

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Análise de Metodologia de Cálculo de Esforços Estáticos e Dinâmicos para
Dimensionamento de Estruturas de Subestações Isoladas a Ar com
Barramentos Flexíveis**

Rafael Faria da Silva

Itajubá, junho de 2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Rafael Faria da Silva

**Análise de Metodologia de Cálculo de Esforços Estáticos e Dinâmicos para
Dimensionamento de Estruturas de Subestações Isoladas a Ar com
Barramentos Flexíveis**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Mestre em Ciências em
Engenharia Elétrica**

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

**Orientador: Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto
Coorientador: Prof. Dr. Airton Violin**

Junho de 2018

Itajubá



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

A N E X O I

**FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Título da Dissertação: **“Análise de Metodologia de Cálculo de Esforços Estáticos e Dinâmicos para Dimensionamento de Estruturas de Subestações Isoladas a Ar com Barramentos Flexíveis”**

Autor: **Rafael Faria da Silva**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito A = Aprovado - R = Reprovado	Rubrica
1º	A	<i>Feliciano</i>
2º	A	<i>Gustavo Paiva Lopes</i>
3º	A	<i>Airton Violin</i>
4º	A	<i>Estácio</i>

Resultado Final: Conceito final: A, ou seja, APROVADO

Observações: _____

Observações:

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado (A) se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- (2) O Trabalho será considerado Reprovado (R) se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- (3) O Trabalho será considerado no Conceito final como Insuficiente (I) se for atribuído um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.

Este documento terá a validade de 30 (trinta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Itajubá, 15 de junho de 2018.

Prof. Dr. José Feliciano Adami
Prof. Dr. José Feliciano Adami
1º Examinador – FEG/UNESP

Prof. Dr. Gustavo Paiva Lopes
Prof. Dr. Gustavo Paiva Lopes
2º Examinador – UNIFEI

Prof. Dr. Airton Violin
Prof. Dr. Airton Violin
3º Examinador (Coorientador) - UNIFEI

Prof. Dr. Estácio Tavares W. Neto
Prof. Dr. Estácio Tavares W. Neto
4º Examinador (Orientador) - UNIFEI

Dedicatória

À minha família que sempre me apoiou incondicionalmente em tudo, em especial a meu pai (in memoriam), um apaixonado pela Engenharia Elétrica.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por tudo sempre.

Aos professores Estácio Tavares W. Neto e Airton Violin por aceitarem a orientação e coorientação, respectivamente, desse trabalho. Agradeço ao professor Manuel Luiz Barreira Martinez (*in memoriam*) que infelizmente não pôde ver o resultado do trabalho que tão prontamente aceitou orientar no ano de 2015.

Aos amigos da TSE - Tecnologia em Sistemas Elétricos que sempre forneceram informações e boas discussões sobre o tema abordado, em especial aos engenheiros Rogério Régis da Silva, Ademir Carnevalli Guimarães e Marino Piazza Leite.

Um agradecimento especial à minha família que sempre apoiou minha formação e incentivou o estudo e aos amigos que estiveram ao meu lado ao longo dessa caminhada.

Epígrafe

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.*

Martin Luther King (1929 – 1968)

Resumo

Esse trabalho tem como principal objetivo compilar, em um único documento, as informações necessárias para a análise de esforços estáticos e dinâmicos em estruturas de suporte de subestações isoladas a ar com barramentos flexíveis. Os detalhes da aplicação das normas brasileiras utilizadas para consideração da ação dos ventos nos condutores e nas cadeias de isoladores são apresentados bem como toda a metodologia exposta na norma internacional para considerações acerca dos efeitos das correntes de curto-circuito nos condutores. O resultado de uma pesquisa junto a concessionárias, fabricantes, consultorias e projetistas brasileiras mostrou que não existe um consenso com relação à aplicação das normas e da consideração dos esforços dinâmicos para o dimensionamento das estruturas de suporte: esse fato foi essencial para a continuidade do desenvolvimento do trabalho. Um exemplo real, com todas as etapas de cálculo para o dimensionamento de uma estrutura de uma subestação isolada a ar, no qual calculam-se os esforços estáticos e dinâmicos considerando ambas as normas para a ação dos ventos nos condutores e cadeias de isoladores, é apresentado. Apresenta-se também um cálculo adicional considerando o efeito simultâneo de ventos e curto-circuito. Na última seção do trabalho é apresentada uma análise de sensibilidade para variação de diversos parâmetros utilizados nas metodologias de cálculo estudadas e apresentadas ao longo do texto. Observou-se, através do acesso a diversas memórias de cálculo de empresas nacionais e internacionais, que, em muitos dos casos, as normas são aplicadas de forma equivocada ou as metodologias contém erros graves de conceito ou cálculo. Ressalta-se que a forma de considerar os esforços dinâmicos para o dimensionamento ainda está em discussão, apesar de existir metodologia em norma para sua determinação numérica. Desta forma, este trabalho busca ser um guia para o dimensionamento de estruturas de subestações isoladas a ar com barramentos flexíveis, tanto com relação aos esforços estáticos quanto com relação aos esforços dinâmicos.

Palavras-Chave: esforços estáticos, esforços dinâmicos, subestação isolada a ar com condutores flexíveis, IEC 60865, ABNT NBR 5422/1985, ABNT NBR 6123/1988, ABNT NBR 8681/2004.

Abstract

This work aims to compile in one single document the information needed to assess static and dynamic forces in structures of air insulated substations with flexible busbar. Both Brazilian standards that consider wind forces in conductors and insulators chains are detailed as well as the methodology presented in the international standard for calculations of short-circuit effects. A survey was conducted among Brazilian electric power distribution utilities, manufacturers, consultants and it was concluded that there are divergences regarding the application of those standards and regarding the dynamic forces consideration on structures dimensioning: this fact was essential for the continuity of the development of this work. A real example of calculation and dimensioning of a structure is presented with detailed calculation, step by step, for static and dynamic loads, considering both Brazilian standards for wind forces and an additional result is presented considering wind and short-circuit simultaneously. In the last section of this work, a sensitiveness analysis is presented where some parameters of calculation are systematically changed and its effects on the result is assessed. Besides the survey conducted, it was observed through the access to many calculation reports from consultants and manufacturers that, in many cases, the standards were not well applied or there were calculation mistakes or misunderstood concepts. It is important to emphasize that the consideration of dynamic forces for dimensioning of the structures is under discussion, although the numeric results of these forces are well known. This informative work aims to be a guide for the dimensioning of structures in air insulated substations with flexible busbar, considering both static and dynamic forces.

Key-Words: static forces, dynamic forces, air insulated substation with flexible busbar, IEC 60865, ABNT NBR 5422/1985, ABNT NBR 6123/1988, ABNT NBR 8681/2004

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 - RESULTADOS OBTIDOS PARA A FORÇA DE <i>PINCH</i> $F_{Pi,D}$ [8].	29
FIGURA 2.2 - RESULTADOS OBTIDOS PARA A FORÇA DE <i>PINCH</i> (ADAPTADO DE [11]).	31
FIGURA 2.3 - VALOR DA FORÇA DE <i>PINCH</i> $F_{Pi,D}$ EM FUNÇÃO DO PARÂMETRO J (ADAPTADO DE [12]).	31
FIGURA 2.4 - FORÇA DE TRAÇÃO DURANTE O CURTO-CIRCUITO (ADAPTADO DE [17]).	38
FIGURA 2.5 - POSIÇÃO DOS SUBCONDUTORES DURANTE O CURTO-CIRCUITO (ADAPTADO DE [17]).	40
FIGURA 2.6 - MOVIMENTO DO CONDUTOR DURANTE O CURTO-CIRCUITO (ADAPTADO DE [17]).	40
FIGURA 2.7 - ATENUAÇÃO DOS ESFORÇOS NOS SUPORTES E NAS FUNDAÇÕES (ADAPTADO DE [17]).	42
FIGURA 2.8 - MOVIMENTO DO CONDUTOR DE FASE SEM <i>DROPPER</i> E COM <i>DROPPER</i> NO MEIO DO VÃO [18].	44
FIGURA 2.9 - FATOR MULTIPLICATIVO PARA DETERMINAÇÃO DA CARGA ESTÁTICA EQUIVALENTE [18].	45
FIGURA 2.10 - FATOR MULTIPLICATIVO PARA DETERMINAÇÃO DA CARGA ESTÁTICA EQUIVALENTE [18].	47
FIGURA 3.1 - VARIÁVEIS UTILIZADAS PARA OS CÁLCULOS [6].	52
FIGURA 3.2 - DIAGRAMA DAS FORÇAS ATUANDO NO CONDUTOR [6].	53
FIGURA 3.3 - DS DECOMPOSTO EM COMPONENTES VERTICAIS E HORIZONTAIS [6].	53
FIGURA 3.4 - ISOPLETAS - NORMA NBR 5422 [1].	64
FIGURA 3.5 - ESTIMADOR DO FATOR DE ESCALA DA DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL - $A (M/S)^{-1}$ [1].	66
FIGURA 3.6 - ESTIMADOR DO FATOR DE POSIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL - B EM M/S [1].	66
FIGURA 3.7 - FATOR K_D - DIFERENTES PERÍODOS DE INTEGRAÇÃO [1].	69
FIGURA 3.8 - FATOR DE EFETIVIDADE A [1].	71
FIGURA 3.9 - ISOPLETAS DA VELOCIDADE BÁSICA $V_0 (M/S)$, NBR 6123 [2].	72
FIGURA 3.10 - DETERMINAÇÃO DO FATOR DA FORÇA DE TRAÇÃO [3].	82
FIGURA 3.11 - DIMENSÕES DO <i>DROPPER</i> [3].	85
FIGURA 3.12 - DETERMINAÇÃO DO FATOR v_2 [3].	88
FIGURA 3.13 - DETERMINAÇÃO DO FATOR v_3 [3].	88
FIGURA 3.14 - DETERMINAÇÃO DE Ξ [3].	90
FIGURA 3.15 - DETERMINAÇÃO DE H PARA $2,5 < \frac{a_s}{d} \leq 5,0$ [3].	92
FIGURA 3.16 - DETERMINAÇÃO DE H PARA $5,0 < \frac{a_s}{d} \leq 10,0$ [3].	92
FIGURA 3.17 - DETERMINAÇÃO DE H PARA $10,0 < \frac{a_s}{d} \leq 15,0$ [3].	93
FIGURA 4.1 - ISOPLETAS - LOCALIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO - NORMA NBR 5422 [1].	96
FIGURA 4.2 - ESTIMADOR DO FATOR DE ESCALA DA DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL - $A (M/S)^{-1}$ [1].	97
FIGURA 4.3 - ESTIMADOR DO FATOR DE POSIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL - B EM M/S [1].	98
FIGURA 4.4 - FATOR K_D - DIFERENTES PERÍODOS DE INTEGRAÇÃO [1].	100
FIGURA 4.5 - FATOR DE EFETIVIDADE A [1].	101
FIGURA 4.6 - ISOPLETAS DA VELOCIDADE BÁSICA $V_0 (M/S)$, NBR 6123 [2].	103
FIGURA 4.7 - COMPOSIÇÃO DO PESO APARENTE PARA CÁLCULO DE MUDANÇA DE ESTADO.	108

FIGURA 4.8 - DETERMINAÇÃO DO FATOR DA FORÇA DE TRACÇÃO [3].....	111
FIGURA 4.9 - DETERMINAÇÃO DO FATOR v_2 [3].	114
FIGURA 4.10 - DETERMINAÇÃO DO FATOR v_3 [3].	114
FIGURA 4.11 - DETERMINAÇÃO DE Ξ [3].....	115
FIGURA 4.12 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS COM O COMPRIMENTO DO VÃO - CONDUTOR RAIL - 4 POR FASE.	120
FIGURA 4.13 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O COMPRIMENTO DO VÃO - CONDUTOR RAIL - 4 POR FASE.	120
FIGURA 4.14 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS COM O COMPRIMENTO DO VÃO - CONDUTOR RAIL - 2 POR FASE.	121
FIGURA 4.15 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O COMPRIMENTO DO VÃO - CONDUTOR RAIL - 2 POR FASE.	122
FIGURA 4.16 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS COM O COMPRIMENTO DO VÃO - CONDUTOR ORIOLE - 4 POR FASE.	123
FIGURA 4.17 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O COMPRIMENTO DO VÃO - CONDUTOR ORIOLE - 4 POR FASE.	123
FIGURA 4.18 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS COM O COMPRIMENTO DO VÃO - CONDUTOR ORIOLE - 2 POR FASE.	124
FIGURA 4.19 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O COMPRIMENTO DO VÃO - CONDUTOR ORIOLE - 2 POR FASE.	125
FIGURA 4.20 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS COM O CONDUTOR UTILIZADO - 4 CONDUTORES POR FASE - VÃO 40 METROS.	127
FIGURA 4.21 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O CONDUTOR UTILIZADO- 4 CONDUTORES POR FASE - VÃO 90 METROS.	127
FIGURA 4.22 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS COM O CONDUTOR UTILIZADO- 4 CONDUTORES POR FASE - VÃO 90 METROS.	128
FIGURA 4.23 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O CONDUTOR UTILIZADO - 4 CONDUTORES POR FASE - VÃO 90 METROS.	129
FIGURA 4.24 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS COM O CONDUTOR UTILIZADO - 2 CONDUTORES POR FASE - VÃO 40 METROS.	130
FIGURA 4.25 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O CONDUTOR UTILIZADO - 2 CONDUTORES POR FASE - VÃO 40 METROS.	130
FIGURA 4.26 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS COM O CONDUTOR UTILIZADO - 2 CONDUTORES POR FASE - VÃO 90 METROS.	131
FIGURA 4.27 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O CONDUTOR UTILIZADO - 2 CONDUTORES POR FASE - VÃO 90 METROS.	132
FIGURA 4.28 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS COM O VALOR ADOTADO DE FLECHA- 4 CONDUTORES RAIL POR FASE - VÃO 40 METROS.	134
FIGURA 4.29 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O VALOR ADOTADO DE FLECHA - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE - VÃO 40 METROS.	134

FIGURA 4.30 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS COM O VALOR ADOTADO DE FLECHA - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE -VÃO 90 METROS.	135
FIGURA 4.31 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O VALOR ADOTADO DE FLECHA - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE -VÃO 90 METROS.	136
FIGURA 4.32 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS COM O VALOR ADOTADO DE FLECHA - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE -VÃO 40 METROS.	137
FIGURA 4.33 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O VALOR ADOTADO DE FLECHA - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE -VÃO 40 METROS.	137
FIGURA 4.34 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS COM O VALOR ADOTADO DE FLECHA - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE -VÃO 90 METROS.	138
FIGURA 4.35 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O VALOR ADOTADO DE FLECHA - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE -VÃO 90 METROS.	139
FIGURA 4.36 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS COM O NÚMERO DE ESPAÇADORES - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE -VÃO 40 METROS.	141
FIGURA 4.37 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O NÚMERO DE ESPAÇADORES - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE -VÃO 40 METROS.	141
FIGURA 4.38 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS COM O NÚMERO DE ESPAÇADORES - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE -VÃO 90 METROS.	142
FIGURA 4.39 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O NÚMERO DE ESPAÇADORES - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE -VÃO 90 METROS.	143
FIGURA 4.40 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS COM O NÚMERO DE ESPAÇADORES - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE -VÃO 40 METROS.	144
FIGURA 4.41 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O NÚMERO DE ESPAÇADORES - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE -VÃO 40 METROS.	144
FIGURA 4.42 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS COM O NÚMERO DE ESPAÇADORES - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE -VÃO 90 METROS.	145
FIGURA 4.43 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O NÚMERO DE ESPAÇADORES - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE -VÃO 90 METROS.	146
FIGURA 4.44 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O ESPAÇAMENTO ENTRE SUBCONDUTORES - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE -VÃO 40 METROS.	148
FIGURA 4.45 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O ESPAÇAMENTO ENTRE SUBCONDUTORES - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE -VÃO 90 METROS.	149
FIGURA 4.46 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O ESPAÇAMENTO ENTRE SUBCONDUTORES - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE -VÃO 40 METROS.	150
FIGURA 4.47 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O ESPAÇAMENTO ENTRE SUBCONDUTORES - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE -VÃO 90 METROS.	151
FIGURA 4.48 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM A CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE -VÃO 40 METROS.	153
FIGURA 4.49 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM A CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE -VÃO 90 METROS.	154

FIGURA 4.50 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM A CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE - VÃO 40 METROS.....	155
FIGURA 4.51 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM A CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE - VÃO 90 METROS.....	156
FIGURA 4.52 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM A CONSTANTE DE <i>SPRING</i> - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE - VÃO 40 METROS.....	158
FIGURA 4.53 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM A CONSTANTE DE <i>SPRING</i> - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE - VÃO 90 METROS.....	159
FIGURA 4.54 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM A CONSTANTE DE <i>SPRING</i> - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE - VÃO 40 METROS.....	160
FIGURA 4.55 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM A CONSTANTE DE <i>SPRING</i> - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE - VÃO 90 METROS.....	161
FIGURA 4.56 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O TEMPO PARA ELIMINAÇÃO DO CURTO-CIRCUITO - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE - VÃO 40 METROS.....	164
FIGURA 4.57 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O TEMPO PARA ELIMINAÇÃO DO CURTO-CIRCUITO - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE - VÃO 90 METROS.....	165
FIGURA 4.58 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O TEMPO PARA ELIMINAÇÃO DO CURTO-CIRCUITO - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE - VÃO 40 METROS.....	166
FIGURA 4.59 - VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS COM O TEMPO PARA ELIMINAÇÃO DO CURTO-CIRCUITO - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE - VÃO 90 METROS.....	167

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA DIFERENTES VALORES DA CONSTANTE DE <i>SPRING S</i>	32
TABELA 2.2 - NÍVEIS DE TENSÃO E CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO.	32
TABELA 2.3 - CARGAS MÁXIMAS RECOMENDADAS PARA CABOS NA CONDIÇÃO DE TRABALHO DE MAIOR DURAÇÃO [1].	34
TABELA 2.4 - RESPOSTAS OBTIDAS DA EMPRESA A.	48
TABELA 2.5 - RESPOSTAS OBTIDAS DA EMPRESA B.	48
TABELA 2.6 - RESPOSTAS OBTIDAS DA EMPRESA C.	49
TABELA 2.7 - RESPOSTAS OBTIDAS DA EMPRESA D.	49
TABELA 2.8 - RESPOSTAS OBTIDAS DA EMPRESA E.	49
TABELA 2.9 - RESPOSTAS OBTIDAS DA EMPRESA F.	49
TABELA 3.1 - COEFICIENTES DE RUGOSIDADE DO TERRENO [1].	65
TABELA 3.2 - VALORES DE N PARA CORREÇÃO DE ALTURA [1].	68
TABELA 3.3 - CLASSIFICAÇÃO DA RUGOSIDADE DO TERRENO [2].	74
TABELA 3.4 - CLASSE DE EDIFICAÇÕES [2].	74
TABELA 3.5 - VALORES DE S_2 [2].	75
TABELA 3.6 - VALORES PARA O FATOR ESTATÍSTICO S_3 [2].	76
TABELA 3.7 - NÚMERO DE REYNOLDS [2].	77
TABELA 3.8 - COEFICIENTES DE ARRASTO - CADEIAS DE ISOLADORES [2].	78
TABELA 3.9 - VALORES DE CONSTANTE DE <i>SPRING</i> PARA CADA ESTRUTURA DE SUPORTE [3].	81
TABELA 3.10 - COEFICIENTE C_{TH} [3].	84
TABELA 4.1 - COEFICIENTES DE RUGOSIDADE DO TERRENO [1].	97
TABELA 4.2 - VALORES DE 'n' PARA CORREÇÃO DE ALTURA [1].	99
TABELA 4.3 - VALORES PARA O FATOR ESTATÍSTICO S_3 [2].	105
TABELA 4.4 - NÚMERO DE REYNOLDS E COEFICIENTES DE ARRASTO PARA OS CONDUTORES [2].	106
TABELA 4.5 - COEFICIENTES DE ARRASTO - CADEIAS DE ISOLADORES [2].	106
TABELA 4.6 - VALORES DE CONSTANTE DE <i>SPRING</i> PARA CADA ESTRUTURA DE SUPORTE [3].	110
TABELA 4.7 - RESULTADOS PARA DIVERSAS CONDIÇÕES – ABNT NBR 6123/1988 [2].	116
TABELA 4.8 - RESULTADOS PARA DIVERSAS CONDIÇÕES – ABNT NBR 5422/1985 [1].	117
TABELA 4.9 - RESULTADOS PARA DIVERSAS CONDIÇÕES - 100% DA CARGA DE VENTO E CORRENTE DE CURTO- CIRCUITO MÁXIMA.	117
TABELA 4.10 - RESULTADOS PARA DIVERSAS CONDIÇÕES - 60% DA CARGA DE VENTO E CORRENTE DE CURTO- CIRCUITO MÁXIMA.	117
TABELA 4.11 - DADOS UTILIZADOS PARA OS CÁLCULOS - VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DO VÃO.	118
TABELA 4.12 – DADOS DOS CONDUTORES UTILIZADOS [21].	119
TABELA 4.13 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DO VÃO - CONDUTOR RAIL - 4 POR FASE.	119
TABELA 4.14 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DO VÃO - CONDUTOR RAIL - 2 POR FASE.	121
TABELA 4.15 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DO VÃO - CONDUTOR ORIOLE - 4 POR FASE.	122

TABELA 4.16 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DO VÃO - CONDUTOR ORIOLE - 2 POR FASE.....	124
TABELA 4.17 - DADOS UTILIZADOS PARA OS CÁLCULOS - VARIAÇÃO DO CONDUTOR UTILIZADO.	126
TABELA 4.18 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO CONDUTOR UTILIZADO - 4 CONDUTORES POR FASE - VÃO DE 40 METROS.	126
TABELA 4.19 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO CONDUTOR UTILIZADO- 4 CONDUTORES POR FASE - VÃO 90 METROS.	128
TABELA 4.20 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO CONDUTOR UTILIZADO - 2 CONDUTORES POR FASE - VÃO 40 METROS.	129
TABELA 4.21 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO CONDUTOR UTILIZADO - 2 CONDUTORES POR FASE - VÃO 90 METROS.	131
TABELA 4.22 - DADOS UTILIZADOS PARA OS CÁLCULOS - VARIAÇÃO DA FLECHA ADOTADA.....	133
TABELA 4.23 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO VALOR ADOTADO DE FLECHA - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE - VÃO 40 METROS.....	133
TABELA 4.24 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO VALOR ADOTADO DE FLECHA - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE - VÃO 90 METROS.....	135
TABELA 4.25 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO VALOR ADOTADO DE FLECHA - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE - VÃO 40 METROS.....	136
TABELA 4.26 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO VALOR ADOTADO DE FLECHA - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE - VÃO 90 METROS.....	138
TABELA 4.27 - DADOS UTILIZADOS PARA OS CÁLCULOS - VARIAÇÃO DO NÚMERO DE ESPAÇADORES.....	140
TABELA 4.28 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO NÚMERO DE ESPAÇADORES- 4 CONDUTORES RAIL POR FASE -VÃO 40 METROS.....	140
TABELA 4.29 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO NÚMERO DE ESPAÇADORES- 4 CONDUTORES RAIL POR FASE -VÃO 90 METROS.....	142
TABELA 4.30 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO NÚMERO DE ESPAÇADORES- 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE - VÃO 40 METROS.....	143
TABELA 4.31 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO NÚMERO DE ESPAÇADORES- 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE - VÃO 90 METROS.....	145
TABELA 4.32 - DADOS UTILIZADOS PARA OS CÁLCULOS - VARIAÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE SUBCONDUTORES.	147
TABELA 4.33 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE SUBCONDUTORES - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE -VÃO 40 METROS.	147
TABELA 4.34 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE SUBCONDUTORES- 4 CONDUTORES RAIL POR FASE -VÃO 90 METROS.	148
TABELA 4.35 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE SUBCONDUTORES- 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE -VÃO 40 METROS.	149
TABELA 4.36 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE SUBCONDUTORES- 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE -VÃO 90 METROS.	150
TABELA 4.37 - DADOS UTILIZADOS PARA OS CÁLCULOS - VARIAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO.....	152

TABELA 4.38 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE - VÃO 40 METROS.....	152
TABELA 4.39 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO- 4 CONDUTORES RAIL POR FASE - VÃO 90 METROS.....	153
TABELA 4.40 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO- 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE -VÃO 40 METROS.	154
TABELA 4.41 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO- 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE -VÃO 90 METROS.	155
TABELA 4.42 - DADOS UTILIZADOS PARA OS CÁLCULOS - VARIAÇÃO DA CONSTANTE DE <i>SPRING</i>	157
TABELA 4.43 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DA CONSTANTE DE <i>SPRING</i> - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE -VÃO 40 METROS.	158
TABELA 4.44 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DA CONSTANTE DE <i>SPRING</i> - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE -VÃO 90 METROS.	159
TABELA 4.45 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DA CONSTANTE DE <i>SPRING</i> - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE -VÃO 40 METROS.	160
TABELA 4.46 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DA CONSTANTE DE <i>SPRING</i> - 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE -VÃO 90 METROS.	161
TABELA 4.47 - DADOS UTILIZADOS PARA OS CÁLCULOS - VARIAÇÃO DO TEMPO PARA ELIMINAÇÃO DO CURTO-CIRCUITO.	163
TABELA 4.48 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO TEMPO PARA ELIMINAÇÃO DO CURTO-CIRCUITO - 4 CONDUTORES RAIL POR FASE -VÃO 40 METROS.....	164
TABELA 4.49 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO TEMPO PARA ELIMINAÇÃO DO CURTO-CIRCUITO- 4 CONDUTORES RAIL POR FASE -VÃO 90 METROS.....	165
TABELA 4.50 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO TEMPO PARA ELIMINAÇÃO DO CURTO-CIRCUITO- 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE -VÃO 40 METROS.....	166
TABELA 4.51 - ESFORÇOS PARA VARIAÇÃO DO TEMPO PARA ELIMINAÇÃO DO CURTO-CIRCUITO- 2 CONDUTORES ORIOLE POR FASE -VÃO 90 METROS.....	167

