaram-se valores próximos de armadura transversal para os postes com diferentes seções. Os postes em estudo possuem boa resistência ao cisalhamento, necessitando apenas da armadura mínima prescrita pela norma ABNT NBR 6118:2014, que é determinada em função das resistências do aço e do concreto, que em todos os casos são constantes.

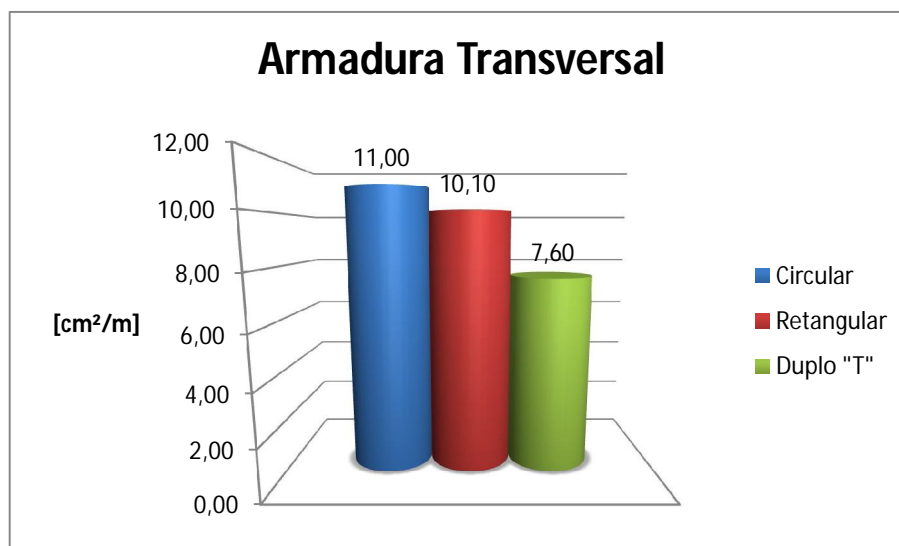


Figura 6.23: Comparação das armaduras transversais

Fonte: Autoria própria.

6.2.5 Comparativo do consumo de materiais

A quantidade de concreto e de aço demandada para cada caso é apresentada nos gráficos da Figura 6.24 e Figura 6.25, respectivamente. Na Figura 6.26 é apresentada a taxa de armadura dos postes.

Com relação ao concreto os postes de seção circular vazada e de seção retangular vazada têm valores próximos de volume desse material, mas o poste de seção duplo "T" apresentou valor mais baixo.

O poste de seção quadrangular vazada se sobressaiu no quantitativo de aço, superando os demais casos em mais de 30%. Isto aconteceu porque a armadura longitudinal calculada deve ser disposta em todas as faces do poste de maneira a resistir aos esforços do vento em qualquer direção.

Quanto à taxa de armadura, o poste de seção circular vazada apresentou o menor valor, seguido do poste de seção duplo "T", e por fim do poste de seção retangular vazada.

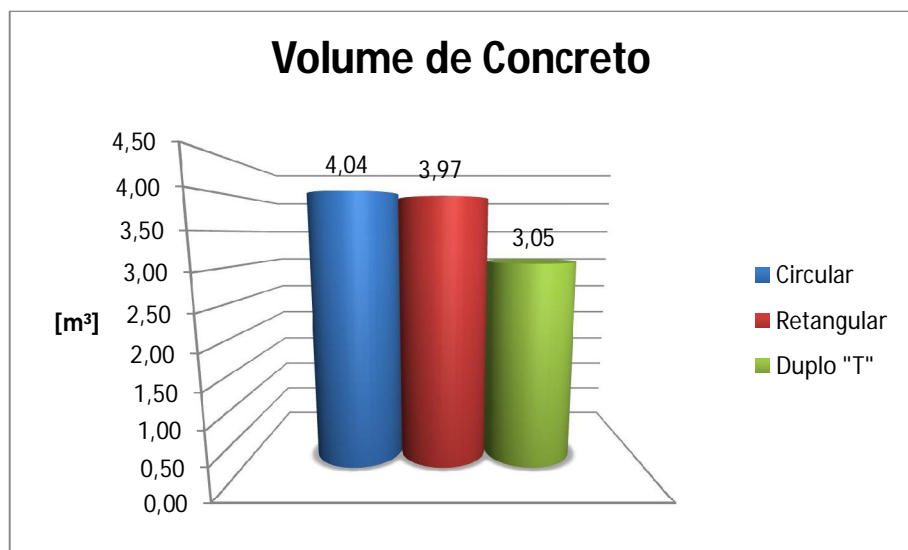


Figura 6.24: Comparação dos volumes de concreto

Fonte: Autoria própria.