Lista de Abreviaturas e Siglas

NBR	NORMA BRASILEIRA
ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
IEC	<i>INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMITTEE</i>
ACSR	<i>ALUMINUM CONDUCTOR STEEL REINFORCED</i>
ANEEL	AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA
ONS	OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO
CIGRÉ	<i>CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES</i>
ESCC	<i>EFFECTS OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS</i>
ESL	<i>EQUIVALENT STATIC LOAD</i>
BASIC	<i>BEGINNER'S ALL-PURPOSE SYMBOLIC INSTRUCTION CODE</i>

Lista de Símbolos

CÁLCULO DE ESFORÇOS ESTÁTICOS

m_c	MASSA DO CONDUTOR POR UNIDADE DE COMPRIMENTO
g	ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE
ds	COMPRIMENTO INFINITESIMAL DO CONDUTOR
V	COMPONENTE VERTICAL DA FORÇA DE TRAÇÃO QUE ATUA NO CONDUTOR
dV	VARIAÇÃO DA COMPONENTE VERTICAL DA FORÇA DE TRAÇÃO ENTRE OS DOIS EXTREMOS DO COMPRIMENTO ds CONSIDERADO
H	COMPONENTE HORIZONTAL DA FORÇA QUE TRACIONA O CONDUTOR
x, y	COORDENADAS DOS PONTOS AO LONGO DA CURVA FORMADA PELO CONDUTOR ENTRE OS SUPORTES
x_0, y_0	COORDENADAS DA ORIGEM DO SISTEMA DE COORDENADAS CONSIDERADO
a	COMPRIMENTO DO VÃO ENTRE OS PONTOS DE FIXAÇÃO
x_a	DISTÂNCIA ENTRE O PONTO MAIS BAIXO DA CURVA E O PONTO DE FIXAÇÃO MAIS PRÓXIMO
H	DESNÍVEL ENTRE PONTOS DE FIXAÇÃO DO CONDUTOR
F	FLECHA MÁXIMA
L	COMPRIMENTO TOTAL DO CONDUTOR ENTRE OS PONTOS DE FIXAÇÃO
x_b	DISTÂNCIA ENTRE O PONTO MAIS BAIXO DA CURVA E O PONTO DE FIXAÇÃO MAIS DISTANTE
a_e	VÃO EQUIVALENTE PARA SUPORTES A DIFERENTES ALTURAS
e_{th}	EXPANSÃO DEVIDO À VARIAÇÃO DE TEMPERATURA
e_{el}	EXPANSÃO DEVIDO À ELASTICIDADE DO CONDUTOR
α	COEFICIENTE DE DILATAÇÃO LINEAR DO CONDUTOR
$\Delta\theta$	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA ENTRE OS DOIS ESTADOS
T	FORÇA RESULTANTE NO CONDUTOR
E	MÓDULO DA ELASTICIDADE DO CONDUTOR
A	SEÇÃO TRANSVERSAL DO CONDUTOR
L_2	COMPRIMENTO DO CONDUTOR NO ESTADO 2
L_1	COMPRIMENTO DO CONDUTOR NO ESTADO 1
T_2	TEMPERATURA DO CONDUTOR NO ESTADO 2
T_1	TEMPERATURA DO CONDUTOR NO ESTADO 1
m_{c1}	MASSA DO CONDUTOR POR UNIDADE DE COMPRIMENTO NO ESTADO 1
m_{c2}	MASSA DO CONDUTOR POR UNIDADE DE COMPRIMENTO NO ESTADO 2
G_K	PESO POR UNIDADE DE COMPRIMENTO DA CADEIA DE ISOLADORES
L_K	COMPRIMENTO DA CADEIA DE ISOLADORES

ABNT NBR 5422/1985

V_0	VELOCIDADE BÁSICA DE VENTO
k_r	COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DO TERRENO

T	PERÍODO DE RETORNO
α	ESTIMADOR DO FATOR DE ESCALA DA DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL
β	ESTIMADOR DO FATOR DE POSIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL
V_t	VELOCIDADE DE VENTO CORRIGIDA PARA O TEMPO DE RETORNO T CONSIDERADO
n	PARÂMETRO PARA CORREÇÃO DA ALTURA DE INSTALAÇÃO
V_H	VELOCIDADE DE VENTO CORRIGIDA PARA A ALTURA DE INSTALAÇÃO CONSIDERADA
H	ALTURA DE INSTALAÇÃO DO CONDUTOR
k_d	COEFICIENTE PARA CORREÇÃO DO PERÍODO DE INTEGRAÇÃO
V_p	VELOCIDADE DE VENTO DE PROJETO
q_0	PRESSÃO DINÂMICA DE REFERÊNCIA
ρ	MASSA ESPECÍFICA DO AR
t	TEMPERATURA COINCIDENTE
Alt	ALTITUDE MÉDIA DA REGIÃO DE INSTALAÇÃO
A_c	AÇÃO DOS VENTOS NO CONDUTOR
V	COMPRIMENTO DO VÃO
α	FATOR DE EFETIVIDADE
C_{xc}	COEFICIENTE DE ARRASTO DO CONDUTOR
d	DIÂMETRO DO CONDUTOR
θ	ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO VENTO
A_i	AÇÃO DOS VENTOS NA CADEIA DE ISOLADORES
C_{xi}	COEFICIENTE DE ARRASTO DA CADEIA DE ISOLADORES
S_i	ÁREA PROJETADA ORTOGONALMENTE DA CADEIA DE ISOLADORES SOBRE UM PLANO VERTICAL

ABNT NBR 6123/1988

V_k	VELOCIDADE DE VENTO DE PROJETO
V_0	VELOCIDADE BÁSICA DE VENTO
S_1	FATOR TOPOGRÁFICO
S_2	FATOR DE CORREÇÃO PARA RUGOSIDADE DO TERRENO, DIMENSÃO DA EDIFICAÇÃO E ALTURA SOBRE O TERRENO
S_3	FATOR ESTATÍSTICO
F_r	FATOR DE RAJADA
p e b	FATORES RELACIONADOS À RUGOSIDADE DO TERRENO
z	ALTURA ACIMA DO NÍVEL GERAL DO TERRENO
t	INTERVALO DE TEMPO
L	ALTURA OU LARGURA DA SUPERFÍCIE FRONTAL
$V_t(h)$	VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO SOBRE T SEGUNDOS NO TOPO DA EDIFICAÇÃO
q	PRESSÃO DINÂMICA
Re	NÚMERO DE REYNOLDS
d	DIÂMETRO DO CONDUTOR
F_y	FORÇA DE ARRASTO PERPENDICULAR AO CONDUTOR

C_a	COEFICIENTE DE ARRASTO
V	COMPRIMENTO DO CONDUTOR
a	ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO VENTO
F_i	FORÇA DE ARRASTO PERPENDICULAR À CADEIA DE ISOLADORES
C_{ai}	COEFICIENTE DE ARRASTO
L_i	COMPRIMENTO DA CADEIA DE ISOLADORES
d_i	DIÂMETRO DA CADEIA DE ISOLADORES
K	COEFICIENTE QUE DEPENDE DA RELAÇÃO L_i/d_i

CÁLCULO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS

F'	FORÇA ELETROMAGNÉTICA CARACTERÍSTICA
μ_0	PERMEABILIDADE MAGNÉTICA NO VÁCUO
I_K''	CORRENTE DE CURTO CIRCUITO
a	DISTÂNCIA ENTRE AS FASES
l_c	COMPRIMENTO DO CONDUTOR
l_i	COMPRIMENTO DA CADEIA DE ISOLADORES
r	RELAÇÃO ENTRE AS FORÇAS F' E PESO
n	NÚMERO DE SUBCONDUTORES
m_s'	MASSA ESPECÍFICA DO CONDUTOR
g	ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE
δ	DIREÇÃO DA FORÇA RESULTANTE ENTRE O PESO DO CONDUTOR E F'
f_{es}	FLECHA
F_{st}	TRAÇÃO ESTÁTICA
T	PERÍODO DE OSCILAÇÃO
T_{res}	PERÍODO DE OSCILAÇÃO RESULTANTE
E_{eff}	MÓDULO DA ELASTICIDADE EFETIVO DO CONDUTOR
A_s	SEÇÃO TRANSVERSAL DO CONDUTOR
σ_{fin}	VALOR PARA O QUAL O MÓDULO DE YOUNG TORNA-SE CONSTANTE
E	ELASTICIDADE DO CONDUTOR
N	NORMA DA RIGIDEZ RESULTANTE ENTRE OS SUPORTES E OS CONDUTORES
S	CONSTANTE ELÁSTICA RESULTANTE DOS DOIS SUPORTES
ζ	FATOR DE STRESS
T_{ki}	DURAÇÃO DO CURTO-CIRCUITO
δ_{end}	ÂNGULO DE OSCILAÇÃO DO CONDUTOR QUANDO CESSA A PASSAGEM DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO
χ	PARÂMETRO PARA O CÁLCULO DO MÁXIMO ÂNGULO DE OSCILAÇÃO
δ_{max}	MÁXIMO ÂNGULO DE OSCILAÇÃO
Φ	PARÂMETRO DE CARGA
ψ	FATOR DE TENSÃO
l_v	COMPRIMENTO DO <i>DROPPER</i>

ϵ_{ela}	EXPANSÃO ELÁSTICA
ϵ_{th}	EXPANSÃO TÉRMICA
c_{th}	COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA DO MATERIAL
C_D	FATOR DE DILATAÇÃO
C_F	FATOR DE FORMA
f_{ed}	FLECHA DINÂMICA
h e w	DIMENSÕES DO <i>DROPPER</i> - ALTURA E COMPRIMENTO, RESPECTIVAMENTE
a_s	DISTÂNCIA ENTRE DOIS SUBCONDUTORES ADJACENTES
d	DIÂMETRO DOS SUBCONDUTORES
l_s	DISTÂNCIA ENTRE DOIS ESPAÇADORES
$v_1, v_2, v_3,$ v_4 e v_e	PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DE $F_{pl,d}$
f	FREQUÊNCIA
τ	CONSTANTE DE TEMPO DA REDE
F_v	FORÇA DEVIDA À PASSAGEM DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO ENTRE OS SUBCONDUTORES DO <i>BUNDLE</i>
ϵ_{st} e ϵ_{pi}	FATORES RELATIVOS À CONTRAÇÃO DO <i>BUNDLE</i>
j	PARÂMETRO QUE DETERMINA A OCORRÊNCIA DE COLISÃO EFETIVA
$F_{t,d}$	FORÇA DE <i>SWING-OUT</i>
$F_{f,d}$	FORÇA DE <i>DROP-BACK</i>
$F_{pi,d}$	FORÇA DE <i>PINCH</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1	DEFINIÇÕES	27
2.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.3	NORMA ABNT NBR 5422/1985	33
2.4	NORMA ABNT NBR 6123/1988	35
2.5	NORMA IEC 60865-1 - 2011 - TERCEIRA EDIÇÃO.....	35
2.6	BROCHURAS 105 E 214 DO CIGRÉ - “ <i>THE MECHANICAL EFFECTS OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN OPEN AIR SUBSTATIONS</i> ”	37
2.6.1	Brochura 105 - <i>The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Open Air Substations</i> - Parte I	37
2.6.2	Brochura 214 - <i>The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Open Air Substations</i> - Parte II	43
2.7	RESULTADOS DA PESQUISA COM EMPRESAS NACIONAIS	47
3	METODOLOGIAS DE CÁLCULO	51
3.1	CÁLCULO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS	51
3.1.1	Vãos descritos como catenária.....	52
3.1.2	Vãos descritos como parábolas	57
3.1.3	Considerações sobre desnível entre os suportes	59
3.1.4	Equação de mudança de estado.....	59
3.1.5	Considerações sobre cadeias de isoladores	62
3.2	CÁLCULO DOS ESFORÇOS DEVIDOS À AÇÃO DE VENTO.....	63
3.2.1	Norma ABNT NBR 5422/1985 - Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica..	63
3.2.1.1	<i>Velocidade básica de vento</i>	63
3.2.1.2	<i>Categoria do terreno</i>	64
3.2.1.3	<i>Correção do período de retorno</i>	65
3.2.1.4	<i>Correção de altura</i>	68
3.2.1.5	<i>Correção do período de integração para a velocidade média</i>	69
3.2.1.6	<i>Cálculo da carga de vento</i>	70
3.2.1.7	<i>Ação do vento nos condutores e na cadeia de isoladores</i>	70
3.2.2	Norma NBR 6123/1988 - Forças devidas ao vento em edificações	72
3.2.2.1	<i>Determinação do fator topográfico S_1</i>	73
3.2.2.2	<i>Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno: Fator S_2</i>	

3.2.2.3	<i>Fator estatístico S_3</i>	76
3.2.2.4	<i>Pressão dinâmica</i>	76
3.2.2.5	<i>Componente perpendicular ao cabo da força de arrasto</i>	76
3.2.3	Cargas de vento nas cadeias de isoladores	77
3.3	CÁLCULO DOS ESFORÇOS DINÂMICOS.....	78
3.3.1	Cálculo da força $F_{t,d}$ sem Considerar o Efeito do <i>Dropper</i>	79
3.3.2	Cálculo da Força $F_{t,d}$ Considerando o Efeito do <i>Dropper</i>	83
3.3.3	Cálculo da Força $F_{f,d}$	86
3.3.4	Cálculo da Força $F_{pi,d}$	86
3.3.4.1	<i>Caso em que há colisão - $j \geq 1$</i>	89
3.3.4.2	<i>Caso em que não há colisão - $j < 1$</i>	90
4	RESULTADOS	94
4.1	CÁLCULOS DETALHADOS: SUBESTAÇÃO 500 kV - VÃO DE 98 METROS COM 4 CONDUTORES RAIL POR FASE.....	95
4.1.1	Cálculo dos esforços para a condição inicial	95
4.1.2	Resultados Obtidos Considerando a Norma NBR5422	96
4.1.2.1	<i>Velocidade básica de vento</i>	96
4.1.2.2	<i>Categoria do terreno</i>	97
4.1.2.3	<i>Correção do período de retorno</i>	97
4.1.2.4	<i>Correção de altura</i>	99
4.1.2.5	<i>Correção do período de integração para a velocidade média</i>	99
4.1.2.6	<i>Cálculo da carga de vento</i>	100
4.1.2.7	<i>Ação do vento nos condutores e na cadeia de isoladores</i>	101
4.1.3	Norma NBR 6123/1988 - Forças devidas ao vento em edificações	102
4.1.3.1	<i>Determinação do fator topográfico S_1</i>	103
4.1.3.2	<i>Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno: Fator S_2</i> <i>104</i>	
4.1.3.3	<i>Fator estatístico S_3</i>	105
4.1.3.4	<i>Pressão dinâmica</i>	105
4.1.3.5	<i>Componente perpendicular ao cabo da força de arrasto</i>	106
4.1.3.6	<i>Cargas de vento nas cadeias de isoladores</i>	106
4.1.4	Determinação dos resultados para os esforços estáticos	107
4.1.4.1	<i>Equação de mudança de estado</i>	107
4.1.5	Determinação dos resultados para os esforços dinâmicos.....	108
4.1.5.1	<i>Cálculo da força $F_{t,d}$ sem Considerar o Efeito do Dropper</i>	109
4.1.5.2	<i>Cálculo da Força $F_{f,d}$</i>	112
4.1.5.3	<i>Cálculo da Força $F_{pi,d}$</i>	112
4.2	RESULTADOS OBTIDOS PARA OUTRAS CONDIÇÕES	116
4.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA OS DIVERSOS PARÂMETROS	118

4.3.1	Varição do comprimento do vão	118
4.3.2	Varição do condutor utilizado	126
4.3.3	Varição do valor da flecha adotada	133
4.3.4	Varição do número de espaçadores	140
4.3.5	Varição do valor do espaçamento entre os subcondutores	147
4.3.6	Varição do valor da magnitude da corrente de curto-circuito.....	151
4.3.7	Varição do valor da constante de <i>Spring</i> dos suportes	157
4.3.8	Varição do valor do tempo para eliminação do curto-circuito.....	163
5	CONCLUSÃO	169
5.1	PUBLICAÇÕES	170
5.2	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	171
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	172

1 Introdução

O dimensionamento das estruturas de suporte é uma etapa importante do projeto de uma subestação. Estas estruturas devem suportar as forças a elas impostas verticalmente, transversalmente e longitudinalmente. Verticalmente, tem-se o peso dos condutores de fase, cabos-guarda, cadeias de isoladores, ferragens, polos de seccionadoras entre outros. Transversalmente, tem-se a força devida ao efeito dos ventos atuando sobre cadeias de isoladores, condutores de fase e cabos-guarda. Longitudinalmente, tem-se a tração estática - determinada para as condições de flecha adotadas no projeto - e as trações dinâmicas, devidas à passagem da corrente de curto-circuito pelos condutores de fase. Os esforços dinâmicos compreendem três forças de tração: a tração $F_{t,d}$ de *swing-out* devida à força originada entre os condutores de fase, a tração $F_{f,d}$ de *drop-back* resultante do movimento do condutor de volta à posição original no momento em que a passagem da corrente de curto-circuito cessa e, por fim, a força de tração $F_{pi,d}$ de *pinch* resultante da interação entre subcondutores de uma mesma fase para o caso de utilização de mais de um condutor por fase (*bundle*).

O trabalho do autor em uma empresa de consultoria permitiu acesso a memórias de cálculo de diversas empresas nacionais e internacionais. A análise dos documentos mostrou que não existe um consenso no Brasil com relação às premissas a serem adotadas para o dimensionamento de estruturas em subestações isoladas a ar com barramentos flexíveis. Observou-se que as metodologias de cálculo dos esforços estáticos, em muitos casos, utilizam o equacionamento para linhas de transmissão desconsiderando o efeito das cadeias de isoladores, sendo que, para vãos menores como os de subestações, o efeito da cadeia de isoladores é mais significativo do que em uma linha de transmissão, pois, para este caso, o comprimento e massa das cadeias de isoladores influenciam fortemente os resultados das trações. A consideração do efeito de vento também não é padronizada, apesar de haver normatização deste item. Foi observada a utilização das normas ABNT NBR 5422/1985 - *Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica* [1] e ABNT NBR 6123/1988 - *Forças devidas ao vento em edificações* [2]. A ABNT NBR 5422/1985 é específica para linhas de transmissão, mas é também utilizada para vãos de subestações. A ABNT NBR 6123/1988 é utilizada para edificações de forma geral.

Dos trabalhos na empresa de consultoria, constatou-se que muitas das memórias de cálculo analisadas sequer consideravam o efeito da passagem da corrente de curto-circuito pelos

condutores de fase, ou seja, a estrutura era projetada baseada apenas no resultado dos esforços estáticos majorados por um fator de segurança. Em alguns dos projetos realizados ao longo do período de estágio e de trabalho como engenheiro, a empresa de consultoria informou à contratante sobre a necessidade de considerar os efeitos das correntes de curto-circuito, ou seja, as empresas contratantes, por vezes, desconheciam a existência destes esforços. Em outros casos, as empresas tinham conhecimento dos esforços dinâmicos, mas utilizavam os resultados de forma incorreta ou inadequada.

As estruturas de suporte e suas fundações representam uma pequena porcentagem dos custos totais de uma subestação. Entretanto, para otimizar os gastos é necessário que o dimensionamento destes componentes seja correto. As estruturas sobredimensionadas representam gastos desnecessários ao empreendimento, enquanto que estruturas subdimensionadas representam um risco à integridade da instalação e ao sistema elétrico ao qual a subestação se conecta.

Este trabalho tem como principal objetivo compilar, em um único documento, as informações e metodologias necessárias para o cálculo de esforços estáticos e dinâmicos em estruturas de subestações isoladas a ar com condutores flexíveis. As metodologias são apresentadas em detalhe com exemplos completos e considerações acerca da aplicação das normas utilizadas ao longo dos cálculos. Os resultados obtidos são apresentados e uma análise de sensibilidade é realizada para diversos parâmetros utilizados na obtenção dos esforços impostos às estruturas.

A dissertação está dividida em cinco capítulos além desta introdução.

O segundo capítulo faz um resumo dos objetivos de cada norma abordada no trabalho. As principais características e considerações são apresentadas. Além disto, aspectos importantes de outros trabalhos, utilizados como fonte de pesquisa e referência, são citados, bem como alguns dos resultados obtidos. Por fim, apresenta-se o resultado de uma pesquisa realizada junto à concessionárias e projetistas brasileiras relacionada às considerações acerca dos cálculos de esforços em estruturas de subestações isoladas a ar com condutores flexíveis. Esta pesquisa foi enviada a várias concessionárias e projetistas, no entanto não foram obtidas muitas respostas. É possível, entretanto, ter uma noção do que tem sido considerado no país com relação a este assunto.

O terceiro capítulo apresenta de forma resumida e comentada, quando necessário, o procedimento de cálculo para esforços estáticos. Posteriormente as duas normas para

considerações dos efeitos de vento são apresentadas e o procedimento para cálculo da ação de ventos nos condutores e nas cadeias de isoladores é detalhado. Para finalizar o capítulo, a metodologia de cálculo de esforços dinâmicos devidos à passagem da corrente de curto-circuito pelos condutores flexíveis, segundo a norma IEC 60865-1 [3], é apresentada.

O quarto capítulo apresenta os resultados detalhados obtidos para um vão de subestação considerando a metodologia de cálculo de esforços estáticos, as duas metodologias para cálculo da ação de ventos e os resultados para os esforços dinâmicos. Seguindo uma requisição de um projeto realizado, calculam-se os esforços considerando os efeitos de ventos e de curto-circuito simultaneamente, de acordo com a norma ABNT NBR 8681/2004 [4]. Ressalta-se que não há menção na IEC 60865-1 [3] de considerações acerca de efeitos simultâneos aos efeitos das correntes de curto-circuito. Posteriormente, são utilizados vãos típicos de uma subestação em 138 kV e de uma subestação em 500 kV para análise de sensibilidade dos esforços estáticos e dinâmicos com relação aos parâmetros utilizados para o cálculo. Várias condições são exploradas neste capítulo como: variação do comprimento do vão, utilização de espaçadores, variação das bitolas dos condutores, variação da corrente de curto-circuito, variação do espaçamento entre os subcondutores do *bundle*, variação do valor da constante de *Spring* “S” resultante dos suportes e variação do tempo para eliminação do curto-circuito.

O quinto capítulo apresenta as conclusões do trabalho bem como as propostas para trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Neste item são apresentadas definições de termos comuns utilizados ao longo do trabalho bem como são apresentados, de forma sucinta, os conteúdos e considerações das normas analisadas e de trabalhos publicados na área. Na última seção é apresentado o resultado de uma pesquisa realizada com empresas nacionais com relação às práticas adotadas para o dimensionamento das estruturas.

2.1 Definições

Neste item são definidos alguns termos comuns utilizados ao longo do trabalho:

- *Bundle*: Conjunto de dois ou mais subcondutores utilizados para uma fase;
- *Dropper*: Também chamado de pingado. Condutor de descida até os terminais de equipamentos ou barramentos;
- *Flecha*: Distância entre o ponto mais baixo da curva formada pelo condutor e os pontos de suporte. A flecha máxima ocorre para a temperatura máxima de operação considerada;
- *Isopletas*: Linha (curva) que apresenta valor idêntico de determinada grandeza;
- *Período de integração*: Tempo utilizado para determinação da média das velocidades de vento;
- *Temperatura coincidente*: Valor considerado como média das temperaturas mínimas diárias e suposto coincidente com a ocorrência da velocidade de vento de projeto;
- *Temperatura máxima*: Valor máximo com probabilidade de 2% de vir a ser excedido anualmente, obtido da distribuição de temperaturas máximas anuais;
- *Temperatura máxima média*: Valor médio da distribuição das temperaturas máximas diárias;
- *Temperatura mínima*: Valor mínimo com probabilidade de 2% de vir a ocorrer temperatura menor anualmente, obtido da distribuição de temperaturas mínimas anuais;
- *Tempo de retorno*: Intervalo de tempo estimado entre ocorrências de igual magnitude de um fenômeno natural;
- *Velocidade básica de vento (NBR 5422 [1])*: Velocidade de vento para um período de retorno de 50 anos, à altura de 10 m, terreno de categoria B e tempo de integração da média da velocidade de vento de 10 minutos;

- *Velocidade básica de vento (NBR 6123[2]):* Velocidade de vento para um período de retorno de 50 anos, à altura de 10 m, terreno aberto e plano e tempo de integração da média da velocidade de vento de 3 segundos;
- *Velocidade de projeto:* Valor determinado a partir da velocidade básica de vento, corrigido de modo a levar em consideração o grau de rugosidade do terreno da região, o tempo de retorno adotado, a altura de instalação e o intervalo de tempo necessário para que o obstáculo responda à ação do vento

2.2 Revisão Bibliográfica

Almeida e Santos [5] apresentam uma modelagem para o cálculo de flechas e tensões em vãos curtos de subestação considerando o efeito da cadeia de isoladores e o desnível entre as estruturas de suporte. O trabalho também apresenta um programa em “BASIC” para implementação computacional. Ressalta-se a importância de se considerar as cadeias de isoladores que, por seu comprimento, podem representar uma fração considerável do vão e que devido ao seu elevado peso unitário, se comparado ao peso unitário do condutor, atuam como contrapeso, influenciando, portanto, os valores de tensões e flechas nos condutores. Salienta-se que se trata de um trabalho do começo da década de oitenta.

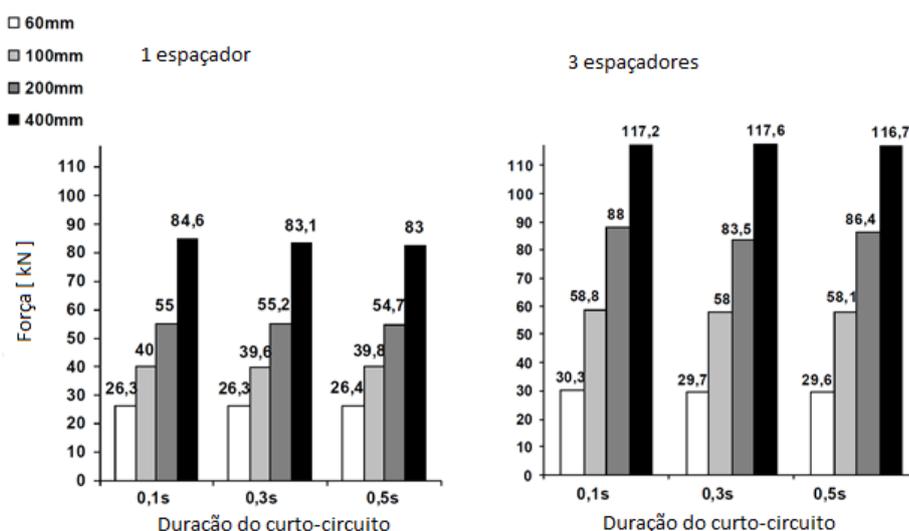
Kiessling et al. [6] descrevem em detalhes o processo de planejamento, projeto e construção de linhas aéreas para transmissão de energia elétrica. O capítulo 14 do livro é dedicado ao cálculo de flechas e trações em condutores. Neste capítulo os cálculos são apresentados tanto para o vão representado como uma parábola quanto para o vão representado como uma catenária. São feitas considerações sobre a influência da cadeia de isoladores e um equacionamento específico para esta condição é elaborado. Além disso, o desnível entre as estruturas de suporte do condutor também é analisado. O equacionamento proposto é detalhado no item 3.1 desta dissertação. Esta é a metodologia adotada ao longo de toda a dissertação para o cálculo de esforços estáticos.

Fuchs et al. [7] também apresentam uma metodologia para projeto de linhas aéreas de transmissão. No livro é descrito o processo de cálculo para condutores suspensos, mas a metodologia apresentada é mais simples do que aquela apresentada em [6]. No capítulo dois do livro são apresentadas as considerações com relação à ação dos ventos contidas na

ABNT NBR 5422/1985 [1] e o modo como este efeito deve ser levado para o equacionamento proposto. O efeito das cadeias de isoladores não é contabilizado no cálculo. Trata-se de um livro voltado ao projeto de linhas de transmissão exclusivamente, mas, de acordo com algumas memórias de cálculo obtidas durante o período de trabalho na empresa de consultoria, observou-se que é uma metodologia comumente empregada para o cálculo em vãos de subestações.

Miri e Stein [8] apresentam um estudo do comportamento dinâmico de um *bundle* com dois subcondutores ACSR 537/53 em uma subestação de 400 kV considerando um vão de 40 metros e a corrente de curto-circuito de 40 kA. Utilizando o método de elementos finitos, três parâmetros são alterados: o espaçamento entre os subcondutores (80, 100, 200 e 400 mm), duração do curto-circuito (0,1, 0,3 e 0,5 segundos) e o número de espaçadores ao longo do vão (1 ou 3 espaçadores). Conclui-se que o efeito da distância entre os subcondutores e o número de espaçadores podem fazer com que a força de *pinch* $F_{pi,d}$ seja a mais relevante entre as três forças dinâmicas calculadas. O número de espaçadores e a distância entre os subcondutores afeta a força de *drop-back* $F_{f,d}$ e a força de *swing-out* $F_{t,d}$ devido à redução da flecha dada a contração durante o curto-circuito. Ressalta-se que a existência de *droppers* no vão pode limitar o movimento do condutor reduzindo, por conseguinte, o efeito das forças de *swing-out* e *drop-back*. A Figura 2.1 apresenta os resultados obtidos para a força de *pinch* para as condições estudadas.

Figura 2.1 - Resultados obtidos para a força de *pinch* $F_{pi,d}$ [8].



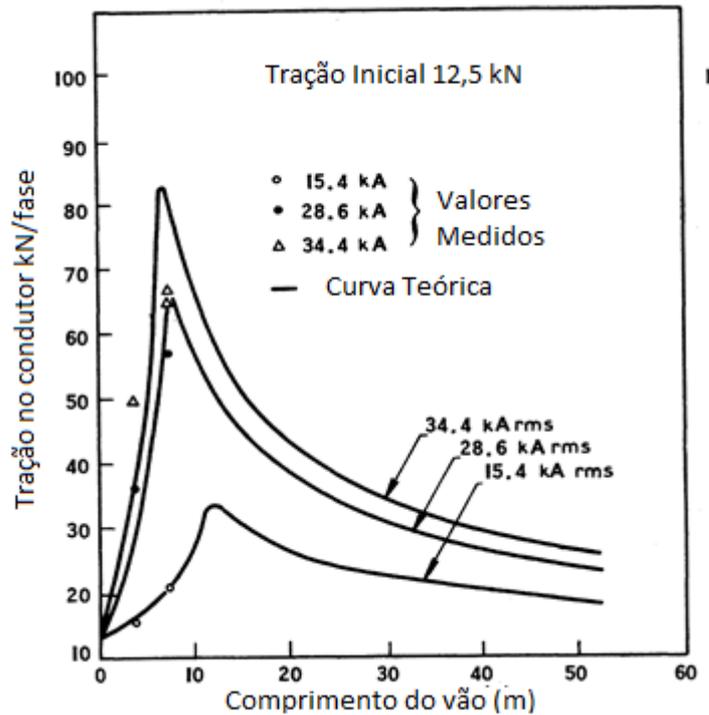
Manuzio [9] estuda o comportamento da força de compressão à qual os espaçadores são submetidos para especificação de suas características. O modelo matemático proposto foi validado com resultados experimentais. Conclui-se que a corrente de curto-circuito e o tempo pelo qual esta corrente flui pelos condutores devem ser considerados de forma individual: pode

acontecer de a duração da falta ser inferior ao tempo necessário para que o pico da tração dinâmica seja alcançado. As forças nos espaçadores aumentam com o aumento da distância dos subcondutores no *bundle*, diminuem moderadamente com o aumento do diâmetro do subcondutor e diminuem para o aumento do número de subcondutores por fase.

Herrman et al [10] determinam os esforços dinâmicos em subestações de alta tensão de 123 kV e 420 kV. Os parâmetros para os cálculos foram sistematicamente alterados e os resultados obtidos mostraram que a metodologia apresentada na norma IEC 865, acrescida de algumas considerações, era suficiente para o cálculo dos efeitos das correntes de curto-circuito em condutores tracionados. Foram realizadas medições em sete arranjos, todos para um vão de 40 metros: 3 arranjos em 123 kV variando o número de condutores por fase, o tipo de cadeia de isoladores e a corrente de curto-circuito e 4 arranjos em 420 kV variando o tipo de cadeia de isoladores e a bitola dos condutores (foram considerados dois subcondutores por fase em todos os testes em 420 kV).

Craig e Ford [11] também comparam resultados obtidos em testes com àqueles calculados. Em função de um aumento na geração e expansão da capacidade de transmissão o sistema de potência da Ontario Hydro - Canadá, com previsão de correntes de curto-circuito da ordem de 80 kA pico, os esforços dinâmicos nas estruturas de suporte tornaram-se uma preocupação. Testes foram realizados em um vão de 61 metros de uma subestação de 230 kV com dois subcondutores por fase, espaçados de 33 cm, utilizando cinco espaçadores, considerando um *dropper* no centro do vão e corrente de curto-circuito de 35 kA com duração de 5, 10 e 15 ciclos. Os resultados obtidos demonstram que a metodologia de cálculo representa uma boa aproximação dos resultados obtidos no teste. Conclui-se que a quantidade de espaçadores influencia diretamente o esforço e, para o caso em estudo, distâncias entre os espaçadores de 10 metros resultavam na pior condição para a força de *pinch* - forças superiores a 80 kN por fase. A Figura 2.2 ilustra os resultados obtidos para a força de *pinch*.

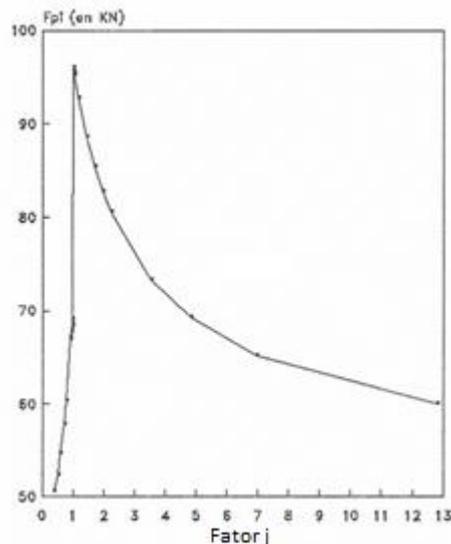
Figura 2.2 - Resultados obtidos para a força de *pinch* (adaptado de [11]).



Adnani et al. [12] comparam resultados para os esforços em vão com condutores em *bundle* obtidos numericamente com aqueles obtidos de forma experimental. O trabalho explora as limitações dos métodos de cálculo numéricos. Os seguintes parâmetros são avaliados:

- O fator j que determina se os condutores colidem efetivamente. É observado que para valores próximos ao limite $j = 1$ o valor de força de *pinch* aumenta consideravelmente - de 69 kN para 97 kN, conforme mostra a Figura 2.3;

Figura 2.3 - Valor da força de *pinch* $F_{pi,d}$ em função do parâmetro j (adaptado de [12]).



- A constante de *Spring* das estruturas de suporte, utilizadas para o cálculo da norma da rigidez. A Tabela 2.1 apresenta um caso para ilustrar a diferença nos resultados devida à adoção de diferentes valores para a constante de *Spring* S .

Tabela 2.1 - Comparação de resultados para diferentes valores da constante de *Spring* S .

	$F_{pi,d}$ (teste experimental)	$F_{pi,d}$ (calculado)
$S = 10^5$ N/m	40 kN	18,5 kN
$S = 2,1 \cdot 10^7$ N/m		38,4 kN

Lima e Castro [13] abordam a questão do valor da corrente de curto-circuito adotada para o dimensionamento de estruturas para barramentos aéreos de subestações. Para um vão de subestação foram calculados os esforços dinâmicos considerando as correntes de dimensionamento de equipamentos, indicadas nos leilões da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), e a corrente obtida no banco de dados de curto-circuito do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). Geralmente a corrente dos bancos de dados do ONS são inferiores àquelas exigidas para o dimensionamento de equipamentos. Neste trabalho estes valores eram: 40 kA - ANEEL e 16 kA - ONS. Os esforços resultantes foram muito menores para a corrente do banco de dados ONS. Ressalta-se que os esforços dinâmicos variam com o quadrado da corrente, ou seja, variações deste parâmetro alteram consideravelmente o valor final obtido para os esforços.

Em recente atualização dos Procedimentos de Rede do ONS [14] é determinado que para instalações acima de 230 kV as correntes de dimensionamento de equipamentos deverão ser utilizadas para dimensionamento de barramentos e instalações. Para níveis de tensão inferiores ainda não há documento oficial estabelecendo estes valores. A Tabela 2.2 apresenta os valores definidos nos Procedimentos de Rede.

Tabela 2.2 - Níveis de tensão e correntes de curto-circuito.

Nível de tensão [kV]	Valor da corrente [kA]
230	40
≥ 345	50

Lima et al. [15] discutem a questão sobre a corrente utilizada para dimensionamento de condutores e para o cálculo de esforços nas estruturas. Vãos de 500 kV e 230 kV são utilizados e são detalhados os dimensionamentos tanto dos barramentos quanto das estruturas. As correntes para dimensionamento maiores implicam condutores de maior bitola ou necessidade de utilização de *bundle*. Desta forma, tanto os esforços estáticos quanto os dinâmicos são

afetados pela corrente de dimensionamento utilizada. Os resultados obtidos para as considerações de corrente segundo os leilões da ANEEL e as correntes obtidas de bancos de dados do ONS são muito diferentes. Em alguns casos a relação entre os valores chega a ser de quatro para um para esforços dinâmicos e de três para um para esforços estáticos devido à variação da bitola do condutor e do número de subcondutores por fase no *bundle*. Conclui-se que a consideração de correntes segundo o banco de dados do ONS, para os casos estudados, representariam uma economia de 4% a 5% no custo global da subestação.

Sueta et al. [16] apresentam os resultados de ensaios realizados em laboratório. Apesar do estudo ter sido realizado para barramentos rígidos, a preocupação com os esforços dinâmicos é a mesma. Observa-se que existem possíveis diferenças entre os valores calculados pelas metodologias de normas e àqueles obtidos em ensaios, principalmente devidos aos fatores normalmente não contabilizados pelas metodologias de cálculo com relação ao comportamento oscilatório das estruturas.

2.3 Norma ABNT NBR 5422/1985

A norma ABNT NBR 5422/1985 [1] estabelece as condições básicas para o projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica com tensão máxima, valor eficaz fase-fase, acima de 38 kV e não superior a 800 kV.

As condições para cálculo mecânico dos cabos, de acordo com a norma ABNT NBR5422 [1], são as seguintes:

- Temperatura média sem vento;
- Temperatura máxima média sem vento;
- Temperatura mínima sem vento;
- Temperatura coincidente com vento de projeto.

Na hipótese de velocidade máxima de vento, o esforço de tração axial nos cabos não deve superar 50% da sua carga nominal de ruptura.

Para a condição de temperatura mínima, recomenda-se que o esforço de tração axial não supere 33% da carga de ruptura nominal do cabo.

Para a condição de temperatura média, condição de trabalho de maior duração, recomenda-se que os limites da Tabela 2.3, de acordo com o tipo de cabo, sejam respeitados:

Tabela 2.3 - Cargas máximas recomendadas para cabos na condição de trabalho de maior duração [1].

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

Os isoladores não deverão ser submetidos a um esforço superior a 40% da sua carga nominal de ruptura para cargas de duração prolongada e de 60% para cargas de curta duração.

O vento deve ser considerado atuando na direção em que ocasione a condição mais severa de carregamento. O pior caso é para um ângulo de incidência de 90°.

As cargas de projeto de suportes e fundações devem contemplar os esforços transmitidos pelos condutores devidos ao carregamento, o peso próprio do suporte, dos isoladores, das ferragens e dos condutores, a pressão de vento no suporte, nos isoladores, nas ferragens e nos condutores.

Recomenda-se multiplicar os valores obtidos para as cargas permanentes pelos seguintes fatores:

- 1,15 para cargas máximas de peso de cabos (vertical)
- 1,00 para o peso próprio do suporte, ferragens de cabos, cadeias de isoladores e para cargas verticais reduzidas;
- 1,10 para cargas transversais originadas da tração mecânica dos cabos.

2.4 Norma ABNT NBR 6123/1988

Esta norma fixa as condições exigíveis na consideração das forças devidas à ação estática e dinâmica do vento, para efeito de cálculo de edificações. Ao contrário da norma ABNT NBR 5422/1985 [1], que é específica para as linhas de transmissão, a norma ABNT NBR 6123/1988 [2] é de aplicação geral para diversos tipos de edificações.

O procedimento de cálculo envolve a determinação de uma velocidade básica de vento para a região onde a edificação será construída. Esta velocidade é corrigida com aplicação de fatores que consideram características do terreno, dimensões da edificação, altura de instalação e a importância da edificação em caso de ruína total da mesma.

A velocidade básica de vento é determinada de acordo com o período de integração adotado. Para edificações pequenas, até 80 metros em sua maior dimensão, utilizam-se os tempos de integração de 3 s (até 20 m), 5 s (entre 20 e 50 m) e 10 s (entre 50 e 80 m). Para edificações maiores a norma fornece uma metodologia em seu Anexo A para o cálculo do tempo de integração e, conseqüentemente, da velocidade básica de vento a ser considerada. Neste anexo são apresentados valores para tempos de integração de 3 s até 3600 s, para qualquer rugosidade do terreno.

A norma apresenta procedimentos para o cálculo para diversos tipos e formas de edificações. Para o presente trabalho são utilizadas as seções referentes a fios e cabos (para considerações acerca dos condutores) e à barra prismática (para considerações acerca das cadeias de isoladores).

2.5 Norma IEC 60865-1 - 2011 - Terceira Edição

Neste item são apresentadas as considerações da norma IEC 60865-1 - *Short-circuit currents - Calculation of effects - Part1: Definitions and calculation methods* [3]. A metodologia de cálculo é apresentada em detalhes na seção 3.3 do próximo capítulo.

A terceira edição da norma, de 2011, acrescentou considerações sobre *droppers* no meio do vão e os aspectos relacionados ao dimensionamento das fundações devidos às forças de tração dinâmicas.

A norma IEC 60865-1 [3] é aplicável para determinação dos efeitos mecânicos e térmicos das correntes de curto-circuito. São apresentadas metodologias para o cálculo para condutores rígidos e flexíveis e para o efeito térmico em condutores nus. A duração da corrente de curto-circuito nos condutores depende de características da proteção. Os procedimentos de cálculo são ajustados a requisitos práticos e contemplam simplificações conservativas. As cargas determinadas pelo procedimento de cálculo devem ser consideradas como cargas de projeto e utilizadas como cargas excepcionais sem considerações de fatores adicionais de segurança.

São calculadas três forças dinâmicas devidas à passagem da corrente de curto circuito:

- $F_{t,d}$ - é a força de *swing-out* devida ao balanço dos condutores durante o curto-circuito;
- $F_{f,d}$ - é a força de *drop-back* devida à volta à posição original do condutor quando a corrente de curto-circuito cessa. Essa força pode não existir caso algumas condições durante o balanço sejam satisfeitas (item 3.3.3);
- $F_{pi,d}$ - é a força de *pinch* devida às forças eletromagnéticas entre os subcondutores de uma mesma fase, no caso de utilização de *bundle*.

Os esforços devidos à corrente de curto-circuito fase-terra e trifásica simétrica são aproximadamente iguais. Todavia, durante curtos-circuitos fase-terra, o balanço dos condutores diminui as distâncias entre os condutores de fase. No caso de curtos-circuitos trifásicos, o condutor central praticamente não se move devido à inércia e às forças bidirecionais às quais é submetido.

Os cálculos devem ser executados com base na tração estática determinada para a mínima e máxima temperaturas (normalmente 0 °C e 80 °C). Para cada uma das três forças dinâmicas calculadas, o pior caso entre as máximas e mínimas temperaturas deve ser considerado para o projeto das estruturas.

A norma especifica que a metodologia é aplicável para configuração horizontal dos condutores. Para outros arranjos, esforços menores podem ocorrer. Além disto, a metodologia é aplicável para vãos de até 120 metros e flechas de 8% do comprimento do vão. Para vãos maiores o movimento dos condutores pode provocar menores esforços do que aqueles calculados pela metodologia.

A massa de grampos, *droppers* e conectores deve ser considerada para o cálculo dos esforços estáticos e para o cálculo da respectiva flecha. Para o *dropper*, metade do seu

comprimento deve ser considerada. Para os esforços dinâmicos, massas concentradas devem ser distribuídas ao longo do vão alterando o valor da massa por unidade do condutor. Entretanto, para este caso, as massas do *dropper* no meio do vão e seus respectivos conectores não devem ser consideradas.

Com relação aos isoladores, seus suportes e conectores, o maior valor obtido entre $F_{t,d}$, $F_{f,d}$, $F_{pi,d}$ não deve ser superior ao valor suportável dado pelos fabricantes. Os conectores para condutores flexíveis devem ser dimensionados para o máximo valor entre $1,5.F_{t,d}$, $1,0.F_{f,d}$ e $1,0.F_{pi,d}$.

Com relação à estrutura, isoladores e conectores com trações transmitidas por cadeias de isoladores, o maior valor obtido entre $F_{t,d}$, $F_{f,d}$, $F_{pi,d}$ (para as duas temperaturas - máxima e mínima) deve ser utilizado para o projeto da estrutura como carga estática. Os valores dinâmicos devem ser considerados apenas em duas fases enquanto a fase restante ficará sujeita apenas ao valor de tração estática.

Com relação às fundações, devido à inércia e à característica dinâmica do curto-circuito, os efeitos não devem ser considerados para o dimensionamento durante a fase de projeto de fundações monolíticas. Deve-se assumir que o projeto considerando as cargas estáticas e de vento garantem a estabilidade.

2.6 Brochuras 105 e 214 do CIGRÉ - “*The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Open Air Substations*”

Os dois itens a seguir apresentam de forma sucinta o conteúdo das duas brochuras citadas.

2.6.1 Brochura 105 - *The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Open Air Substations* - Parte I

A brochura 105 [17], referente à parte I e publicada em 1996, é uma revisão de uma brochura publicada em 1987 e foi desenvolvida pelo grupo de trabalho ESCC (*Effects of Short-Circuit Currents*) do CIGRÉ. O objetivo do documento é fornecer ao engenheiro de projetos

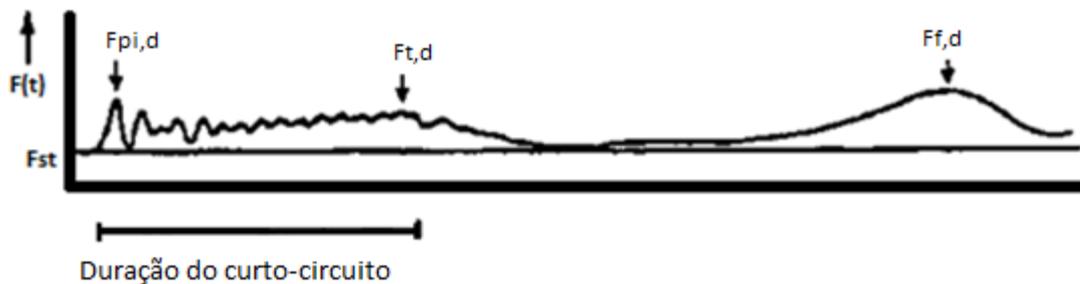
informações sobre os efeitos dos curtos-circuitos, métodos de cálculo e diretrizes para balizar o projeto de subestações isoladas a ar de alta e extra alta tensão.

Na primeira parte do documento são apresentadas as características básicas do curto-circuito como formas de onda típicas, a questão da assimetria, os tipos de curto-circuito. Apresenta-se também o cálculo das forças entre fases e seus efeitos em instalações com condutores flexíveis:

- Possíveis danos aos condutores e elementos a eles associados;
- Danos aos isoladores;
- Curtos-circuitos secundários devidos ao balanço e à expansão térmica e elástica dos condutores durante o curto-circuito primário.

A Figura 2.4 apresenta um exemplo do comportamento da força de tração à qual será submetida a estrutura durante um curto-circuito:

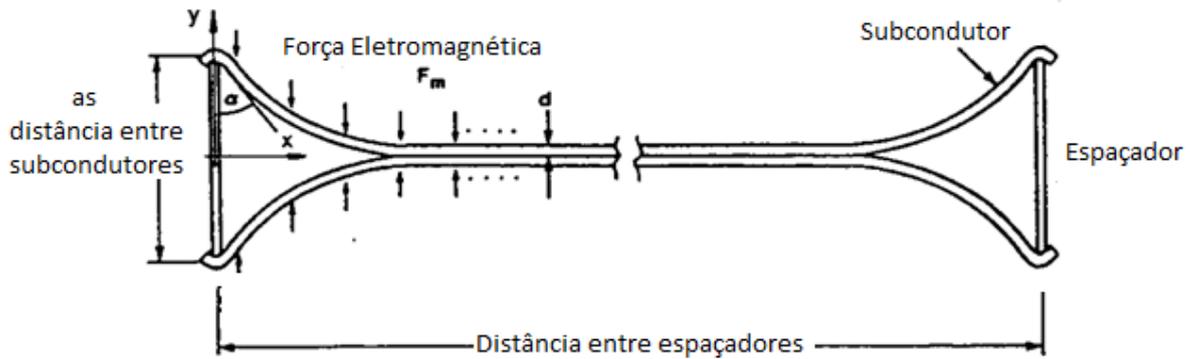
Figura 2.4 - Força de tração durante o curto-circuito (adaptado de [17]).



Observa-se no começo uma pequena força que representa a tração estática do condutor (F_{st}). Nos momentos iniciais do curto-circuito há um pico, representado na figura por $F_{pi,d}$, referente à força de *pinch* entre os subcondutores de uma mesma fase (quando há utilização de *bundle*). A

Figura 2.5 ilustra a posição dos subcondutores de um *bundle* durante a ocorrência de um curto-circuito. Neste período, surge uma força “ F_m ” de atração entre os subcondutores do *bundle* que faz com que haja uma aproximação, com colisão ou não, destes subcondutores.

Figura 2.5 - Posição dos subcondutores durante o curto-circuito (adaptado de [17]).