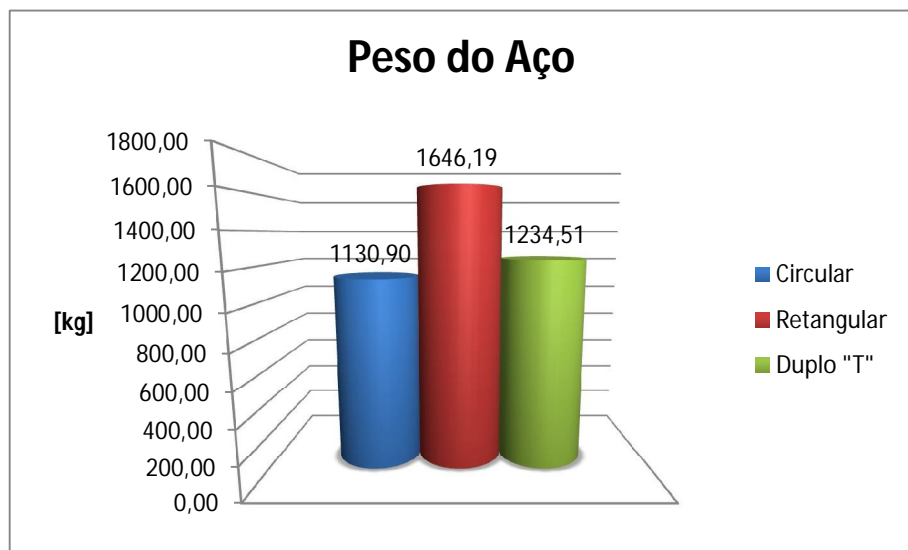


Figura 6.25: Comparação dos pesos de aço

Fonte: Autoria própria.

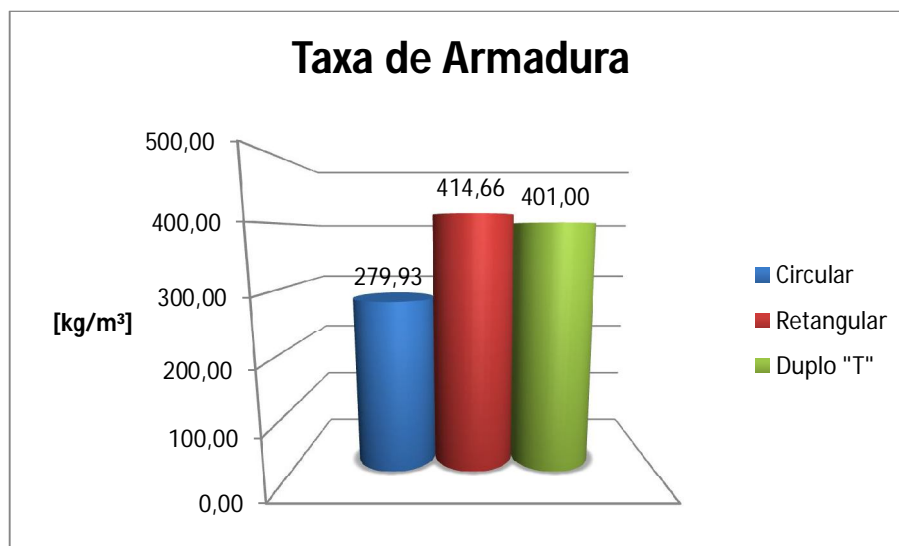


Figura 6.26: Comparação das taxas de armaduras

Fonte: Autoria própria.

6.2.6 Comparativo do peso dos postes

Os pesos estimados dos postes analisados encontram-se no gráfico da Figura 6.27. Estes dados são importantes para as etapas de transporte e içamento da estrutura. Sendo o poste de seção circular vazada o mais pesado e o poste de duplo "T" o mais leve.