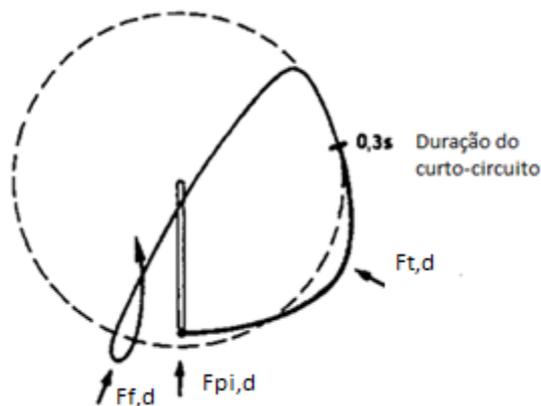


Após esta fase inicial observa-se a atuação de uma força oscilatória e, para o pico desta força é determinada $F_{t,d}$, que é a tração devida às forças entre fases que surgem com a passagem das correntes de curto-circuito. Estas forças provocam balanço no condutor, acarretando forças de tração na estrutura e este movimento pode ocasionar outros curtos-circuitos devidos à redução da distância entre as fases.

Por fim, tem-se a força $F_{f,d}$ que ocorre quando, após cessar a passagem de corrente pelos condutores, o condutor volta à posição original. Esta força é chamada de *drop-back*. Dependendo do ângulo que o condutor estiver nesse momento, com relação à posição inicial, e da magnitude da força entre as fases, essa força de *drop-back* pode ser desconsiderada. Entretanto, em alguns casos, esta é a força predominante e, portanto, aquela que é utilizada para o dimensionamento das estruturas.

A Figura 2.6 apresenta o movimento do condutor durante o curto-circuito do qual foram extraídas as trações apresentadas na Figura 2.4.

Figura 2.6 - Movimento do condutor durante o curto-circuito (adaptado de [17]).



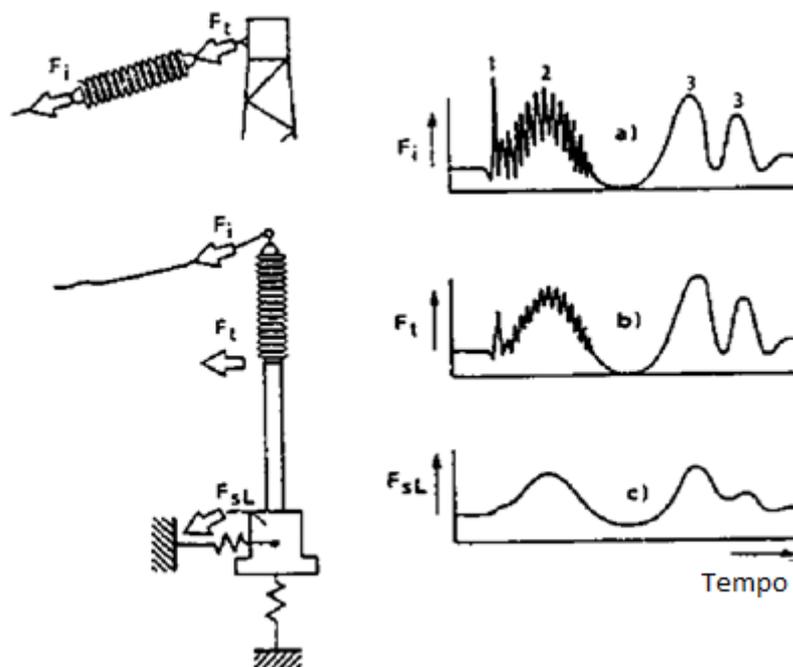
Recomenda-se, no documento, utilizar a metodologia de cálculo apresentada para vão de até 60 metros e com flechas de até 8% do vão. Afirma-se que para vão maiores o movimento do condutor resulta em esforços menores do que os calculados usando o equacionamento da brochura. Além disto, a metodologia é aplicável para configurações horizontais das fases e vãos nivelados. Para os casos não contemplados, recomenda-se utilizar a metodologia como primeira aproximação.

Após a apresentação e a caracterização do fenômeno são desenvolvidos os cálculos e considerações para determinação das forças atuantes nos condutores e estruturas. A norma IEC 60865-1 [3] é baseada no desenvolvimento destas brochuras (105 [17] e 214 [18]).

Por fim são apresentadas algumas considerações para o projeto:

- Na maioria dos casos a força de tração $F_{t,d}$ e $F_{pi,d}$ são máximas para a condição de mínima temperatura;
- A força $F_{f,d}$ é maior para temperaturas mais elevadas;
- Os cálculos de todas as forças devem ser efetuados para a máxima e mínima temperatura de projeto - para o Brasil, geralmente 80°C e 0°C, respectivamente;
- O maior valor obtido para cada força deve ser considerado;
- O maior valor entre as três forças calculadas não deve ser superior ao valor nominal suportável dos isoladores e suportes;
- A carga de projeto deve ser considerada como um caso excepcional, devido à baixa probabilidade de ocorrência de altos valores de curto-circuito;
- Para curtos-circuitos trifásicos deve-se levar em consideração que o máximo valor de $F_{t,d}$ e $F_{f,d}$ ocorrem em nas fases mais externas enquanto a fase interna fica submetida apenas à tração estática;
- Diferentes valores de $F_{pi,d}$ podem ocorrer em diferentes momentos nas três fases. Essa diferença pode ser considerada utilizando-se a mesma condição da proposição anterior: considera-se $F_{pi,d}$ atuando em apenas duas das três fases;
- O efeito dos esforços é atenuado para as fundações, de modo que muitas vezes os esforços devidos ao curto-circuito são desconsiderados no projeto. A Figura 2.7 apresenta um exemplo desta atenuação: observa-se que o efeito das forças dinâmicas é muito atenuado nas fundações das estruturas.

Figura 2.7 - Atenuação dos esforços nos suportes e nas fundações (adaptado de [17]).



- Combinações entre cargas de vento e curto-circuito não precisam ser levadas em consideração. Não existem procedimentos matemáticos disponíveis ou normas para considerar tal combinação. Entretanto, em alguns países, cargas preliminares à ocorrência do curto-circuito, como cargas de vento ou devidas a gelo, são consideradas simultaneamente ao curto-circuito. Isto depende das condições climáticas e dos requisitos particulares de projeto para cada local;

Ressalta-se que, à época da elaboração desta brochura, discutia-se a utilização ou não dos esforços devidos aos curtos-circuitos para o dimensionamento dos pórticos. No texto é comentado que normas alemãs orientavam ignorar estes esforços para o projeto de estruturas uma vez que não havia relato de danos estruturais devidos aos efeitos dos curtos-circuitos, os níveis de curto-circuito eram moderados e devido à falta de métodos de cálculo validados. Mas, mesmo nesta época, as empresas costumavam considerar estes esforços, posto que os níveis de curto-circuito no sistema estavam aumentando, devido a requisitos de segurança das subestações e pressão econômica. Estas informações de empresas foram obtidas através de pesquisa realizada pelo CIGRÉ.

2.6.2 Brochura 214 - *The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Open Air Substations - Parte II*

A brochura 214 [18], referente à parte II e publicada em 2002, é um complemento da brochura 105 [17] publicada em 1996. O objetivo do documento é:

- Fornecer base técnica para o projeto considerando cargas devidas a curtos-circuitos;
- Permitir que o engenheiro de subestação compreenda os fenômenos envolvidos e possa considerar os efeitos dos curtos-circuitos durante a fase de projeto e não simplesmente verificar estruturas já fabricadas e instaladas com relação à suportabilidade a estes efeitos;
- Auxiliar os fornecedores e fabricantes a projetar equipamentos não somente para as cargas estáticas, mas também para as cargas dinâmicas.

A brochura 105 [17] define que as cargas calculadas devem ser consideradas de forma quase-estática, o que não é completamente verdade na maioria dos casos. O método apresentado define o valor da máxima tração, mas não há detalhes sobre como esta tração deve ser considerada no projeto. A máxima tração no condutor não é necessariamente a carga utilizada para projeto.

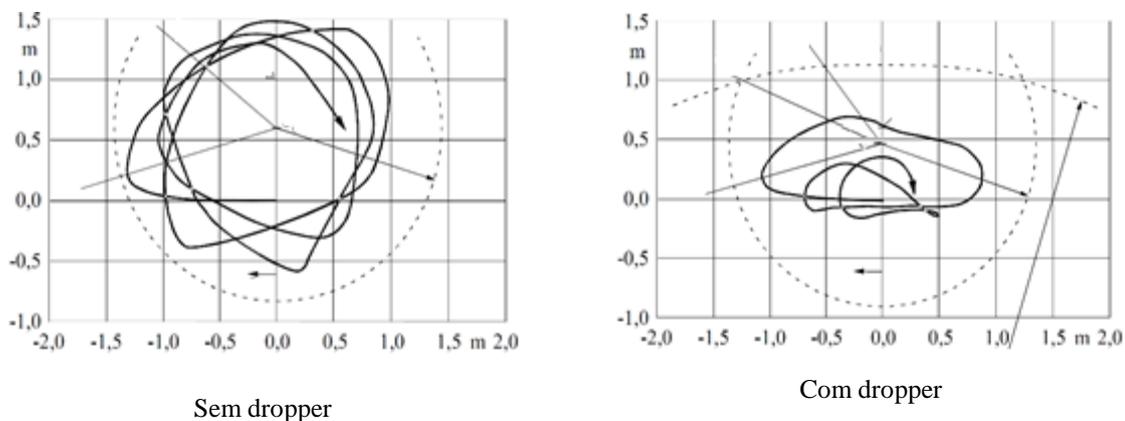
A brochura 214 [18] adiciona análises detalhadas de *droppers* nas extremidades do vão e no meio do vão. Além disso, são fornecidas informações sobre o comportamento dinâmico das estruturas para que o engenheiro possa se familiarizar com os conceitos envolvidos. O mais importante desta brochura é o desenvolvimento de um método para determinar uma carga equivalente de projeto considerando a dinâmica das estruturas.

Na primeira seção, novamente é apresentada uma visão geral sobre o fenômeno e as características das forças atuantes durante o curto-circuito. Ressalta-se um questionamento no documento sobre a necessidade de considerar a força $F_{pi,d}$ por ser uma força impulsiva, conforme mostrado na Figura 2.4.

O primeiro assunto tratado com profundidade é o efeito do *dropper*. São detalhadas várias configurações de *droppers* e tipos de conexões. Os efeitos do curto-circuito são estudados nos condutores do *dropper* e nas conexões destes aos equipamentos e condutores de fase. Neste trabalho apenas os efeitos nas trações dos condutores de fase serão abordados. Caso o *dropper* esteja localizado próximo às cadeias de isoladores, seu efeito pode ser negligenciado. Caso

esteja próximo ao centro do vão, seu efeito deve ser considerado. A Figura 2.8 mostra como o *dropper* no meio do vão afeta o movimento do condutor de fase durante o curto-circuito.

Figura 2.8 - Movimento do condutor de fase sem *dropper* e com *dropper* no meio do vão [18].



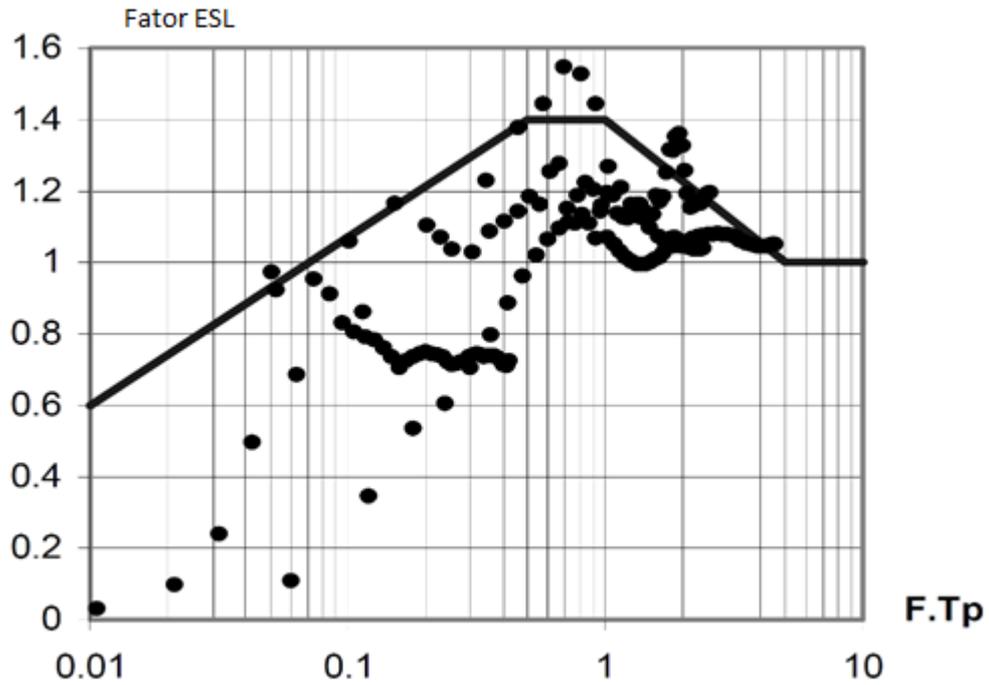
As considerações acerca dos efeitos dos *droppers* foram incluídas na terceira edição da norma IEC 60865-1 [3]. Os cálculos detalhados são apresentados no capítulo 3 deste trabalho.

Em seguida, os efeitos de *pinch* são detalhados. São apresentados resultados de medições para diversas configurações de *bundle* (variando-se a distância entre os subcondutores), número de espaçadores e duração da corrente de curto-circuito, trabalho semelhante ao executado por Miri e Stein [8]. Novamente é questionada a necessidade de se considerar estes efeitos e, em caso positivo, questiona-se como este efeito deve ser considerado. Ressalta-se que o efeito de *pinch* não pode ser considerado da mesma forma que as forças devidas ao balanço e à queda do condutor. Essas forças, $F_{t,d}$ e $F_{f,d}$, são consideradas como cargas quase-estáticas e a força de *pinch*, $F_{pi,d}$, é uma carga dinâmica de alta frequência.

Após a explanação sobre as condições citadas nos parágrafos anteriores, diretrizes para projeto são apresentadas. O cálculo de uma carga estática equivalente para as forças determinadas é proposto e é detalhado a seguir (este equivalente estático ainda não consta na norma IEC 60865-1).

Com relação ao efeito de *pinch*, é proposta uma envoltória para o valor do fator de multiplicação para a determinação da carga estática equivalente que depende da frequência da estrutura de suporte (que no eixo das abcissas da figura aparece multiplicada pelo tempo para o impacto). Esta curva (Figura 2.9) foi determinada a partir de testes em sistemas físicos.

Figura 2.9 - Fator multiplicativo para determinação da carga estática equivalente [18].

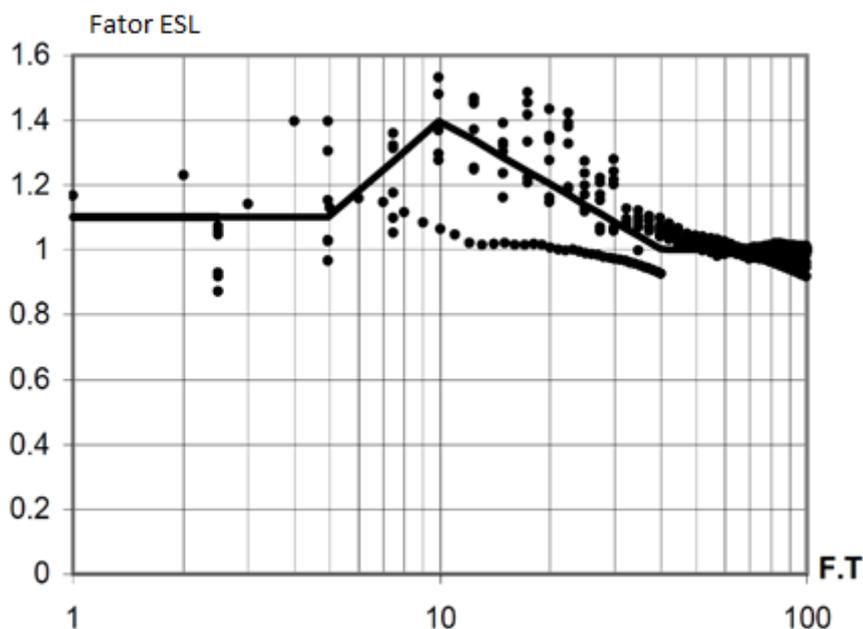


Para níveis de tensão mais elevados, as frequências relativas às estruturas de suporte são baixas, em torno de alguns Hertz. Associando baixas frequência a tempos para impacto também pequenos, da ordem de alguns milissegundos, tem-se que, para estes casos, o fator multiplicativo determinado é menor do que a unidade, ou seja, a carga estática equivalente pode ser significativamente reduzida. Para níveis de tensões mais baixos, entretanto, o fator multiplicativo pode ser superior à unidade, chegando até 1,4, de acordo com a

Figura 2.9. Nestes casos, o valor utilizado para o projeto será superior àquele calculado. Ressalta-se ainda que o fator multiplicativo é aplicado apenas à parcela dinâmica do cálculo da força de *pinch*.

Com relação às forças de *swing-out* ($F_{t,d}$) e de *drop-back* ($F_{f,d}$) a carga também é influenciada pelo comportamento dinâmico das estruturas. Também é definida uma envoltória para os valores do fator multiplicativo para determinação da carga estática equivalente em função do produto entre a frequência da estrutura de suporte e, neste caso, o período de balanço do condutor, conforme apresenta a Figura 2.10.

Figura 2.10 - Fator multiplicativo para determinação da carga estática equivalente [18].



Esta envoltória é aplicada a vãos cujas flechas não ultrapassem três metros e também foi obtida a partir de resultados práticos obtidos em testes.

2.7 Resultados da Pesquisa com Empresas Nacionais

Após a constatação da divergência na utilização de normas e padrões para o cálculo dos esforços estáticos e dinâmicos para o dimensionamento das estruturas em subestações isoladas a ar decidiu-se realizar uma pesquisa com empresas projetistas nacionais para levantamento de suas práticas. As questões utilizadas são apresentadas a seguir. Salienta-se que, para cada questão, havia um campo para comentários ou para explicação de critérios adotados ou observações.

1 - Para avaliar o efeito dos ventos sobre as estruturas da SE qual norma é utilizada?

2 - A norma ABNT NBR 8681/2004 é utilizada para considerar o efeito simultâneo da ação de vento e das correntes de curto-circuito?

3 - Em relação ao efeito das correntes de curto-circuito, a norma IEC 60865-1 é utilizada?

4 - Considerando as três forças definidas pela IEC 60865-1 (*swint-out force*, *drop-back force* e *pinch force*).

a) Utiliza-se algum critério para a composição destas forças? Qual?

b) Para o caso de mais de um condutor por fase (*bundle*) utilizam-se espaçadores para a redução do efeito da força *pinch* sobre a força total nas estruturas? Qual o critério?

5 - Na utilização da norma IEC 60865-1 (se for o caso), consideram-se os condutores verticais (pingados ou “*droppers*”) ao longo do barramento?

6 - Como informação adicional, a empresa possui SE com arranjo físico mais frequente na seguinte combinação:

- () Barramentos com condutores flexíveis e ligações entre equipamentos idem;
- () Barramentos com condutores flexíveis e ligações entre equipamentos c/ tubos;
- () Barramentos com condutores em tubo e ligações entre equipamentos idem;
- () Barramentos com condutores em tubo e ligações entre equipamentos. c/ cond. flexíveis.

Obteve-se resposta aos questionamentos de apenas seis empresas. Entretanto, apesar do número pequeno de respostas, é possível notar que não há convergência dos critérios adotados. Optou-se por não revelar o nome das empresas envolvidas sendo aqui denominadas apenas de empresas A, B, C, D, E e F. As respostas ao questionamento são apresentadas a seguir:

Tabela 2.4 - Respostas obtidas da Empresa A.

Questão	Resposta	Comentários
1	NBR5422 NBR6123	Para esforços de vento em Linhas de Transmissão e Barramentos aéreos, aplica-se a NBR 5422. No caso de casas e demais estruturas (pórticos, por exemplo), aplica-se a NBR 6123.
2	Sempre	-
3	Sempre	-
4a	Sim	Considera-se, conforme previsto na própria IEC, a maior dentre as três como Esforço Dinâmico.
4b	Sim	Estima-se uma quantidade padronizada de espaçadores e verifica-se o resultado da força de <i>pinch</i> . Caso haja a possibilidade dessa força impactar no projeto, as distâncias entre espaçadores são reavaliadas.
5	Sim	Sim, tanto como cargas mecânicas quanto, se aplicável, como condutores da corrente de curto-circuito, tendo seus próprios valores de esforços dinâmicos.
6	-	Barramentos com condutores flexíveis e ligações entre equipamentos idem

Tabela 2.5 - Respostas obtidas da Empresa B.

Questão	Resposta	Comentários
1	NBR 6123	-
2	Nunca	-
3	Sempre	Novos projetos a partir de 2011
4a	Sim	Depende da aplicação. Para fundações seguimos a recomendação da IEC 60865-1 (item 6.5.3). Para isoladores de pedestal item 6.5.1 e pórticos o item 6.5.2
4b	-	Utilizamos espaçadores. O critério é verificar o vão e dividir o mesmo em até 4 trechos (vãos até 50m) e até 8 trechos em vão maiores (até 120 m)
5	Sim	Consideramos em alguns casos mais críticos.
6	-	Barramentos com condutores flexíveis e ligações entre equipamentos idem

Tabela 2.6 - Respostas obtidas da Empresa C.

Questão	Resposta	Comentários
1	NBR 6123	
2	Nunca	
3	Sempre	
4a	Sim	De acordo com a IEC 60865-1.
4b	Não	Utilizam-se espaçadores para os cabos de mesma fase independente das forças atuantes. É definição de critério de projeto.
5	Sim	Sim, os pingados são considerados, mas por vezes verificamos projetistas que, para arranjos diferentes de disjuntor e meio, consideram apenas os pingados entre os barramentos e os condutores da barra superior de transferência ou barra inferior dos equipamentos do vão. Ou seja, não consideram os pingados dos seccionadores de fechamento em viga
6		Barramentos com condutores flexíveis e ligações entre equipamentos idem

Tabela 2.7 - Respostas obtidas da Empresa D.

Questão	Resposta	Comentários
1	NBR 6123	
2	Nunca	
3	Às vezes	Passamos a utilizar este critério nas últimas duas subestações que construímos
4a	Sim	Não utilizamos nenhum critério específico, além do recomendado pela norma.
4b	-	Utilizamos os espaçadores em um dos casos que tivemos, porém, o trecho era relativamente curto, portanto usamos apenas um espaçador.
5	Não	Não consideramos
6		Barramentos com condutores flexíveis e ligações entre equipamentos idem

Tabela 2.8 - Respostas obtidas da Empresa E.

Questão	Resposta	Comentários
1	NBR 6123	-
2	Nunca	-
3	Sempre	-
4a	Sim	Não temos considerado
4b	-	Sem considerações sobre espaçadores
5	Sim	-
6		Barramentos com condutores flexíveis e ligações entre equipamentos idem Barramentos com condutores em tubo e ligações entre equipam. c/ cond. flexíveis

Tabela 2.9 - Respostas obtidas da Empresa F.

Questão	Resposta	Comentários
1	NBR 6123	
2	Sim	Ou de acordo com solicitação do cliente
3	Sempre	
4a	Sim	As considerações recomendadas pela norma IEC 60865-1 são seguidas
4b	Sim	De acordo com os resultados obtidos para as forças de <i>pinch</i> , caso sejam significativos para o dimensionamento das estruturas, estuda-se alterar o número de espaçadores utilizados para reduzir esta força
5	Sim	Consideram-se os pingados, de acordo com a norma IEC 60865-1
6		Barramentos com condutores flexíveis e ligações entre equipamentos idem

Das tabelas 2.4 a 2.9 apresentadas é possível notar que não há convergência dos critérios adotados. Entre as empresas consultadas que responderam aos questionamentos há concessionárias de energia, fabricantes de equipamentos e projetistas nacionais.

3 Metodologias de Cálculo

Nesta seção é apresentada a metodologia para cálculo de esforços estáticos segundo Kiessling et al [6], metodologia esta que considera o efeito das cadeias de isoladores e do desnível entre as estruturas de suporte. Em seguida são apresentadas as metodologias para consideração acerca dos efeitos da ação dos ventos segundo a ABNT NBR 5422/1985 [1] e, na penúltima seção do capítulo, a ABNT NBR 6123/1988 [2]. Por fim, a metodologia para o cálculo de esforços dinâmicos é apresentada, conforme a norma IEC 60865-1 [3].

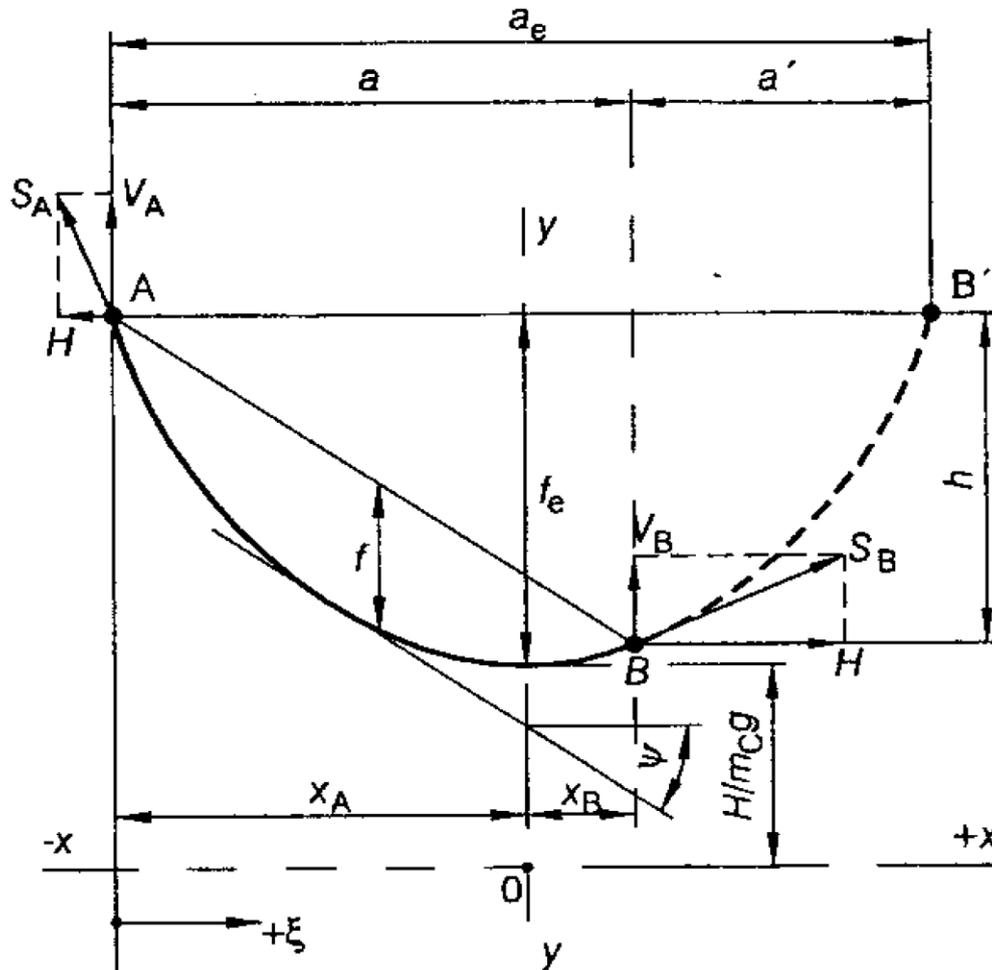
3.1 Cálculo dos esforços estáticos

Nesta seção é apresentada a metodologia para cálculo de esforços estáticos nas estruturas de subestações isoladas a ar com barramentos flexíveis. Vale ressaltar que a determinação dos esforços estáticos é essencial para o cálculo dos esforços dinâmicos devidos à passagem das correntes de curto-circuito pelos condutores uma vez que o cálculo de todos os esforços dinâmicos depende do esforço estático inicial, conforme mostrado na seção 3.3 deste capítulo.

Kiessling et al. [6] assumem que as características e dimensões dos condutores tracionados são constantes, pelo menos entre os dois suportes. O peso do condutor por unidade de comprimento, a seção transversal e outras características não mudam com o comprimento do vão. Assume também que os condutores são presos de forma rígida, mas com um pivô, ou seja, não há momento de flexão neste ponto.

O condutor entre dois suportes no vão pode ser descrito como uma catenária ou aproximado para uma parábola. A Figura 3.1 apresenta as variáveis utilizadas para o cálculo, segundo Kiessling et al. [6].

Figura 3.1 - Variáveis utilizadas para os cálculos [6].

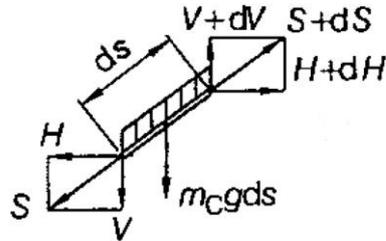


3.1.1 Vãos descritos como catenária

Nesta seção são apresentadas as considerações para determinação da curva que descreve o condutor para um determinado vão e para uma determinada flecha.

Parte-se das condições de equilíbrio das forças atuando em um comprimento infinitesimal “ ds ” do condutor. O balanço de forças é efetuado para as direções vertical e horizontal, conforme apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Diagrama das forças atuando no condutor [6].



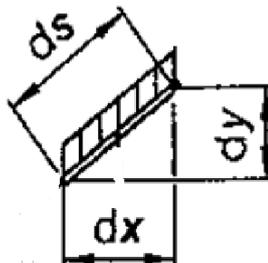
A partir da condição de equilíbrio, na vertical, tem-se que:

$$m_c \cdot g \cdot ds = V + dV - V \quad (3.1)$$

Onde:

- m_c é massa do condutor por unidade de comprimento (kg/m);
- g é a aceleração da gravidade (m/s^2);
- ds representa o comprimento infinitesimal do condutor (m);
- V é a componente vertical da força de tração que atua no condutor (N);
- dV é a variação da componente vertical da força de tração entre os dois extremos do comprimento ds considerado (N);

Figura 3.3 - ds decomposto em componentes verticais e horizontais [6].



Pode-se ainda escrever, a partir da Figura 3.3, que:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 \Rightarrow ds = dx \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (3.2)$$

Substituindo “ ds ” na Equação (3.1) vem que:

$$\frac{dV}{dx} = m_c \cdot g \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (3.3)$$

Da condição de equilíbrio na Figura 3.2, na horizontal tem-se que:

$$H + dH - H = 0 \quad (3.4)$$

Sendo “H” a componente horizontal da força que traciona o condutor.

Constata-se, da equação (3.4), que a componente horizontal da tração é constante ao longo da catenária formada pelo condutor no vão. Disto, pode-se escrever uma expressão para o equilíbrio dos momentos no centro de gravidade de um elemento do condutor:

$$H \cdot dy = V \cdot dx \Rightarrow V = H \cdot \frac{dy}{dx} \quad (3.5)$$

Diferenciando a expressão obtida com relação a “x”, tem-se que:

$$\frac{dV}{dx} = H \cdot \frac{d^2y}{dx^2} \quad (3.6)$$

Substituindo (3.6) na expressão (3.3), obtém-se a equação diferencial da curva:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{m_c \cdot g}{H} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (3.7)$$

Busca-se nesta etapa obter uma função do tipo $y = f(x)$. Para tanto, é necessário integrar ambos os lados da expressão (3.7). Rearranjando-se a equação (3.7), tem-se que:

$$\frac{\frac{d^2y}{dx^2} \cdot \frac{dy}{dx}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} \cdot dx = \frac{m_c \cdot g}{H} \cdot \frac{dy}{dx} \cdot dx \quad (3.8)$$

Obtém-se então, a partir da integração da expressão anterior, que:

$$\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} = \frac{m_c \cdot g}{H} \cdot (y - y_0) \quad (3.9)$$

Isolando dy/dx , vem:

$$\frac{dy}{dx} = \sqrt{\left(\frac{m_c \cdot g}{H} \cdot (y - y_0)\right)^2 - 1} \quad (3.10)$$

Da integral da expressão anterior, resulta que:

$$\cosh^{-1}\left(\frac{m_c \cdot g}{H} \cdot (y - y_0)\right) = \left(\frac{m_c \cdot g}{H} \cdot (x - x_0)\right) \quad (3.11)$$

Isolando-se a variável “y”:

$$y = \frac{H}{m_c \cdot g} \cdot \left[\cosh\left(\frac{m_c \cdot g}{H} \cdot (x - x_0)\right) + C_0 \right] \quad (3.12)$$

Na equação (3.12) foi feita a seguinte substituição:

$$y_0 = \frac{H \cdot C_0}{m_c \cdot g} \quad (3.13)$$

Como mencionado no início deste item, a forma do condutor entre dois pontos de fixação nos suportes é de uma catenária ou um cosseno hiperbólico (equação (3.12)).

Para simplificar e facilitar a utilização da equação (3.12) pode-se alterar a origem do sistema de coordenadas para que o vértice da curva formada pelo condutor coincida com o ponto $V(0, \frac{H}{m_c g})$. Desta forma, pode-se reescrever a equação (3.12) da seguinte forma:

$$y = \frac{H}{m_c \cdot g} \cdot \left[\cosh\left(\frac{m_c \cdot g \cdot x}{H}\right) \right] \quad (3.14)$$

O cálculo da flecha para qualquer ponto ao longo da curva formada pelo condutor é efetuado com a utilização da expressão (3.15):

$$f = \frac{h}{a} \cdot (x - x_a) + \frac{H}{m_c \cdot g} \cdot \left[\cosh\left(\frac{m_c \cdot g \cdot x_a}{H}\right) - \cosh\left(\frac{m_c \cdot g \cdot x}{H}\right) \right] \quad (3.15)$$

Onde:

- a é o comprimento do vão entre os pontos de fixação (m);
- x_a representa a distância entre o ponto mais baixo da curva e o ponto de fixação do condutor (m);
- h representa o desnível entre pontos de fixação do condutor (m).

Para a máxima flecha, conforme explicitado nos parágrafos anteriores, considera-se $x = 0$. A origem do sistema de coordenadas foi alterada de forma que o ponto $x = 0$ coincida com o ponto mais baixo da curva. Desta forma:

$$f = -\frac{h \cdot x_a}{a} + \frac{H}{m_c \cdot g} \cdot \left[\cosh\left(\frac{m_c \cdot g \cdot x_a}{H}\right) - 1 \right] \quad (3.16)$$

A expressão para máxima flecha depende da distância “ x_a ” entre o ponto mais baixo da curva e o ponto de fixação e da tração horizontal “ H ”. Entretanto, estes valores não são conhecidos, ao contrário da diferença entre as alturas dos suportes “ h ”, do comprimento total do vão a e da flecha máxima admissível para o vão.

Para determinar o valor “ x_a ” é necessário utilizar o comprimento total do condutor entre os pontos de fixação. Utilizando a fórmula para comprimento de uma curva vem que:

$$L = \int_{x_a}^{x_b} \sqrt{1 + \left[\frac{H}{m_c \cdot g} \cdot \sinh\left(\frac{m_c \cdot g \cdot x}{H}\right) \right]^2} dx = \frac{H}{m_c \cdot g} \cdot \left[\cosh\left(\frac{m_c \cdot g \cdot x_b}{H}\right) - \cosh\left(\frac{m_c \cdot g \cdot x_a}{H}\right) \right] \quad (3.17)$$

Utilizando as relações de transformação da soma da trigonometria, pode-se transformar os termos hiperbólicos em um produto:

$$L = 2 \cdot \frac{H}{m_c \cdot g} \cdot \cosh\left(\frac{m_c \cdot g \cdot (x_b + x_a)}{2 \cdot H}\right) \cdot \sinh\left(\frac{m_c \cdot g \cdot (x_b - x_a)}{2 \cdot H}\right) \quad (3.18)$$

Além do valor do comprimento do cabo, utiliza-se a distância vertical h entre os pontos de suporte “ x_a ” e “ x_b ” (desnível entre os pontos de suporte) para determinação do valor de “ x_a ”. Para tanto, na equação (3.15), considera-se $x = x_b$ e $x_b - x_a = a$. No ponto $x = x_b$ tem-se que a flecha é zero, uma vez que este é o ponto em que o cabo se conecta à estrutura de suporte. A variável a representa o comprimento do vão e é justamente a diferença entre os pontos de conexão às estruturas de suporte. Desta forma, vem que:

$$h = \frac{H}{m_c \cdot g} \cdot \left[\cosh\left(\frac{m_c \cdot g \cdot x_b}{H}\right) - \cosh\left(\frac{m_c \cdot g \cdot x_a}{H}\right) \right] \quad (3.19)$$

Utilizando novamente as relações de transformação de soma da trigonometria tem-se que:

$$h = \frac{2 \cdot H}{m_c \cdot g} \cdot \sinh\left(\frac{m_c \cdot g \cdot (x_b + x_a)}{2 \cdot H}\right) \cdot \sinh\left(\frac{m_c \cdot g \cdot (x_b - x_a)}{2 \cdot H}\right) \quad (3.20)$$

Subtraindo (3.20) de (3.18) obtém-se a seguinte expressão:

$$L - h = \frac{2 \cdot H}{m_c \cdot g} \cdot \sinh\left(\frac{m_c \cdot g \cdot (x_b - x_a)}{2 \cdot H}\right) \cdot e^{(-m_c \cdot g \cdot (x_a + x_b) / 2 \cdot H)} \quad (3.21)$$

Por fim, isolando-se “ x_a ” na equação acima, tem-se que:

$$x_a = \frac{H}{m_c \cdot g} \cdot \ln \left[\frac{H}{m_c \cdot g \cdot (L-h)} \cdot (1 - e^{-m_c \cdot g \cdot a/H}) \right] \quad (3.22)$$

Verifica-se que o valor de “ x_a ” depende da tração horizontal “ H ”, também desconhecida. Para utilização do método, um valor inicial de tração é adotado, todos os parâmetros são calculados e o valor da flecha é verificado. Caso não seja o valor desejado de flecha o valor da tração inicial é alterado e o processo é realizado novamente.

$$f = \frac{H}{m_c \cdot g} \cdot \left[\cosh\left(\frac{m_c \cdot g \cdot x_a}{H}\right) - 1 \right] \quad (3.23)$$

Para determinar a força resultante que age no condutor é necessário considerar a força devida ao peso do condutor, a força vertical. Da expressão (3.5) vem que:

$$V = H \cdot \frac{dy}{dx} = H \cdot \sinh\left(\frac{m_c \cdot g \cdot x}{H}\right) \quad (3.24)$$

3.1.2 Vãos descritos como parábolas

Uma boa aproximação à catenária apresentada no item anterior é a parábola. As equações para a parábola são mais simples e facilitam o processo de cálculo. Para esta abordagem o termo $\left(\frac{dy}{dx}\right)^2$ é ignorado na equação (3.3), assumindo que representa um valor muito pequeno se comparado à unidade, portanto:

$$\frac{dV}{dx} = m_c \cdot g \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} = m_c \cdot g \quad (3.25)$$

Além disso, na equação (3.7), fazendo as mesmas considerações, tem-se que:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{m_c \cdot g}{H} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} = \frac{m_c \cdot g}{H} \quad (3.26)$$

Esta simplificação implica considerar a distribuição da massa do condutor ao longo do vão e não ao longo da curva formada pelo condutor.

Para o equacionamento, o vértice da parábola coincidirá com a origem dos eixos de coordenadas, ou seja, os termos “b” e “c” serão nulos. A partir desta consideração tem-se que a equação da parábola terá a seguinte forma:

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c = \frac{m_c \cdot g}{2 \cdot H} \cdot x^2 \quad (3.27)$$

A flecha para qualquer ponto ao longo da curva, com relação aos pontos do suporte, é dada pela subtração da coordenada “y” do ponto de suporte e do ponto de interesse da curva mais uma parcela devida ao desnível entre os pontos de suporte, quando houver diferença entre as alturas dos suportes.

$$f = \frac{m_c \cdot g}{2 \cdot H} \cdot (x_a^2 - x_b^2) + \frac{h}{a} \cdot (x - x_a) \quad (3.28)$$

Para determinação da distância do vértice da parábola “x_a” até a estrutura de suporte considera-se a relação x_a + a = x_b e, além disto, considera-se o fato de que no ponto de suporte “b” a flecha deve ser zero, assim como no ponto de suporte a.

$$0 = \frac{m_c \cdot g}{2 \cdot H} \cdot (x_a^2 - x_b^2) + \frac{h}{a} \cdot (x_b - x_a) \Rightarrow x_a = \frac{H}{m_c \cdot g} \cdot \frac{h}{a} - \frac{a}{2} \quad (3.29)$$

A flecha pode ser obtida a partir da expansão em série de potência do cosseno hiperbólico da expressão (3.16), considerando apenas o primeiro termo série e supondo os suportes à mesma altura:

$$f = \frac{H}{m_c \cdot g} \cdot \left[\cosh\left(\frac{m_c \cdot g \cdot a}{2 \cdot H}\right) - 1 \right] = \frac{H}{m_c \cdot g} \cdot \left[1 + \left(\frac{m_c \cdot g \cdot a}{2 \cdot H}\right)^2 - 1 \right] = \frac{m_c \cdot g \cdot a^2}{8 \cdot H} \quad (3.30)$$

O comprimento do condutor entre os dois pontos de suporte é dado por:

$$L = \int_{-a/2}^{a/2} \sqrt{1+f'(x)^2} dx = \int_{-a/2}^{a/2} \sqrt{1 + \left(\frac{m_c \cdot g \cdot x}{H}\right)^2} dx = a \cdot \left[1 + \frac{8}{3} \cdot \left(\frac{f_{\text{máx}}}{a}\right)^2 \right] \quad (3.31)$$

3.1.3 Considerações sobre desnível entre os suportes

Para considerar o desnível entre os suportes dos condutores, determina-se um vão equivalente com os suportes à mesma altura. A Figura 3.1 apresenta um exemplo: o ponto de suporte B apresenta desnível com relação ao ponto A. Calcula-se então um vão equivalente AB', sendo B' um ponto com desnível zero em relação ao ponto A.

O cálculo do comprimento do vão equivalente “ a_e ” é dado pela equação (3.32):

$$a_e = 2 \cdot |x_a| = \frac{2 \cdot H}{m_c \cdot g} \cdot \ln \left[\frac{H}{m_c \cdot g \cdot (L-h)} \cdot (1 - e^{-m_c \cdot g \cdot a/H}) \right] \quad (3.32)$$

Considerando a curva formada pelo condutor descrita como uma parábola, um vão equivalente também é determinado e os cálculos devem ser realizados da mesma forma.

$$a_e = a + \frac{2 \cdot H \cdot h}{m_c \cdot g \cdot a} \quad (3.33)$$

A partir do comprimento calculado do vão equivalente, utiliza-se a metodologia descrita anteriormente para o cálculo das trações às quais o condutor estará submetido.

3.1.4 Equação de mudança de estado

Para variações de temperatura ou de carga no condutor o seu comprimento também varia. O comprimento do condutor para uma condição de temperatura “ θ_2 ” e uma condição de carga “ m_{C2} ” pode ser descrito em função do comprimento e da condição de carga do condutor para as condições iniciais.

$$L_2 = L_1 \cdot (1 + e_{th}) \cdot (1 + e_{el}) \quad (3.34)$$

Onde:

- e_{th} representa a expansão devido à variação de temperatura;
- e_{el} representa a expansão devido à elasticidade do condutor.

A expansão térmica depende do coeficiente de expansão térmica ou coeficiente de dilatação linear e da variação da temperatura. A expansão devida à elasticidade depende das forças às quais o condutor está submetido, mais especificamente da diferença entre estas forças, do módulo da elasticidade e da seção transversal do condutor. Isto posto, é possível reescrever a expressão anterior da seguinte forma:

$$L_2 = L_1 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta) \cdot \left(1 + \frac{T_2 - T_1}{E \cdot A}\right) \quad (3.35)$$

Onde:

- α é o coeficiente de dilatação linear do condutor ($1/^\circ\text{C}$);
- $\Delta\theta$ é a variação de temperatura entre os dois estados ($^\circ\text{C}$);
- T é a força resultante no condutor, resultante da soma vetorial da tração H e do peso do condutor até o ponto de flecha máxima (N);
- E é o módulo da elasticidade do condutor (N/mm^2);
- A é a seção transversal do condutor (mm^2).

Algumas considerações são feitas para determinar a equação de mudança de estado:

- Como os cálculos para a equação de mudança de estado dependem da diferença entre os comprimentos para diferentes condições de temperatura e carregamento e não de seu valor absoluto, é razoável considerar a aproximação para a parábola para caracterizar a curva representada pela equação (3.31).

$$L_2 = a + \frac{a^3 \cdot (m_{e2} \cdot g)^2}{24 \cdot H_2^2} \quad L_1 = a + \frac{a^3 \cdot (m_{e1} \cdot g)^2}{24 \cdot H_1^2} \quad (3.36)$$

- Considera-se que a diferença ($T_2 - T_1$) possa ser aproximada para ($H_2 - H_1$).

O valor de “T” é dado por:

$$T = \sqrt{H^2 + V^2} = \sqrt{H^2 + H^2 \cdot \sinh\left(\frac{m_c g \cdot x}{H}\right)} = H \cdot \cosh\left(\frac{m_c g \cdot x}{H}\right) \quad (3.37)$$

Esta expressão calcula o valor da força resultante no condutor para qualquer ponto ao longo do vão. O valor médio da força resultante é calculado por:

$$T_{\text{médio}} = \frac{H}{a} \cdot \int_{x_a}^{x_b} \cosh\left(\frac{m_c g \cdot x}{H}\right) \cdot dx = H \cdot \frac{L}{a} \quad (3.38)$$

A partir das expressões calculadas para o comprimento e para a força resultante e das considerações realizadas, obtém-se a expressão geral para a equação de mudança de estados.

$$a + \frac{a^3 \cdot (m_{c2} \cdot g)^2}{24 \cdot H_2^2} = \left[a + \frac{a^3 \cdot (m_{c1} \cdot g)^2}{24 \cdot H_1^2} \right] \cdot [1 + \alpha \cdot \Delta\theta] \cdot \left[1 + \frac{T_2 - T_1}{E \cdot A} \right] \quad (3.39)$$

A seguir a expressão é desenvolvida.

$$\begin{aligned} a + \frac{a^3 \cdot (m_{c2} \cdot g)^2}{24 \cdot H_2^2} = & a + a \cdot \alpha \cdot \Delta\theta + \frac{a^3 \cdot (m_{c1} \cdot g)^2}{24 \cdot H_1^2} + a \cdot \left(\frac{T_2 - T_1}{E \cdot A} \right) + \left(\frac{a^3 \cdot (m_{c1} \cdot g)^2}{24 \cdot H_1^2} \right) \cdot \left(\frac{T_2 - T_1}{E \cdot A} \right) + \\ & + \left(\frac{a^3 \cdot (m_{c1} \cdot g)^2}{24 \cdot H_1^2} \right) \cdot a \cdot \Delta\theta + a \cdot \alpha \cdot \Delta\theta \cdot \frac{T_2 - T_1}{E \cdot A} + \left(\frac{a^3 \cdot (m_{c1} \cdot g)^2}{24 \cdot H_1^2} \right) \cdot a \cdot \Delta\theta \cdot \frac{T_2 - T_1}{E \cdot A} \end{aligned} \quad (3.40)$$

Os termos em **negrito** da equação (3.40) são negligenciados pois possuem ordem de grandeza inferior aos demais termos. Multiplicando-se ambos os termos da equação por $\frac{H^2 \cdot E \cdot A}{a}$, vem:

$$\frac{E \cdot A \cdot (a \cdot m_{c2} \cdot g)^2}{24} = H_2^2 \cdot \left[H_2 - H_1 + \frac{E \cdot A \cdot (a \cdot m_{c1} \cdot g)^2}{24 \cdot H_1^2} + E \cdot A \cdot \alpha \cdot \Delta\theta \right] \quad (3.41)$$

3.1.5 Considerações sobre cadeias de isoladores

É comum, para linhas de transmissão com vãos de longo comprimento, que o peso da cadeia de isoladores seja distribuído igualmente ao longo vão ou que o efeito da cadeia seja simplesmente ignorado. Entretanto, para vãos mais curtos, como os de subestações, negligenciar o efeito das cadeias de isoladores pode implicar erros consideráveis.

As cadeias de isoladores flexíveis podem ser simuladas como uma seção de condutor com comprimento “ L_K ” equivalente ao comprimento da cadeia de isoladores flexível. Assume-se que o peso da cadeia de isoladores é uniformemente distribuído ao longo deste comprimento. Isto posto, pode-se determinar uma expressão para a mudança de estados levando em consideração o efeito das cadeias de isoladores.

$$\begin{aligned} & \frac{E.A.(a.m_{c2}.g)^2}{24} + \frac{G_{K2}.m_{c2}.g.L_K}{2} + \frac{G_{K2}^2.L_K}{3.a} = \\ & = H_2^2 \cdot \left\{ H_2 - H_1 + \frac{E.A.}{H_1^2} \cdot \left[\frac{(a.m_{c1}.g)^2}{24} + \frac{G_{K1}.m_{c1}.g.L_K}{2} + \frac{G_{K1}^2.L_K}{3.a} \right] + E.A.\alpha.\Delta\theta \right\} \end{aligned} \quad (3.42)$$

Onde:

- G_K é o peso por unidade de comprimento da cadeia de isoladores (N/m);
- L_K é o comprimento da cadeia de isoladores (m).

Nota-se da expressão anterior que o termo $\frac{(a.m_c.g)^2}{24}$ foi substituído por

$$\frac{(a.m_c.g)^2}{24} + \frac{G_K.m_c.g.L_K}{2} + \frac{G_K^2.L_K}{3.a}.$$

A flecha para este caso é calculada por:

$$f = \frac{1}{2.H} \cdot \left(\frac{m_c.g.a^2}{4} + m_c.g.L_K^2 + G_K.L_K \right) \quad (3.43)$$

Neste trabalho somente cadeias de isoladores flexíveis são abordadas. Para informações sobre cadeias de isoladores rígidas a referência [6] deve ser consultada.

3.2 Cálculo dos esforços devidos à ação de vento

Neste item são apresentadas as considerações sobre o cálculo dos esforços devido à ação dos ventos nos condutores e cadeias de isoladores. As considerações aqui expostas são relativas às normas ABNT NBR 5422/1985 - *Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica* [1] e a ABNT NBR 6123/1988 - *Forças devidas ao vento em edificações* [2]. Ambas as normas são utilizadas por empresas projetistas para o cálculo dos esforços devidos à ação dos ventos nas estruturas de subestações.

3.2.1 Norma ABNT NBR 5422/1985 - Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica

A norma ABNT NBR 5422/1985 [1] especifica as condições para o projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica com tensão máxima acima de 38 kV e inferior a 800 kV. A norma discorre sobre vários aspectos de projeto de linhas de transmissão, entretanto, neste item são apresentadas apenas as considerações acerca do efeito do vento nos condutores e nas cadeias de isoladores.