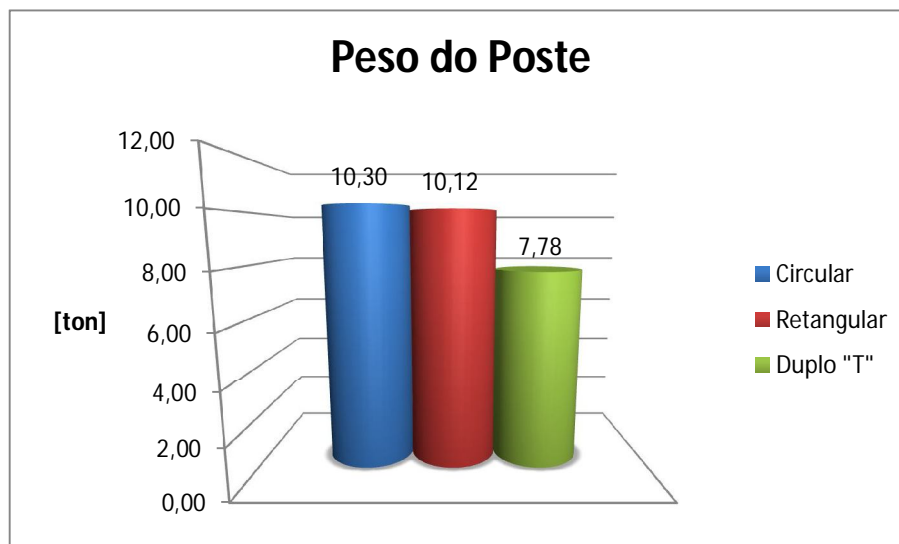


Figura 6.27: Comparação dos pesos estimados dos postes

Fonte: Autoria própria.

7 CONCLUSÕES

Este estudo mostrou resultados muito importantes para um melhor entendimento do comportamento estrutural dos postes de diferentes formatos usados em linhas de transmissão, destacando as diferenças existentes entre eles e os parâmetros de maior influência.

Pela análise dos resultados pôde-se avaliar o desempenho de cada tipo de poste quando submetidos a uma mesma situação e identificar as principais vantagens e/ou desvantagens de cada um.

O poste com seção circular vazado possui a melhor aerodinâmica e, conseqüentemente, absorve menos carga de vento. Por isso, demandou a menor quantidade de aço, apresentado também a menor taxa de armadura.

O poste de seção duplo “T” teve o maior coeficiente de arrasto, tendo acusado os maiores esforços. Contudo, apresentou o menor volume de concreto.

O poste de seção retangular vazada apresentou alto consumo de materiais e ficou em segundo lugar em termos de peso de estrutura. Parecendo não ser interessante o seu emprego.

De maneira geral, os postes apresentaram boa resistência ao cisalhamento, necessitando nos casos estudados apenas da armadura transversal mínima, que é determinada em função das resistências do aço e do concreto.

Assim, o coeficiente de arrasto foi o parâmetro mais determinante no comportamento das estruturas analisadas.

Constatou-se através dos resultados das simulações numéricas que todos os postes suportariam a carga para a qual foram projetados e que apresentariam deslocamentos dentro dos limites impostos por norma.

Verificou-se que os resultados numéricos de deslocamento obtidos ficaram próximos dos valores analíticos, comprovando a eficiência da modelagem numérica realizada.

Confirmou-se o software ABAQUS como uma ferramenta muito útil e confiável para análise estrutural.

7.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A seguir são apresentadas algumas sugestões para futuros trabalhos que complementariam o trabalho feito nesta dissertação.

- Pesquisar os tipos de fundações utilizadas para postes de concreto armado;
- Avaliar o emprego de armadura ativa (protensão) nos postes de concreto armado.
- Efetuar análise estrutural considerando o comportamento não linear dos materiais.
- Investigar os processos de fabricação dos postes de concreto armado.