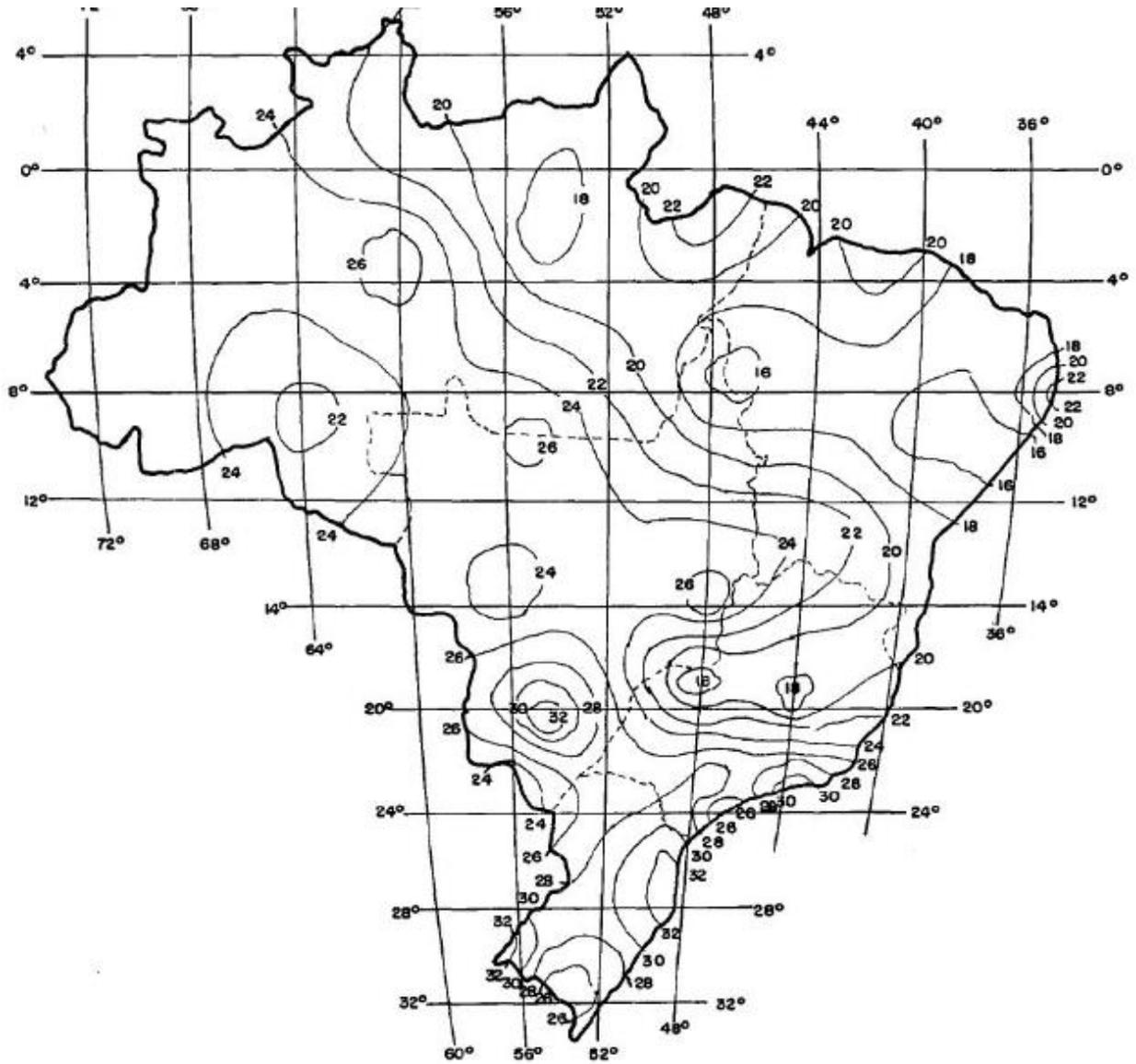
A partir de um valor básico de velocidade de vento são feitas correções para tempo de retorno, altitude, altura da instalação com relação ao solo, terreno e um valor de velocidade de projeto é determinado. Cada etapa é detalhada a seguir.

3.2.1.1 Velocidade básica de vento

A velocidade básica de projeto é determinada a partir da Figura 28 do anexo da norma. Este parâmetro a velocidade para um período de retorno de 50 anos, à altura de 10 m do solo com tempo de integração da média da velocidade de vento de 10 minutos para um terreno de categoria B (ver item 3.2.1.2).

A reprodução do mapa do Brasil com as isopleias é apresentada na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Isopletas - Norma NBR 5422 [1].



A partir da definição da velocidade básica de vento são realizadas algumas correções considerando características específicas da região na qual a estrutura será instalada.

3.2.1.2 Categoria do terreno

A ação do vento é influenciada pela rugosidade do terreno. Quanto maior a rugosidade mais turbulento e lento é o vento.

A norma define quatro categorias de terreno com valores de coeficientes de rugosidade “ K_r ” que devem ser multiplicados pelo valor de velocidade básica obtido. Ressalta-se que valores intermediários podem ser utilizados, por interpolação, de acordo com as características do terreno. A Tabela 3.1 apresenta os fatores de rugosidade estabelecidos pela norma.

Tabela 3.1 - Coeficientes de rugosidade do terreno [1].

Categoria do Terreno	Características do terreno	Coeficiente de rugosidade (K_r)
A	Extensões de água Aéreas planas costeiras Desertos planos	1,08
B	Terreno aberto com poucos obstáculos Aeroportos Plantações com poucas árvores ou construções	1,00
C	Terreno com obstáculos numerosos e pequenos (sebes, árvores e construções)	0,85
D	Áreas urbanizadas Terrenos com muitas árvores altas	0,67

Para terrenos da categoria B o coeficiente é unitário, ou seja, o valor coincide com o valor de velocidade básica de vento determinado pelo mapa com as isopletas apresentado no item anterior.

Os valores de “ K_r ” apresentados correspondem a uma velocidade média sobre 10 minutos, ou seja, um período de integração de 10 minutos, medida à altura de 10 m do solo.

Caso a instalação seja realizada em vales que possibilitem canalização de vento o valor de “ K_r ” adotado deve corresponder a uma categoria anterior àquela definida. Considerando a canalização do vento o efeito será mais severo.

A norma IEC 60826 [19] define que para instalação no topo de morros uma categoria abaixo daquela escolhida deve ser adotada e para vales a categoria C deve ser utilizada, independente das características do terreno da região.

3.2.1.3 Correção do período de retorno

O período de retorno é o intervalo médio entre ocorrências sucessivas de um mesmo evento durante um período de tempo indefinidamente longo. Corresponde ao inverso da probabilidade de ocorrência do evento no período de um ano.

Como mostrado, a velocidade básica de vento é calculada para um período de retorno de 50 anos. Para outros períodos de retorno é necessário corrigir o valor da velocidade básica de vento. Para tanto, é necessário estabelecer o valor de dois estimadores: “ α ” em $(\text{m/s})^{-1}$ (Figura 3.5) é o estimador do fator de escala da distribuição de Gumbel e “ β ” em m/s (Figura 3.6) é o estimador do fator de posição da distribuição de Gumbel.

Figura 3.5 - Estimador do fator de escala da distribuição de Gumbel - α $(\text{m/s})^{-1}$ [1].

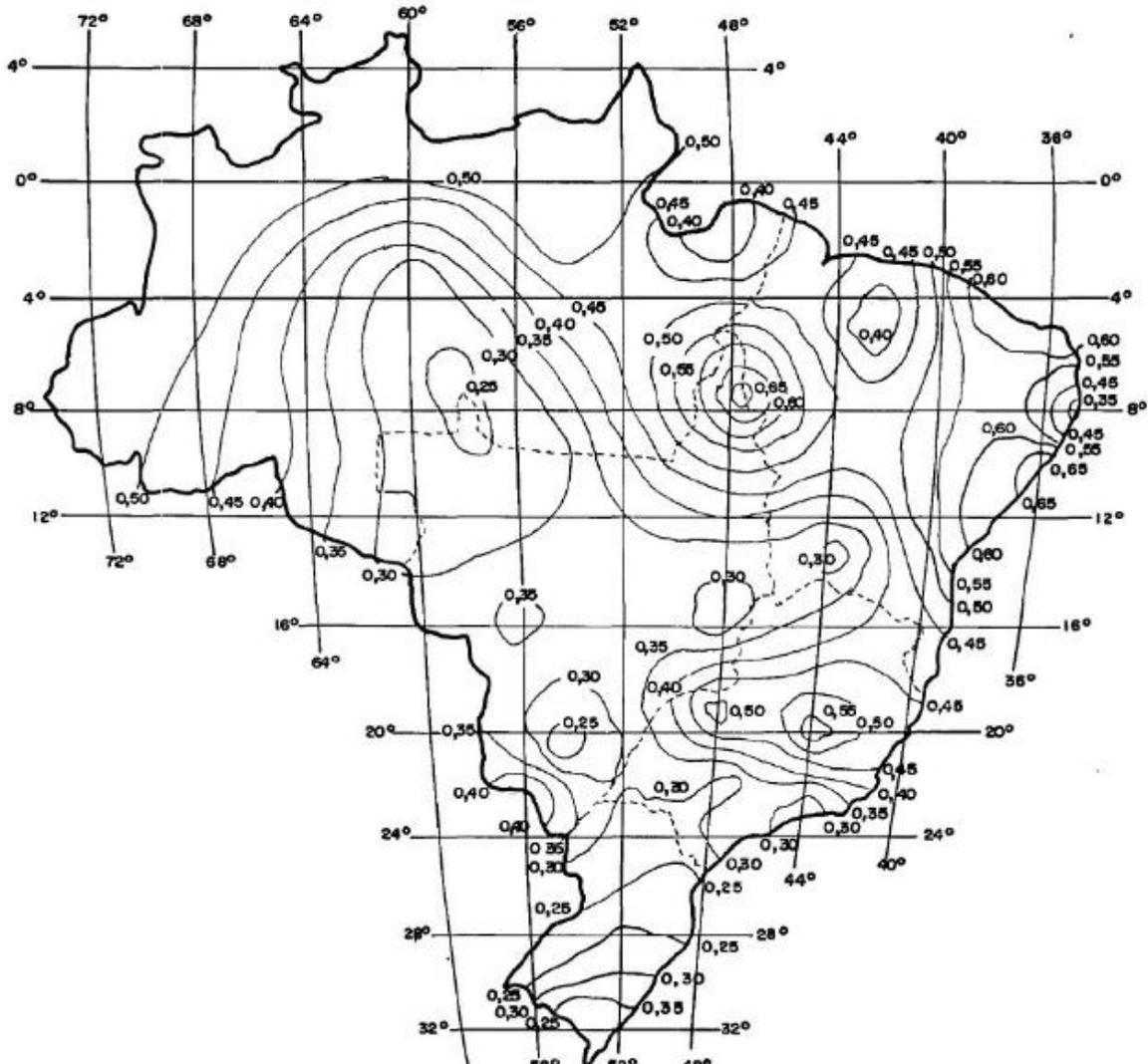
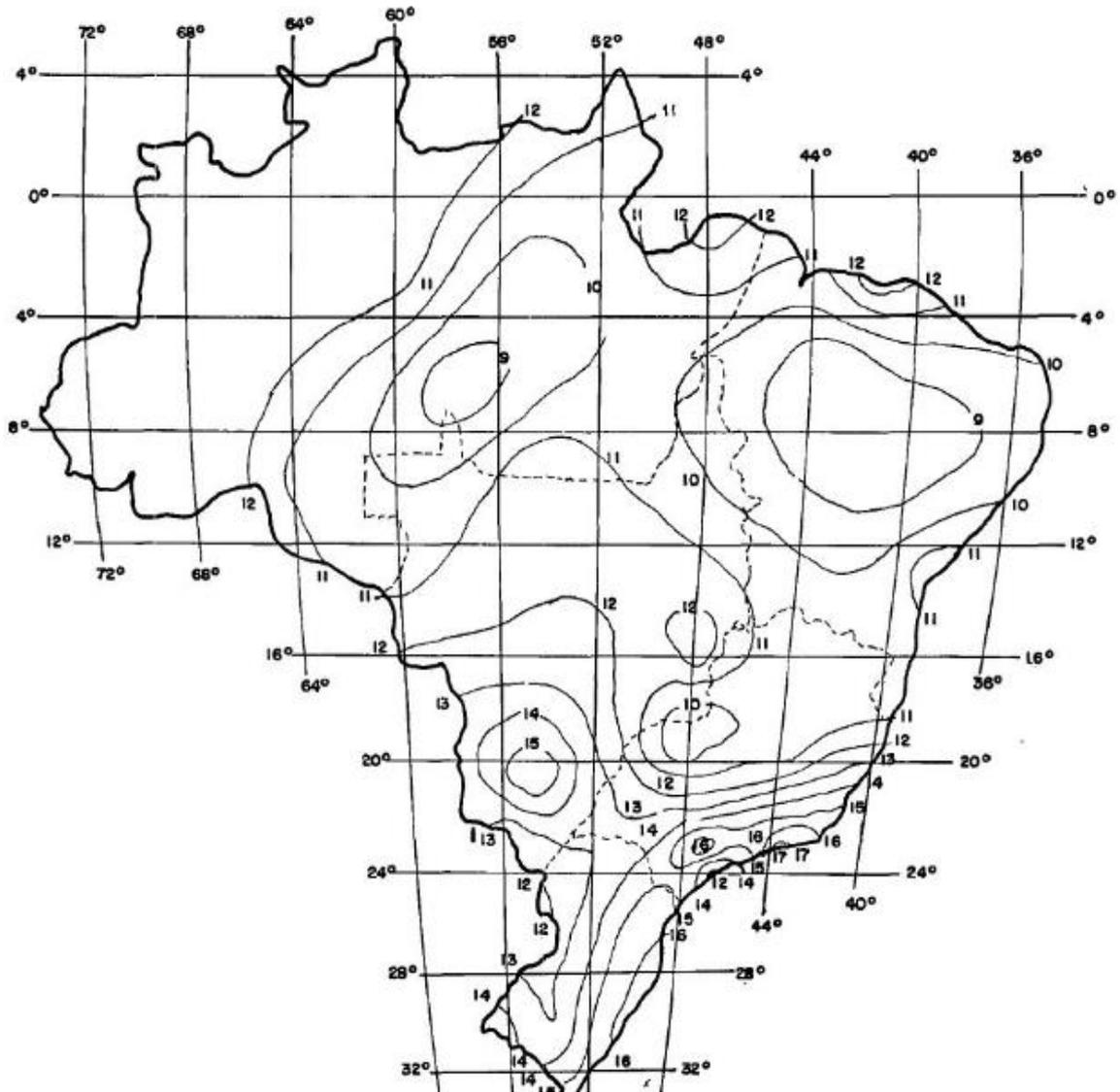


Figura 3.6 - Estimador do fator de posição da distribuição de Gumbel - β em m/s [1].



Determinados os valores destes parâmetros, calcula-se o novo valor da velocidade de vento, referido ao novo período de retorno T (em anos).

$$V_T = \beta - \frac{\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]}{\alpha} \quad (3.44)$$

Para maiores níveis de confiabilidade o período de retorno deve ser maior. A norma IEC 60826/2003 [19] estabelece três patamares para o valor do tempo de retorno T , de acordo com a importância da linha de transmissão a ser construída: 50, 100 e 500 anos.

Observou-se durante a pesquisa que diversos anexos de leilão da ANEEL exigem que o tempo mínimo de 250 anos seja utilizado. Referencia-se a norma IEC 60826 - *Design criteria of overhead transmission lines* [19]. A ABNT NBR 5422/1985 [1] recomenda adotar o valor

mínimo de 50 anos para as cargas de vento utilizadas no dimensionamento mecânico dos suportes.

3.2.1.4 Correção de altura

A velocidade básica de vento é determinada para uma altura de 10 m acima do solo. Caso a altura de instalação dos condutores e cadeias de isoladores seja diferente deste valor é necessário corrigir o valor da velocidade básica. Esta correção depende de um fator “n” relacionado à rugosidade do terreno e ao período de integração adotado, conforme Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Valores de n para correção de altura [1].

Categoria do Terreno	Parâmetro n	
	Tempo de integração t = 2 segundos	Tempo de integração t = 30 segundos
A	13	12
B	12	11
C	10	9,5
D	8,5	8

Determinado o valor de “n”, o valor da velocidade de vento com a correção de altura é dado pela fórmula (3.45):

$$V_H = V_{10} \cdot \left(\frac{H}{10} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.45)$$

Onde:

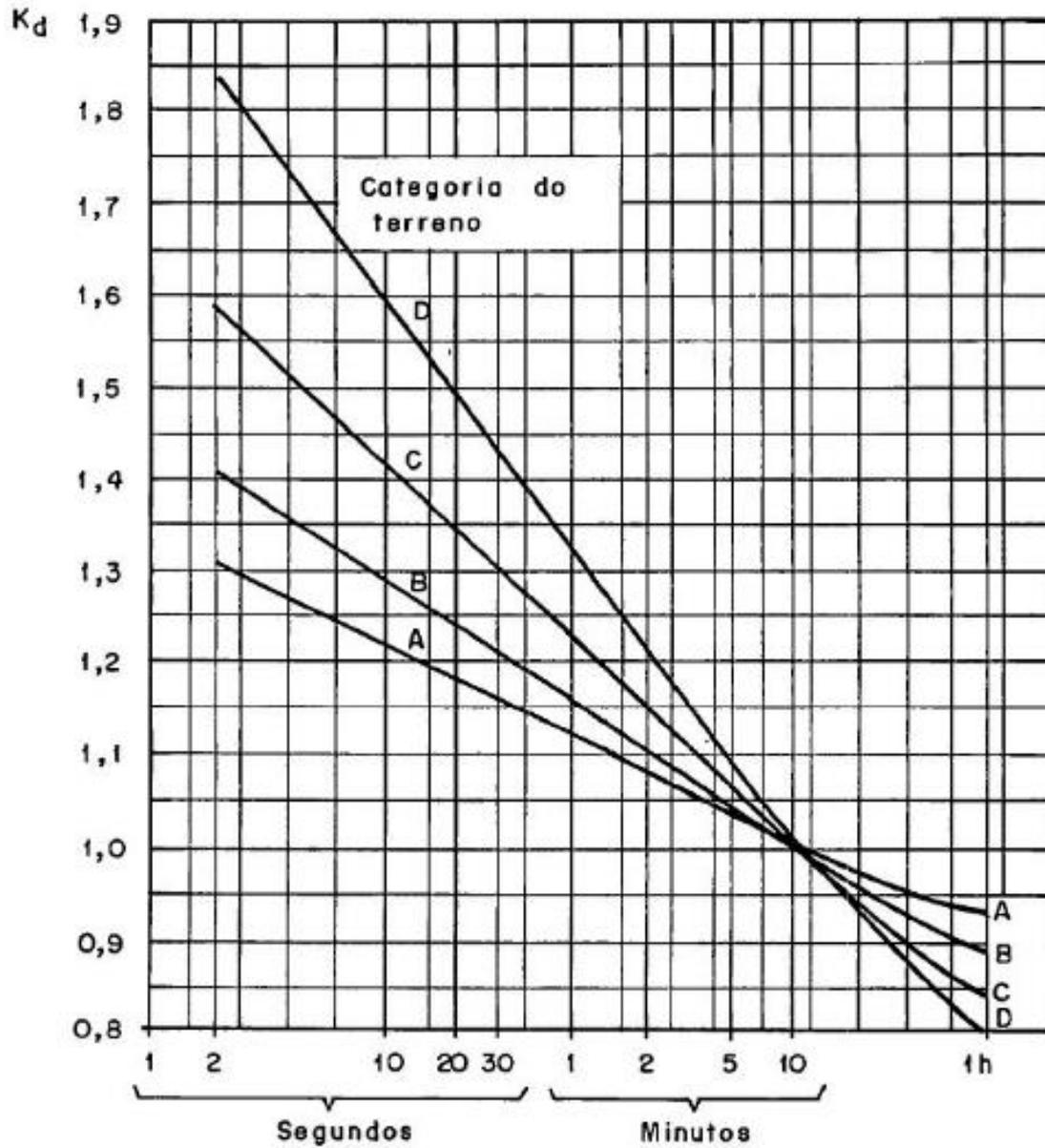
- V_{10} é a velocidade de vento à altura de 10 metros (m/s);
- V_H é a velocidade de vento à altura H em metros (m/s);

Nota-se que quanto maior a altura com relação ao solo da instalação dos condutores e cadeias de isoladores maior será o valor da velocidade corrigida “ V_H ”.

3.2.1.5 Correção do período de integração para a velocidade média

Para diferentes períodos de integração um fator “ K_d ” deve ser determinado. Este fator depende da categoria do terreno e é obtido a partir da Figura 3.7 abaixo.

Figura 3.7 - Fator K_d - Diferentes períodos de integração [1].



Observa-se que para terrenos cujo coeficiente de rugosidade é menor, o fator “ K_d ” é maior.

A norma ABNT NBR 5422/1985 [1] indica o período de integração de 2 segundos para ação de vento nas cadeias de isoladores e o período de 30 segundos para ação de vento nos condutores.

3.2.1.6 Cálculo da carga de vento

A velocidade de projeto, levando em consideração todas as correções supracitadas, é determinada pela seguinte expressão:

$$V_p = V_T \cdot K_r \cdot K_d \cdot \left(\frac{H}{10} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.46)$$

A pressão dinâmica de referência em N/m^2 é calculada por:

$$q_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_p^2 \quad (3.47)$$

A pressão dinâmica depende do valor da massa específica do ar ρ em kg/m^3 .

$$\rho = \frac{1,293}{1 + 0,00367 \cdot t} \cdot \left(\frac{16000 + 64 \cdot t - Alt}{16000 + 64 \cdot t + Alt} \right) \quad (3.48)$$

Onde:

- t é temperatura coincidente ($^{\circ}C$);
- Alt é a altitude média da região de instalação da estrutura (m).

3.2.1.7 Ação do vento nos condutores e na cadeia de isoladores

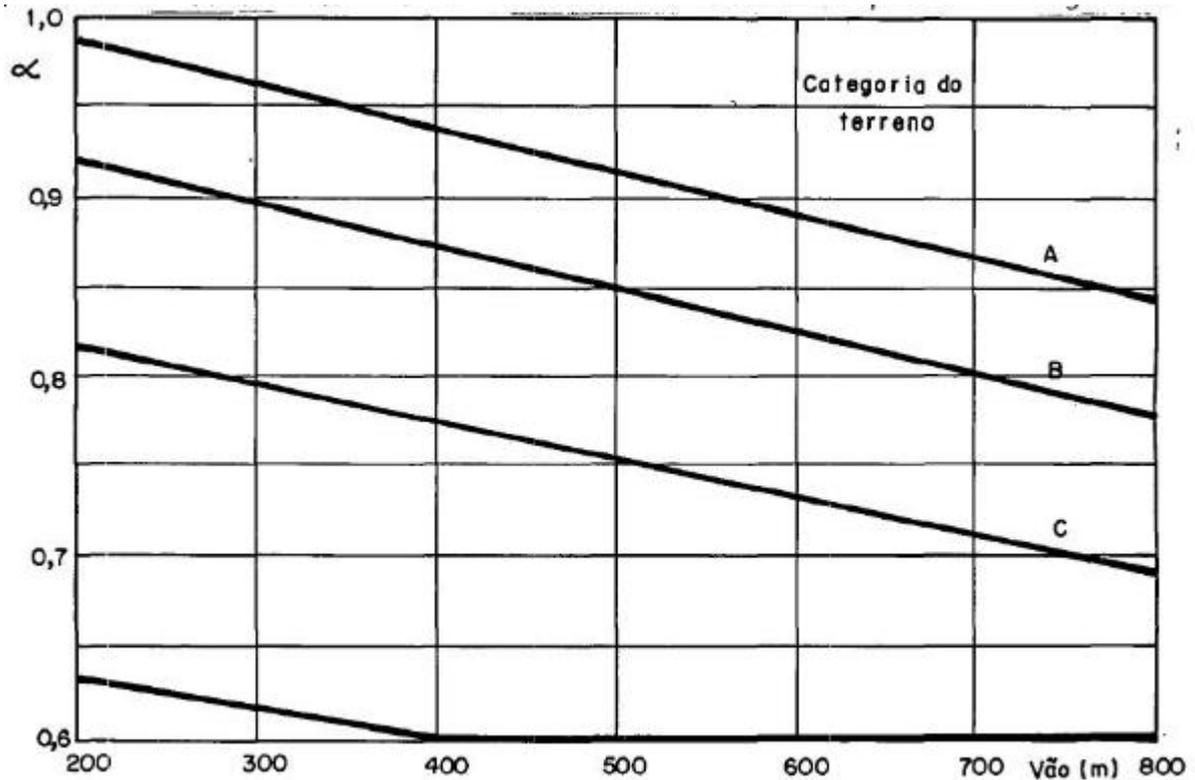
A ação do vento nos condutores é dada pela expressão (3.49):

$$A_C = q_0 \cdot C_{xc} \cdot \alpha \cdot d \cdot V \cdot \sin^2(\theta) \quad (3.49)$$

Onde:

- V é o comprimento do vão (m);
- α é o fator de efetividade que depende da categoria do terreno e do comprimento do vão e é dado pela Figura 3.8 abaixo:

Figura 3.8 - Fator de efetividade α [1].



- q_0 é a pressão dinâmica de referência (N/m^2) ou (kgf/m^2);
- C_{xc} é o coeficiente de arrasto (para condutores considera-se 1,0);
- d é o diâmetro do condutor (m);
- θ é o ângulo de incidência do vento em relação à direção do vão ($^\circ$);

A ação do vento na cadeia de isoladores é dada pela expressão (3.50):

$$A_i = q_0 \cdot C_{xi} \cdot S_i \quad (3.50)$$

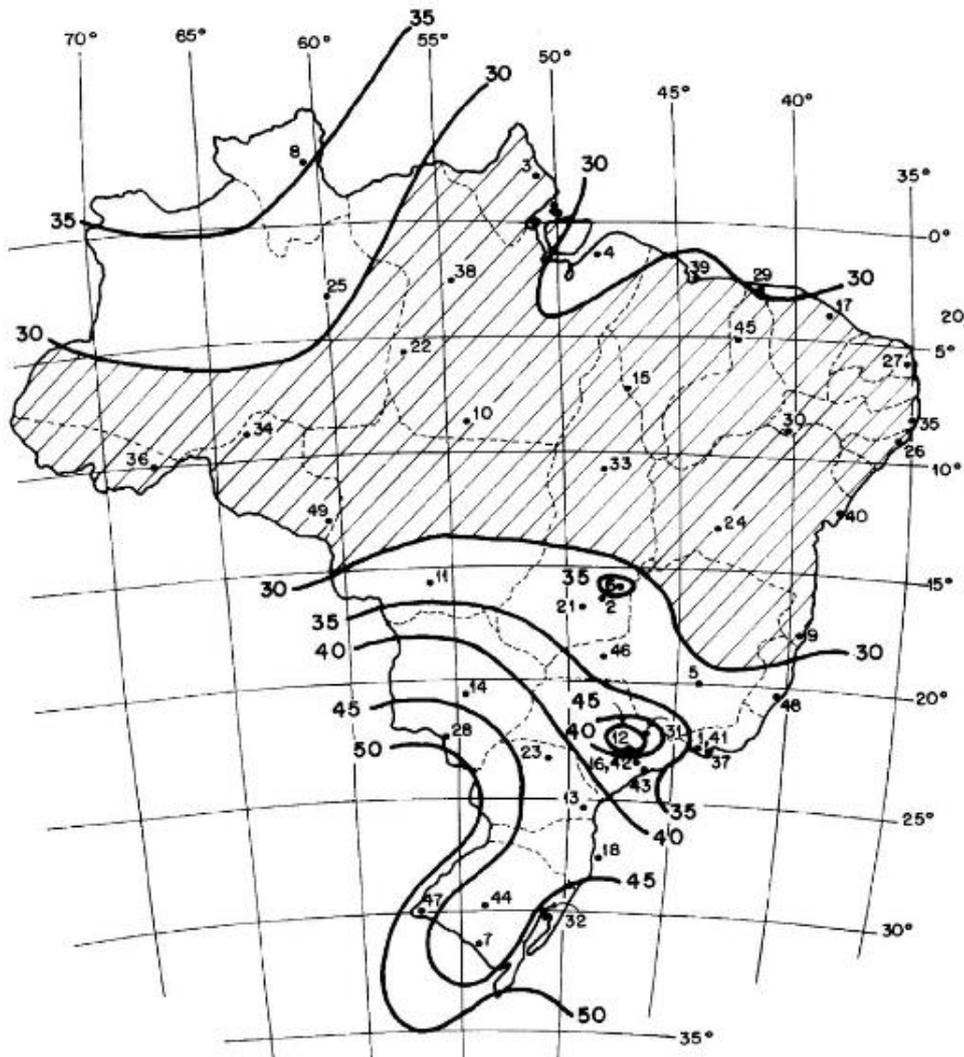
Onde:

- C_{xi} é o coeficiente de arrasto (considera-se 1,2);
- S_i é a área da cadeia projetada ortogonalmente sobre um plano vertical (m^2).

3.2.2 Norma NBR 6123/1988 - Forças devidas ao vento em edificações

A velocidade básica de vento é definida a partir da Figura 3.9 abaixo que representa as isopletas do território nacional. Neste mapa, considera-se uma rajada de 3 segundos, a 10 metros acima do solo em campo aberto e plano, com um período de 50 anos.

Figura 3.9 - Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s), NBR 6123 [2].



A velocidade característica do vento “ V_k ” é determinada pela equação (3.51):

$$V_k = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot V_0 \quad (3.51)$$

3.2.2.1 Determinação do fator topográfico S_1

O fator topográfico “ S_1 ” leva em consideração as variações do relevo do terreno. Para terreno plano ou fracamente acidentado $S_1 = 1,0$. Para vales profundos protegidos de ventos de qualquer direção $S_1 = 0,9$. Para taludes e morros o valor de “ S_1 ” depende da posição do objeto com relação ao morro/talude, da diferença entre nível entre a base e o topo do talude ou morro e da inclinação média do talude ou encosta do morro. Neste trabalho é considerada apenas a condição de terreno plano ou fracamente acidentado.

3.2.2.2 Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno: Fator S_2

O fator “ S_2 ” considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração e é definido pela equação (3.52):

$$S_2 = b.F_r \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (3.52)$$

Onde:

- F_r é o fator de rajada;
- b e p são parâmetros relacionados à rugosidade do terreno;
- z é a altura acima do nível geral do terreno (m).

A norma fornece duas maneiras para determinação destes valores. A primeira delas classifica o terreno, com relação à rugosidade, em cinco categorias e classifica as edificações em três classes, de acordo com as dimensões da mesma. A classe das edificações está relacionada diretamente ao intervalo de tempo para o cálculo da velocidade média, sendo que quanto maior a edificação, maior será o intervalo para o cálculo. A Tabela 3.3 e a

Tabela 3.4 apresentam as considerações para classificação da rugosidade do terreno e da classe da edificação, respectivamente.

Tabela 3.3 - Classificação da rugosidade do terreno [2].

Categoria do Terreno	Características	Exemplos
I	Superfícies lisas de grandes dimensões com mais de 5 km de extensão	Mar calmo Lagos e rios Pântanos sem vegetação
II	Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados Cota média do topo dos obstáculos de 1,0 metro	Zonas costeiras Pântanos com vegetação rala Campos / Pradarias
III	Terrenos planos ou ondulados com obstáculos tais como sebes, muros e edificações baixas Cota média do topo dos obstáculos de 3,0 metros	Granjas Casas de campo Sebes e muros Subúrbios com casa baixas e esparsas
IV	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados Cota média do topo dos obstáculos de 10,0 metros	Parques e bosques com muitas árvores Cidades pequenas e arredores Áreas industriais desenvolvidas
V	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados Cota média do topo dos obstáculos de 25,0 metros	Florestas com árvores altas Centros de grandes cidades Complexos industriais bem desenvolvidos

Tabela 3.4 - Classe de edificações [2].

Classe	Características
A	Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não ultrapassa 20 metros
B	Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal está entre 20 e 50 metros
C	Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal ultrapassa 50 metros

Na norma, é apresentada uma tabela com valores de “S₂” em função da classificação do terreno quanto à rugosidade, quanto à classe da edificação e quanto à altura sobre o terreno. A Tabela 3.5 apresenta parte dessa tabela para alturas de instalação de até 100 metros. Ressalta-se que, por se tratar de uma norma geral para edificações, as alturas variam até valores muito superiores aos de uma estrutura de subestação.

Tabela 3.5 - Valores de S_2 [2].

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
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	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	1,16	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
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

O Anexo A da norma define os valores dos parâmetros “b”, “p” e “ F_r ” para diversos intervalos de tempo de integração para as cinco categorias de rugosidade de terreno. Para edificações que excedem 80 m em alguma de suas dimensões é utilizada a metodologia apresentada no Anexo A, a qual determina um intervalo de tempo de integração que deverá ser utilizado para determinação do fator “ S_2 ”. O cálculo final da velocidade média de vento sobre o intervalo de tempo considerado é feito de maneira iterativa utilizando as seguintes expressões:

Para o cálculo do intervalo de tempo:

$$t = 7,5 \cdot \frac{L}{V_t(h)} \quad (3.53)$$

Onde:

- t é o intervalo de tempo (s);
- L é a altura ou largura da superfície frontal (m);
- $V_t(h)$ é a velocidade média do vento sobre t segundos no topo da edificação ou parte da edificação em estudo e é calculada por:

$$V_t(h) = S_1 \cdot S_2(h) \cdot V_0 \quad (3.54)$$

Verifica-se que o valor de velocidade média $V_t(h)$ depende da determinação do parâmetro S_2 que, por sua vez, depende da altura, da rugosidade do terreno e do intervalo de tempo de integração adotado e este depende da velocidade média $V_t(h)$.

3.2.2.3 Fator estatístico S_3

O fator estatístico é baseado em nível de probabilidade de 63% de que a velocidade básica de projeto seja igualada ou excedida em um período de retorno de 50 anos. A Tabela 3.6 indica valores mínimos de “ S_3 ”:

Tabela 3.6 - Valores para o fator estatístico S_3 [2].

Grupo	Descrição	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, ...).	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, ...).	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, ...).	0,88
5	Edificações temporárias.	0,83

Para subestações será considerado neste trabalho $S_3 = 1,1$.

3.2.2.4 Pressão dinâmica

A partir dos valores apresentados de “ S_1 ” e “ S_3 ”, pode-se escrever que:

$$V_k = \frac{V_o \cdot S_2}{3,27} \quad (3.55)$$

Sendo “ V_o ” dada em km/h.

O valor da pressão dinâmica é dado pela expressão (3.56):

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 \quad (3.56)$$

3.2.2.5 Componente perpendicular ao cabo da força de arrasto

O cálculo da componente perpendicular ao cabo depende do coeficiente de arrasto que, por sua vez, depende do número de Reynolds.

O número de Reynolds é calculado pela equação (3.57):

$$Re = 70000 \cdot V_k \cdot d \quad (3.57)$$

Onde:

- d é o diâmetro do cabo (m);
- V_k é a velocidade característica (m/s).

A Tabela 3.7 relaciona os valores obtidos para o número de Reynolds com o coeficiente de arrasto.

Tabela 3.7 - Número de Reynolds [2].

Número de Reynolds	Coeficiente de arrasto do condutor
$Re \leq 25000$	1,3
$42000 < Re$	1,1

A expressão (3.58) a seguir é usada para o cálculo da componente da força perpendicular ao cabo:

$$F_y = C_a \cdot q \cdot V \cdot d \cdot \text{sen}^2 \alpha \quad (3.58)$$

Onde:

- F_y é a força de arrasto perpendicular ao condutor (N);
- C_a é o coeficiente de arrasto, conforme Tabela 3.7;
- q é a pressão dinâmica (N/m^2) ou (kgf/m^2);
- V é o comprimento do condutor (m);
- d é o diâmetro do condutor (m);
- α é o ângulo de incidência do vento com relação ao condutor.

3.2.3 Cargas de vento nas cadeias de isoladores

Aproxima-se a cadeia de isoladores a uma barra prismática de seção circular. Desta forma, a força de arrasto é dada pela expressão:

$$F_i = C_{ai} \cdot q \cdot K \cdot L_i \cdot d_i \quad (3.59)$$

Onde:

- C_{ai} é o coeficiente de arrasto que depende do número do número de Reynolds para a cadeia de isoladores, conforme Tabela 3.8 abaixo;
- q é a pressão dinâmica (N/m^2) ou (kgf/m^2);
- L_i é o comprimento da cadeia de isoladores (m);
- d_i é o diâmetro da cadeia de isoladores (m);
- K é um coeficiente que depende da relação L_i/d_i . Entretanto, para barras com ambas as extremidades obstruídas, $K=1,0$.

Tabela 3.8 - Coeficientes de arrasto - Cadeias de isoladores [2].

Número de Reynolds	C_{ai}
$Re < 4,2 \cdot 10^5$	1,2
$4,2 \cdot 10^5 \leq Re < 8,4 \cdot 10^5$	0,6
$8,4 \cdot 10^5 \leq Re < 2,3 \cdot 10^6$	0,7
$2,3 \cdot 10^6 \leq Re$	0,8

3.3 Cálculo dos Esforços Dinâmicos

Nesta seção são apresentadas as considerações acerca dos cálculos dos esforços dinâmicos devidos à passagem das correntes de curto-circuito pelos condutores flexíveis da subestação. O cálculo é apresentado na norma IEC 60865-1 - *Short-Circuit Currents - Calculation of Effects* [3]. Além disso, alguns tópicos são aprofundados com os conteúdos das brochuras do CIGRÉ 105 - *The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Open Air Substations* [17] e 214 - *The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Open Air Substations - part II* [18].

É apresentado o procedimento de cálculo das trações $F_{t,d}$, $F_{f,d}$ e $F_{pi,d}$ referentes ao efeito das forças entre fases, de queda do condutor de volta à posição inicial ao cessar a passagem da corrente de curto-circuito e de pinçamento entre subcondutores de uma mesma fase, respectivamente.

3.3.1 Cálculo da força $F_{t,d}$ sem Considerar o Efeito do *Dropper*

Assume-se que a forma do condutor seja uma parábola e que esta forma permanece em um mesmo plano durante o movimento.

Calcula-se a força eletromagnética característica por unidade de comprimento em condutores flexíveis:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 0,75 \cdot \frac{(I_k'')^2}{a} \cdot \frac{l_c}{V} \quad (3.60)$$

Onde:

- F' é a força eletromagnética característica (N/m);
- μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo (N/A^2);
- I_k'' é a corrente de curto circuito (A);
- a é a distância entre as fases (m);
- l_c é o comprimento do condutor entre os suportes (m) - $l_c = l - 2 \cdot l_i$, sendo l_i o comprimento da cadeia de isoladores e l o comprimento do vão, ambos em metros;

Se a corrente flui por todo o comprimento do condutor a expressão (3.60) deve ser utilizada. Ressalta-se que, caso seja considerado o *dropper*, a expressão (3.75) deve ser utilizada (apresentam-se as considerações para o cálculo com *dropper* no item 3.3.2).

Determina-se a relação entre a característica da força eletromagnética característica F' e a gravidade:

$$r = \frac{F'}{n \cdot m_s' \cdot g} \quad (3.61)$$

Onde:

- r é a relação entre as forças supracitadas;
- n é o número de subcondutores (se for o caso);
- m_s' é a massa específica do condutor considerando o peso dos pingados, espaçadores e a ação de vento (kg/m);
- g é a aceleração da gravidade (m/s^2).

A direção “ δ ” da força resultante entre o peso do condutor e a força eletromagnética característica “F” é dada por:

$$\delta_1 = \tan^{-1}(r) \quad (3.62)$$

O cálculo do período de oscilação do condutor depende da flecha no meio do vão que foi determinada nas seções anteriores e pode ser calculada em função da tração estática “ F_{st} ”.

$$f_{es} = \frac{n \cdot m_s' \cdot g \cdot l^2}{8 \cdot F_{st}} \quad (3.63)$$

Onde:

- f_{es} é a flecha do condutor no meio do vão (m);
- F_{st} é a tração estática calculada através das metodologias apresentadas nos itens anteriores (N).

O período de oscilação do condutor considerando uma flecha constante é dado pela expressão (3.64):

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{0,8 \cdot \frac{f_{es}}{g}} \quad (3.64)$$

Durante a passagem da corrente de curto-circuito o condutor oscila com um período dado por “ T_{res} ” que depende do período calculado acima, da direção da resultante entre a força peso e a força eletromagnética característica “F” e da relação r entre essas forças.

$$T_{res} = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (3.65)$$

Calcula-se o módulo da elasticidade efetivo do condutor. Este valor é utilizado para determinar a norma da rigidez resultante entre condutores e estruturas de suporte.

$$E_{eff} = \begin{cases} E \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin \left(\frac{F_{st}}{n \cdot A_s \cdot \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ \right) \right], & \text{para } \frac{F_{st}}{n \cdot A_s} < \sigma_{fin} \\ E, & \text{para } \frac{F_{st}}{n \cdot A_s} > \sigma_{fin} \end{cases} \quad (3.66)$$

Sendo:

- A_s é a seção transversal do subcondutor (m^2);
- σ_{fin} é o valor para o qual o Módulo de Young torna-se constante $\Rightarrow 50 \cdot 10^6$ (N/m^2);
- E é a elasticidade do condutor (N/m).

A norma da rigidez resultante entre os suportes e os condutores é dada por:

$$N = \frac{1}{S \cdot l} + \frac{1}{n \cdot A_s \cdot E_{eff}} \quad (3.67)$$

Onde:

- S é a constante elástica resultante dos dois suportes, ou a constante de *Spring* resultante dos dois suportes (N/m).

Para vãos com condutores tracionados, caso o valor de “ S ” não seja conhecido, o valor para cada estrutura nas seguintes faixas deve ser utilizado, conforme Tabela 3.9:

Tabela 3.9 - Valores de constante de *Spring* para cada estrutura de suporte [3].

Faixa [N/m]	Tensão Nominal [kV]
$150 \cdot 10^3$ até $1300 \cdot 10^3$	123
$400 \cdot 10^3$ até $2000 \cdot 10^3$	245
$600 \cdot 10^3$ até $3000 \cdot 10^3$	420

Efetua-se o cálculo do fator de *stress*.

$$\zeta = \frac{(n \cdot g \cdot m_s' \cdot l)^2}{24 \cdot F_{st}^3 \cdot N} \quad (3.68)$$

Quando cessa a passagem da corrente de curto-circuito, o ângulo de oscilação do condutor é calculado da seguinte maneira:

$$\delta_{end} = \begin{cases} \delta_1 \cdot \left[1 - \cos \left(360^\circ \cdot \frac{T_{kl}}{T_{res}} \right) \right], & \text{para } 0 \leq \frac{T_{kl}}{T_{res}} \leq 0,5 \\ 2 \cdot \delta_1, & \text{para } \frac{T_{kl}}{T_{res}} > 0,5 \end{cases} \quad (3.69)$$

Onde:

- T_{kl} = a duração do curto-circuito (s).

Observa-se que o máximo valor do ângulo de oscilação ao final da passagem da corrente de curto circuito ocorre para a relação $\frac{T_{kl}}{T_{res}} = 0,5$. Para relações superiores a esta, o valor do ângulo diminui. Adota-se então, de maneira conservativa, o máximo valor $\delta_{end} = 2 \cdot \delta_1$ para estes casos.

O cálculo do máximo ângulo de oscilação depende de um parâmetro “ χ ”, dado por:

$$\chi = \begin{cases} 1 - r \cdot \text{sen}(\delta_{end}), & \text{para } 0 \leq \delta_{end} \leq 90 \\ 1 - r, & \text{para } \delta_{end} > 90 \end{cases} \quad (3.70)$$

Então, é possível calcular o máximo ângulo de oscilação pela expressão (3.71):

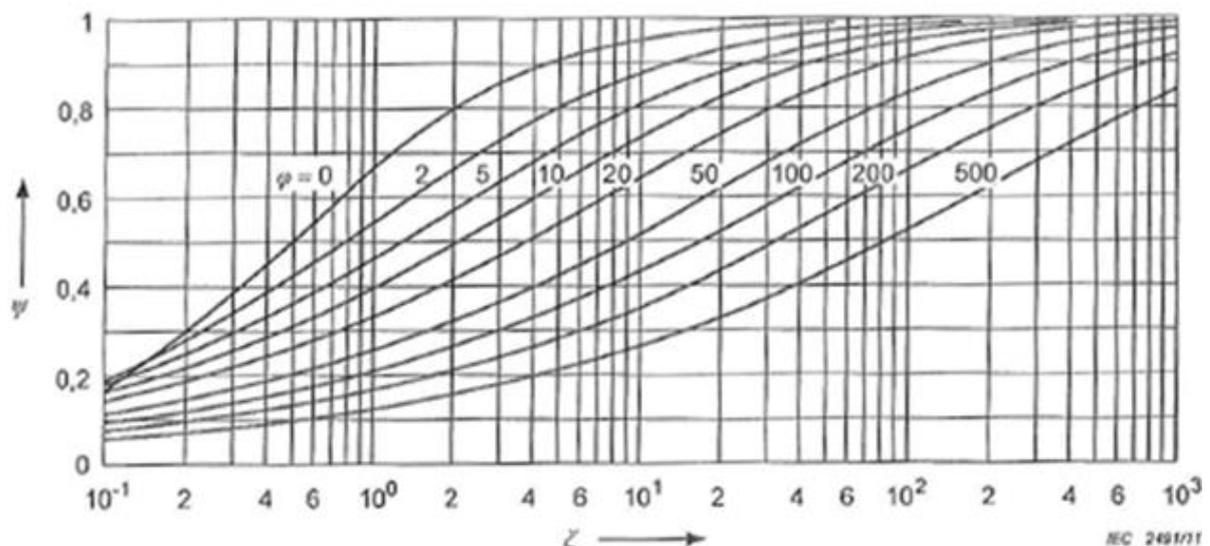
$$\delta_{max} = \begin{cases} 1,25 \cdot \cos^{-1}(\chi), & \text{para } 0,766 \leq \chi \leq 1 \\ 10^\circ + \cos^{-1}(\chi), & \text{para } -0,985 \leq \chi < 0,766 \\ 180^\circ, & \text{para } \chi < -0,985 \end{cases} \quad (3.71)$$

A partir da comparação do tempo para extinção da corrente de curto-circuito “ T_{kl} ” e o tempo de oscilação resultante “ T_{res} ”, calcula-se o parâmetro de carga:

$$\varphi = \begin{cases} 3 \cdot (\sqrt{r^2 + 1} - 1), & \text{para } T_{kl} \geq \frac{T_{res}}{4} \\ 3 \cdot (r \cdot \text{sen}(\delta_{end}) + \cos(\delta_{end}) - 1), & \text{para } T_{kl} < \frac{T_{res}}{4} \end{cases} \quad (3.72)$$

O fator de tensão é determinado pela Figura 3.10:

Figura 3.10 - Determinação do fator da força de tração [3].



O fator de tensão também pode ser determinado pela expressão (3.73) que depende dos valores do fator de stress e do parâmetro de carga, calculados em (3.68) e (3.72), respectivamente.

$$\varphi^2 \psi^3 + \varphi \cdot (2 + \zeta) \cdot \psi^2 + (1 + 2 \cdot \zeta) \cdot \psi - \zeta \cdot (2 + \varphi) = 0 \quad (3.73)$$

Finalmente, a tração devido à força entre fases originada pela passagem da corrente de curto-circuito é calculada por:

$$F_{t,d} = F_{st} \cdot (1 + \varphi \cdot \psi) \quad (3.74)$$

3.3.2 Cálculo da Força $F_{t,d}$ Considerando o Efeito do *Dropper*

Calcula-se a força eletromagnética característica por unidade de comprimento em condutores flexíveis considerando o *dropper*: considera-se que a corrente flui pelos condutores principais (l_c) e pelo *dropper* (l_v):

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 0,75 \cdot \frac{(I_k'')^2}{a} \cdot \frac{\frac{l_c}{2} + \frac{l_v}{2}}{V} \quad (3.75)$$

Os *droppers* afetam o movimento do condutor principal. Dependendo da posição do *dropper* ao longo do vão o movimento de oscilação do condutor principal pode ser dificultado bem como o máximo ângulo de oscilação pode ser afetado. O efeito de *droppers* deve ser considerado quando estes estão localizados no centro ou com o ponto de fixação próximo ao centro - até 10% do comprimento do vão distante do centro, ou seja, entre 40 e 60% do comprimento do vão.

Para a determinação dos esforços, primeiramente a expansão elástica é determinada:

$$\varepsilon_{ela} = N \cdot (F_{t,d} - F_{st}) \quad (3.76)$$

Ressalta-se que o valor “ $F_{t,d}$ ” utilizado nesta expressão é aquele obtido em (3.74), para os casos em que não há *dropper* no meio do vão.

A expansão térmica é determinada por:

$$\varepsilon_{th} = \begin{cases} c_{th} \cdot \left(\frac{I_k}{n \cdot A_s} \right)^2 \cdot \frac{T_{res}}{4}, & \text{para } T_{kl} \geq \frac{T_{res}}{4} \\ c_{th} \cdot \left(\frac{I_k}{n \cdot A_s} \right)^2 \cdot T_{kl}, & \text{para } T_{kl} < \frac{T_{res}}{4} \end{cases} \quad (3.77)$$

Onde “ c_{th} ” é o coeficiente de expansão térmico do material. A Tabela 3.10 apresenta os valores do coeficiente “ c_{th} ” para os materiais mais comumente utilizados.

Tabela 3.10 - Coeficiente c_{th} [3].