REFERÊNCIAS

1. AES ELETROPAULO. **RT-2001**: Critérios para adoção de tensões mecânicas admissíveis para elaboração e/ou verificação de projeto utilizando cabos singelos de alumínio sem alma de aço. São Paulo, 2001.
2. _____. **RT-2003**: Dimensionamento de poste de concreto com seção circular utilizado em rede de distribuição. São Paulo, 2003.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5422**: Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro, 1985.
4. _____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
5. _____. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
6. _____. **NBR 6124**: Determinação da elasticidade, carga de ruptura, absorção de água e da espessura do cobrimento em postes e cruzetas de concreto armado. Rio de Janeiro, 1980.
7. _____. **NBR 7271**: Cabos de alumínio nus para linhas aéreas - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
8. _____. **NBR 8451-1**: Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.
9. _____. **NBR 8451-6**: Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica – Parte 6: Postes de concreto armado e protendido para linhas de transmissão e subestações de energia elétrica – Requisitos, padronização e ensaios Rio de Janeiro, 2011.
10. ALUBAR CABOS S/A, **Condutores de alumínio com alma de aço - CAA**. Barcarena/PA, [s.n., 20--]. Disponível em: <http://www.alubar.net.br/downloads/ produtos/cabos_caa_condutores_de_aluminio_com_alma_de_aco.pdf> Acesso em: 05 de março de 2015.
11. _____. **Catálogo técnico - Condutores elétricos de alumínio**. Barcarena/PA, 2010. Disponível em: <http://www.alubar.net.br/downloads/ produtos/catalogo_tecnico_2010-2.pdf> Acesso em: 07 de março de 2015.
12. BASTOS, P. S. S. **Dimensionamento de vigas de concreto armado à força cortante**. Notas de aula, Universidade Estadual Paulista, Bauru/SP, 2008.
13. BASTOS, P. S. S. **Flexão normal simples - vigas**. Notas de aula, Universidade Estadual Paulista, Bauru/SP, 2013.

14. BELGO BAKAERT ARAMES, **Fios e cordoalhas de aço zincados para eletrificação e telefonia**. [s.l., s.n., 20--]. Disponível em: <<http://www.belgobekaert.com.br/Produtos/Documents/Folder-eletrificacao.pdf>> Acesso em: 03 de março de 2015.
15. CARRIL Jr, C. F., **Análise numérica e experimental do efeito dinâmico do vento em torres metálicas treliçadas para telecomunicações**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
16. CELG. **Norma Técnica CELG NTC 01 R-03**: Postes de concreto armado para redes de distribuição – Especificação e padronização. Goiás, 2006.
17. COELCE. **Padrões de Estrutura de LAAT PE 44, PE 45, PE 46, PE 47, PE 48 R-01**: Linhas aéreas de alta tensão – LAAT classe de tensão 72,5 kV. Ceará, 2005.
18. _____. **Especificação Técnica ET 300 R-04**: Poste de concreto armado. Ceará, 2009.
19. _____. **Especificação Técnica ET 314 R-00**: Cruzeta de concreto armado para rede de distribuição e linha de transmissão. Ceará, 2006.
20. _____. **Critério de Projeto CP 010 R-02**: Linhas de distribuição de alta tensão – LDAT classe de tensão 72,5kV. Ceará, 2013.
21. DIAS, J. R. **Análise e dimensionamento de estruturas metálicas treliçadas de transporte de energia eléctrica de acordo com o EC3(EN) e a EN50341-1**. Dissertação (Mestrado), Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.
22. GUILLOU, R. A.; ALMEIDA, H. D.; BERNADINO JUNIOR., C. F.; BARBOZA. A. S. R. Desenvolvimento de programa computacional para cálculo e dimensionamento de postes de concreto armado com seção transversal duplo T. In: XXXII Iberian Latin-American Congress in Computational Methods in Engineering, Ouro Preto/MG. **Anais Proceedings**, 2011.
23. LAUTENSCHLÄGER, C. E. R. **Modelagem numérica do comportamento de fundações profundas submetidas a carregamento lateral**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
24. MONTOYA, P. J.; MESEGUER, A. G.; CABRE, F. M. **Hormigón Armado**, Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 2000.
25. PEREIRA, A. M. B., Simulações computacionais em engenharia. **Revista MEMO**, Niterói, Rio de Janeiro, n. 6, p. 56-61, dez. 2010.
26. PINHEIRO, L. M., **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
27. PLENA TRANSMISSORAS, **Transmissão de energia elétrica – Curso básico**. Apostila, Brasília/DF, mar. 2008.

28. SARTURI, F. D. M., **Simulação computacional de estruturas de concreto reforçadas com aço e compósitos de fibra de carbono.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
29. SINGH, K. S., **Análise estática de torres metálicas treliçadas autoportantes para linhas de transmissão.** Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
30. WAZEN, R. N., **Avaliação da suscetibilidade de falhas em estruturas metálicas de linhas de transmissão.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
31. ZAMPIRON, I., **Avaliação das características e desempenho de estruturas para telecomunicações visando o projeto de novo modelo de torre autoportante.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.