Coeficiente c_{th}	Material	Relação entre as seções de alumínio e aço Al/St
$0,27 \cdot 10^{-18} \frac{m^4}{A^2 \cdot s}$	Alumínio Liga de alumínio Alumínio / Aço	> 6
$0,17 \cdot 10^{-18} \frac{m^4}{A^2 \cdot s}$	Alumínio / Aço	≤ 6
$0,088 \cdot 10^{-18} \frac{m^4}{A^2 \cdot s}$	Cobre	-----

O fator “ C_D ” é o fator de dilatação e permite considerar o aumento da flecha devido à expansão térmica e à expansão elástica:

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \cdot \left(\frac{1}{f_{es}} \right)^2 \cdot (\varepsilon_{ela} + \varepsilon_{th})} \quad (3.78)$$

O fator “ C_F ” ou fator de forma considera o possível aumento na flecha dinâmica do condutor causado pela mudança na forma do condutor no vão

$$C_F = \begin{cases} 1,05 & \text{para } r \leq 0,8 \\ 0,97 + 0,1 \cdot r, & \text{para } 0,8 < r < 1,8 \\ 1,15 & \text{para } r \geq 1,8 \end{cases} \quad (3.79)$$

A flecha dinâmica é então determinada:

$$f_{ed} = C_D \cdot C_F \cdot f_{es} \quad (3.80)$$

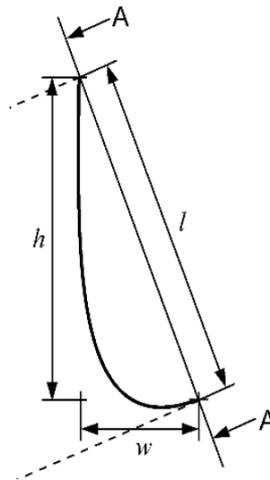
O *dropper* pode estar em um plano paralelo ou perpendicular ao plano do condutor principal. O ângulo de oscilação considerando as limitações impostas pela presença do *dropper* é calculado da seguinte maneira:

$$\delta = \begin{cases} \arccos \left[\frac{(h+f_{es})^2 + f_{ed}^2 - (l_v^2 - w^2)}{2 \cdot f_{ed} \cdot (h+f_{es})} \right] & \text{plano paralelo} \\ \arccos \left[\frac{(h+f_{es})^2 + f_{ed}^2 - (l_v^2 - w^2)}{2 \cdot f_{ed} \cdot \sqrt{(h+f_{es})^2 + w^2}} \right] + \arccos \left[\frac{h+f_{es}}{\sqrt{(h+f_{es})^2 + w^2}} \right] & \text{plano perpendicular} \end{cases} \quad (3.81)$$

Onde:

- l_v é o comprimento total do *dropper* (m);
- h, w representam as dimensões do *dropper*, em metros, de acordo com a Figura 3.11 (m);

Figura 3.11 - Dimensões do *dropper* [3].



Se o valor “ δ ”, calculado em (3.81), for superior ou igual ao valor de “ δ_1 ” (3.62) o condutor não é influenciado pelo *dropper* dentro do período $T_{res}/4$ e o parâmetro de carga “ φ ” deve ser calculado com a expressão (3.72) de acordo com a metodologia apresentada em 3.3.1.

Caso o valor calculado seja inferior, o condutor principal é influenciado pelo *dropper* e a seguinte formulação deve ser utilizada para determinação do parâmetro de carga:

$$\varphi = \begin{cases} 3 \cdot [r \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\delta) - 1], & \text{para } \delta_{end} \geq \delta \\ 3 \cdot [r \cdot \text{sen}(\delta_{end}) + \cos(\delta_{end}) - 1], & \text{para } \delta_{end} < \delta \end{cases} \quad (3.82)$$

A partir do valor do parâmetro de carga “ φ ”, determina-se novamente o valor da força de tração “ ψ ” utilizando o gráfico apresentado na Figura 3.10 ou a equação (3.73).

A força “ $F_{t,d}$ ” é calculada utilizando-se a expressão (3.74).

3.3.3 Cálculo da Força $F_{f,d}$

A força “ $F_{f,d}$ ”, ou de *drop-back*, é devida à queda ou à oscilação do condutor de volta à posição original quando cessa a passagem da corrente de curto-circuito. Esta força só é considerada quando as seguintes condições são satisfeitas:

- Se a relação “ r ”, calculada pela equação (3.61), entre a força eletromagnética característica F' e a força peso for superior a 60%;
- Se o máximo ângulo de oscilação, calculado pela equação (3.71), for superior a 70°;
- Caso o efeito do *dropper* seja considerado, se o ângulo de oscilação δ , calculado pela equação (3.81), for superior a 60°.

Satisfeitas todas as condições, o valor da força “ $F_{f,d}$ ” é dado por:

$$F_{f,d} = 1,2 \cdot F_{st} \cdot \sqrt{1 + 8 \cdot \zeta \cdot \frac{\delta_{\text{máx}}}{180^\circ}} \quad (3.83)$$

Em vãos pequenos a rigidez à flexão faz com que o valor calculado acima seja superior ao real. O cálculo acima deve ser utilizado para vãos cujo comprimento é superior a cem vezes o diâmetro do condutor, ou seja, $l > 100 \cdot d$.

3.3.4 Cálculo da Força $F_{pi,d}$

Caso os subcondutores possuam configuração regular com até 4 condutores/fase as seguintes condições devem ser verificadas:

$$\frac{a_s}{d} \leq 2,0 \text{ e } l_s \geq 50 \cdot a_s \quad \text{ou} \quad \frac{a_s}{d} \leq 2,5 \text{ e } l_s \geq 70 \cdot a_s \quad (3.84)$$

Onde:

- a_s é a distância entre dois subcondutores adjacentes (m);
- d é o diâmetro dos subcondutores (m);
- l_s é a distância entre dois espaçadores (m).

Satisfeitas as condições de um dos conjuntos anteriores, pode-se afirmar que os condutores colidem efetivamente durante o curto-circuito e a força de “ $F_{pi,d}$ ” é calculada pela expressão:

$$F_{pi,d} = 1,1 \cdot F_{t,d} \quad (3.85)$$

Caso nenhum dos conjuntos de condições seja satisfeito os condutores não colidem efetivamente e a metodologia a seguir deve ser utilizada.

Primeiramente, são determinados os valores de parâmetros v_1 , v_2 e v_3 .

$$v_1 = f \cdot \frac{1}{\text{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right)} \cdot \sqrt{\frac{(a_s - d) \cdot m_s'}{\frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_k}{n}\right)^2 \cdot \frac{n-1}{a_s}}} \quad (3.86)$$

Onde “ f ” é a frequência do sistema (Hz).

O fator “ v_2 ” depende do fator “ v_1 ” calculado e pode ser obtido pela expressão (3.87) ou graficamente pela Figura 3.12.

$$v_2 = \frac{\sin(4 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi} - 2 \cdot \gamma) + \sin(2 \cdot \gamma)}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi}} + \frac{f \cdot \tau}{f \cdot T_{pi}} \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot f \cdot T_{pi}}{f \cdot \tau}} \right) \sin^2(\gamma) - \frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot \sin(\gamma)}{1 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau)^2} \left\{ \left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau \frac{\cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi} - \gamma)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi}} + \frac{\sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi} - \gamma)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi}} \right) e^{-\frac{f \cdot T_{pi}}{f \cdot \tau}} + \frac{\sin(\gamma) - 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau \cdot \cos(\gamma)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi}} \right\} \quad (3.87)$$

Onde:

- τ é a constante de tempo da rede e pode ser calculada a partir do procedimento exposto na norma IEC 60909-0 [20].

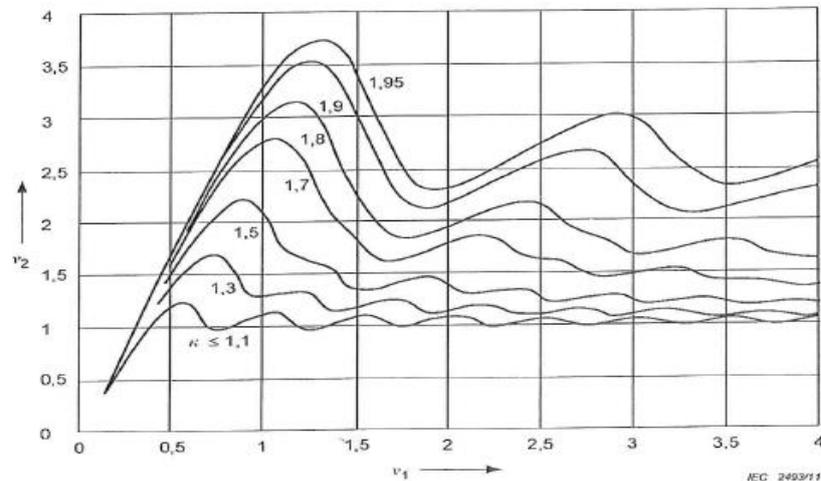
$$\frac{1}{\tau} = - \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{3} \cdot \ln\left(\frac{\kappa - 1,02}{0,98}\right), \text{ para } \kappa \geq 1,1 \text{ e } \gamma = \tan^{-1}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau) \quad (3.88)$$

- Se $\kappa < 1,1$ o valor 1,1 deve ser utilizado;
- $f \cdot T_{pi}$ é solução da equação (3.89):

$$v_1 = f \cdot T_{pi} \cdot \sqrt{v_2} \quad (3.89)$$

Graficamente, tem-se que o fator “ v_2 ” depende do fator “ v_1 ” e varia conforme Figura 3.12:

Figura 3.12 - Determinação do fator v_2 [3].

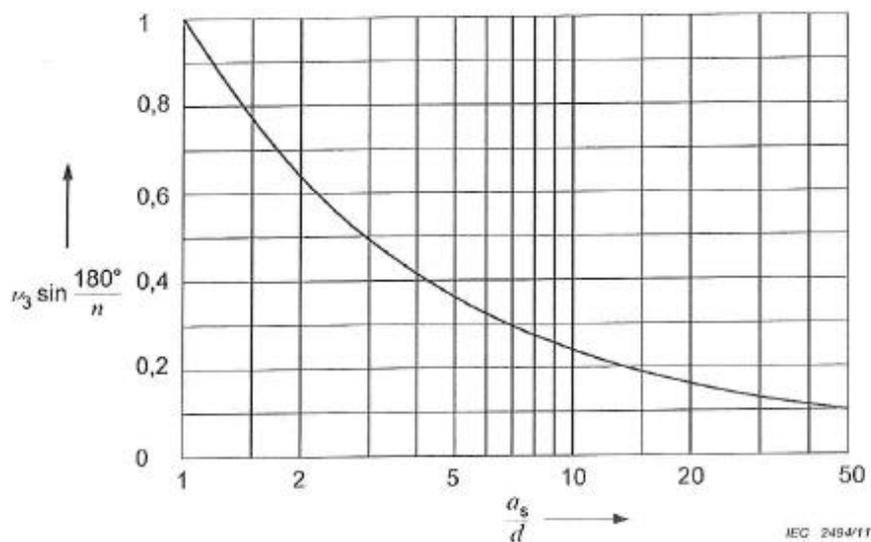


O fator “ v_3 ” depende diretamente da relação entre a distância entre os subcondutores “ a_s ” e o diâmetro do condutor “ d ” e é calculado pela equação (3.90) ou obtido pela Figura 3.13.

$$v_3 = \frac{\frac{d}{a_s} \cdot \sqrt{\frac{a_s}{d} - 1}}{\sin\left(\frac{180^\circ}{n}\right) \tan^{-1} \sqrt{\frac{a_s}{d} - 1}} \quad (3.90)$$

Sendo n o número de subcondutores do *bundle*.

Figura 3.13 - Determinação do fator v_3 [3].



A partir dos valores calculados de “ v_2 ” e “ v_3 ” determina-se a força “ F_v ”, relativa à passagem da corrente de curto-circuito que representa a força de atração entre os subcondutores do *bundle*.

$$F_v = (n - 1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_k}{n}\right)^2 \cdot \frac{l_s}{a_s} \cdot \frac{v_2}{v_3} \quad (3.91)$$

Dois fatores relativos à contração do *bundle* são calculados: “ ϵ_{st} ” e “ ϵ_{pi} ”.

$$\begin{aligned} \epsilon_{st} &= 1,5 \cdot \frac{F_{st} \cdot l_s^2 \cdot N}{(a_s - d)^2} \cdot \text{sen}^2\left(\frac{180^\circ}{n}\right) \\ \epsilon_{pi} &= 0,375 \cdot n \cdot \frac{F_v \cdot l_s^3 \cdot N}{(a_s - d)^3} \cdot \text{sen}^3\left(\frac{180^\circ}{n}\right) \end{aligned} \quad (3.92)$$

O parâmetro “ j ” determina a configuração dos subcondutores durante o curto-circuito, A partir deste cálculo é possível determinar se os condutores colidem ou se a distância entre eles é apenas reduzida sem colisão.

$$j = \sqrt{\frac{\epsilon_{pi}}{1 + \epsilon_{st}}} \quad (3.93)$$

A força “ $F_{pi,d}$ ” é calculada de diferentes formas para cada uma dessas condições.

3.3.4.1 Caso em que há colisão - $j \geq 1$

Neste caso, a condição $j \geq 1$ deve ser satisfeita.

Dois outros fatores são calculados:

$$\begin{aligned} v_4 &= \frac{a_s - d}{d} \\ v_e &= \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} \cdot n \cdot (n-1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_k}{n}\right)^2 \cdot N \cdot v_2 \cdot \left(\frac{l_s}{a_s - d}\right)^4 \cdot \frac{\text{sen}^4\left(\frac{180^\circ}{n}\right)}{\xi^3} \cdot \left\{ 1 - \frac{\tan^{-1}\sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (3.94)$$

O valor da força de pinçamento é dado pela equação:

$$F_{pi,d} = F_{st} \cdot \left(1 + \frac{V_e}{\varepsilon_{st}} \cdot \xi \right) \quad (3.95)$$

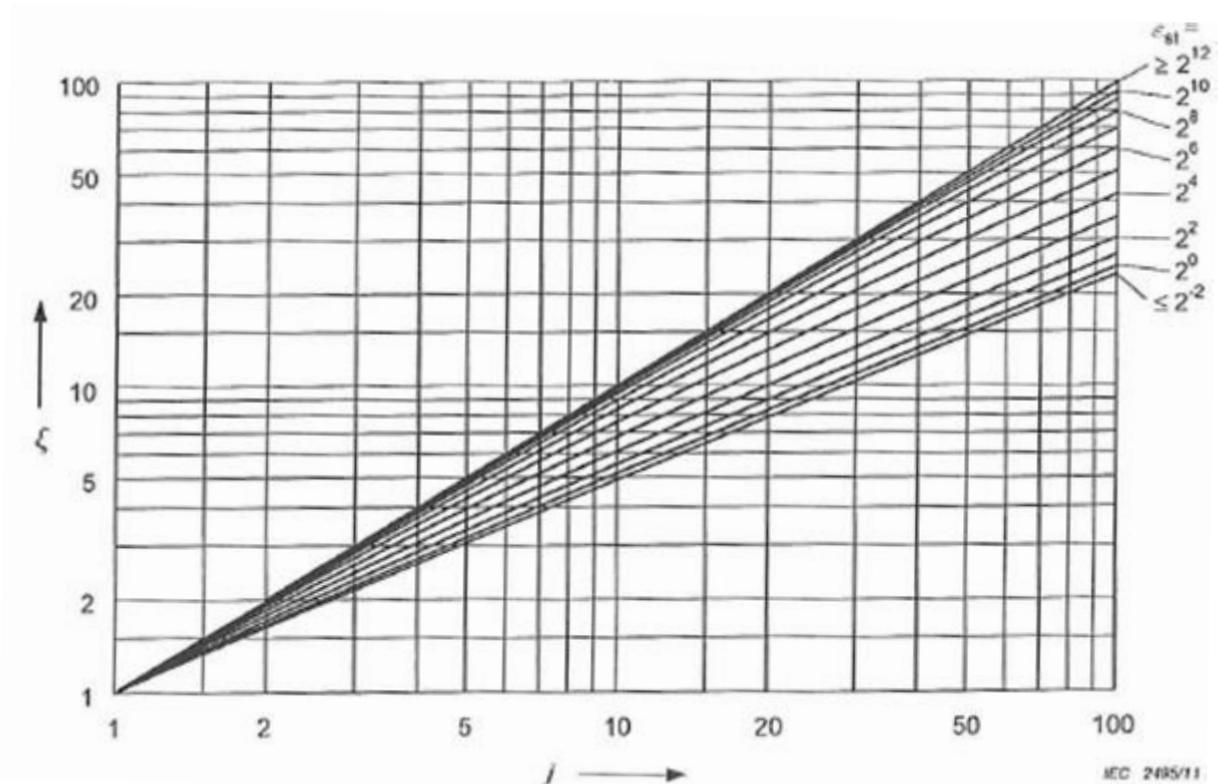
Ressalta-se que a força “ $F_{pi,d}$ ” depende diretamente do valor do esforço estático e de um parâmetro “ ξ ” que é obtido pela expressão (3.96) ou através da Figura 3.14 a seguir:

$$\xi^3 + \varepsilon_{st} \cdot \xi^2 - j^2 \cdot (1 + \varepsilon_{st}) = 0$$

$$\frac{2}{j^3} \leq \xi \leq j \quad (3.96)$$

O valor do parâmetro “ ξ ” depende dos valores de “ j ” e de “ ε_{st} ”, conforme pode-se observar na Figura 3.14 abaixo ou na expressão (3.96).

Figura 3.14 - Determinação de ξ [3].



3.3.4.2 Caso em que não há colisão - $j < 1$

Neste caso, a condição $j < 1$ deve ser satisfeita.

Dois outros fatores também são calculados:

$$v_4 = \eta \cdot \frac{a_s - d}{a_s - \eta \cdot (a_s - d)}$$

$$v_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} \cdot n \cdot (n-1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_k}{n}\right)^2 \cdot N \cdot v_2 \cdot \left(\frac{l_s}{a_s - d}\right)^4 \cdot \frac{\sin^4\left(\frac{180^\circ}{n}\right)}{\eta^4} \cdot \left\{ 1 - \frac{\tan^{-1}\sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (3.97)$$

O valor da força de pinçamento é dado pela expressão:

$$F_{pi,d} = F_{st} \cdot \left(1 + \frac{v_e}{\epsilon_{st}} \cdot \eta^2 \right) \quad (3.98)$$

A força “ $F_{pi,d}$ ” para este caso também depende diretamente do valor do valor do esforço estático e de um parâmetro “ η ”.

“ η ” pode ser obtido pelas expressões a seguir:

$$\eta^3 + \epsilon_{st} \cdot \eta - j^2 \cdot (1 + \epsilon_{st}) \cdot f_n = 0$$

$$0 \leq \eta \leq 1 \quad (3.99)$$

Para determinação de “ f_n ” a sequência de expressões abaixo deve ser utilizada:

$$f_n = \frac{v_3}{\frac{a_{sw}}{a_s}}$$

$$\frac{a_{sw}}{a_s} = \frac{2 \cdot \frac{y_a}{a_s}}{\sin\left(\frac{180^\circ}{n}\right)} \cdot \frac{\sqrt{1 - 2 \cdot \frac{y_a}{a_s}}}{\tan^{-1} \sqrt{1 - 2 \cdot \frac{y_a}{a_s}}} \quad (3.100)$$

$$2 \cdot \frac{y_a}{a_s} = 1 - \eta \cdot \left(1 - \frac{d}{a_s} \right)$$

“ η ” também pode ser obtido graficamente, de acordo com a relação $\frac{a_s}{d}$.

Figura 3.15 - Determinação de η para $2,5 < \frac{a_s}{d} \leq 5,0$ [3].

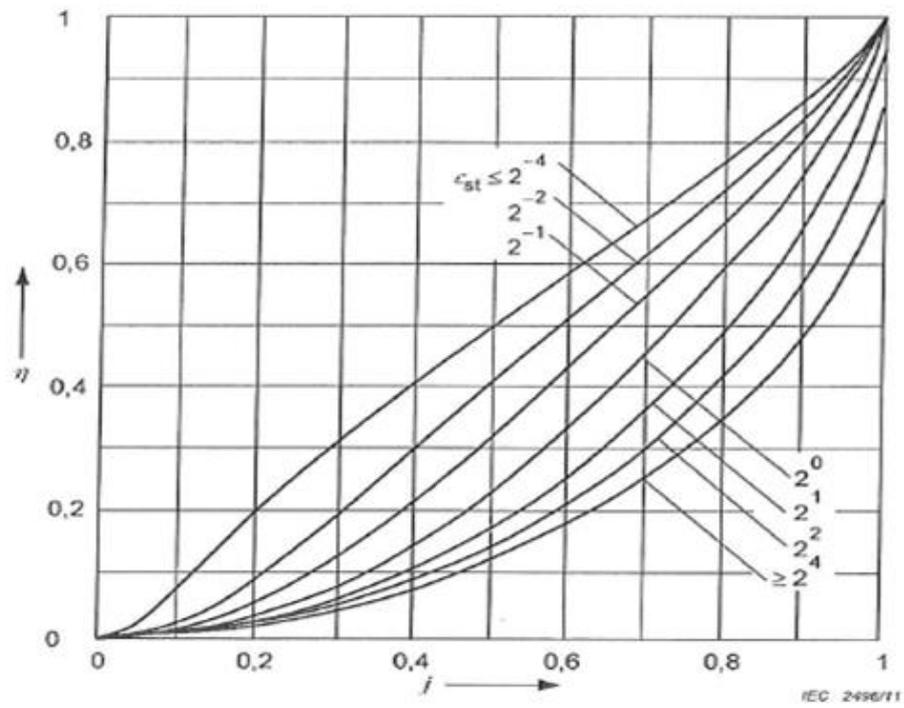


Figura 3.16 - Determinação de η para $5,0 < \frac{a_s}{d} \leq 10,0$ [3].

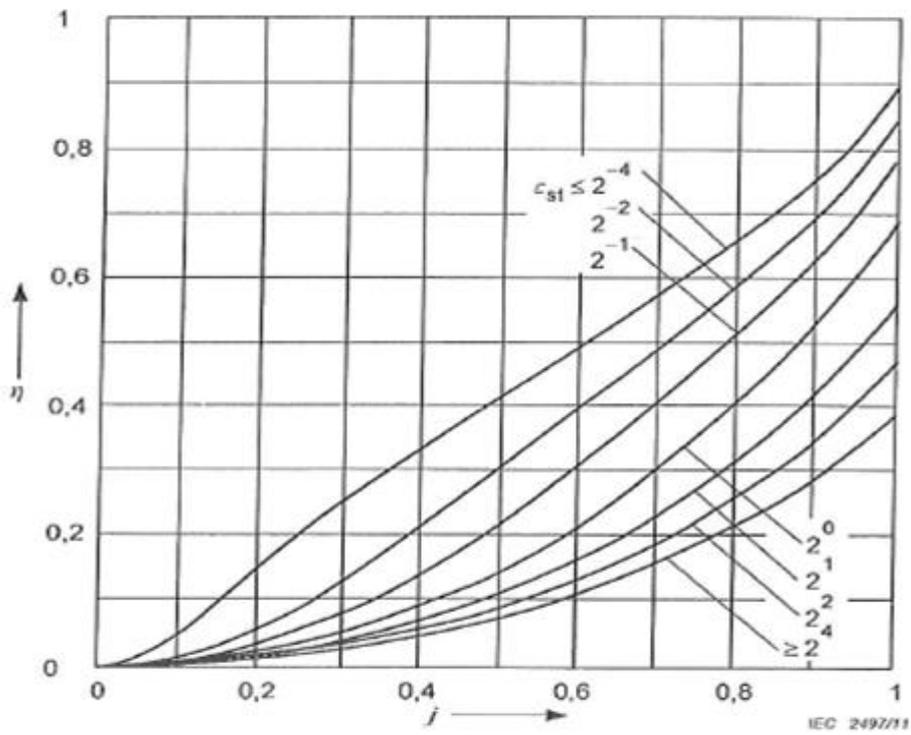


Figura 3.17 - Determinação de η para $10,0 < \frac{a_s}{d} \leq 15,0$ [3].

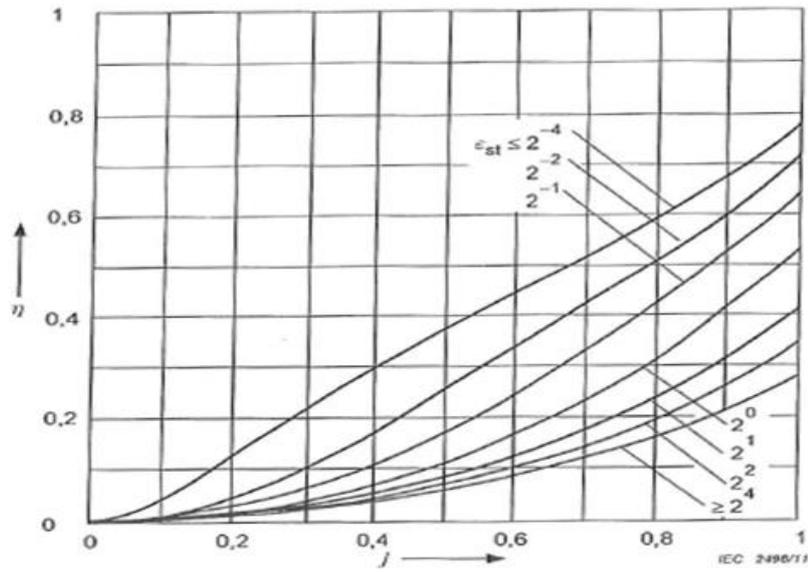


Figure 12c - $10,0 < a_s/d \leq 15,0$

4 Resultados

Os itens a seguir apresentam a análise e resultados obtidos para alguns vãos de subestações estudados. São calculados os esforços utilizando as metodologias expostas.

Em uma primeira seção, todos os cálculos são detalhados e comentados, quando necessário. Em seguida são apresentados os resultados obtidos para diferentes condições.

Para os cálculos detalhados, foram considerados os seguintes dados com relação à localização e características da instalação:

- Local: estado do Pará, próximo à usina de Belo Monte;
- Distância entre as fases: 8,0 m para 500 kV;
- Consideração do tempo de eliminação de falta de 600 ms (utilizou-se esse tempo para que as condições para o cálculo da força de *drop-back* fossem satisfeitas e o cálculo pudesse ser apresentado);
- *Bundle* com 4 subcondutores Rail com espaçamento regular;
 - Massa por unidade de comprimento do condutor: 1,6 kg/m;
 - Diâmetro do condutor: 29,61 mm;
- Distância entre os subcondutores: 0,457 m para 500 kV;
- Corrente de curto-circuito: 63 kA para 500 kV;
- Altura de instalação dos condutores Rail: 28 metros acima do solo;
- Altitude da região; 50 metros acima do nível do mar;
- Comprimento das cadeias de isoladores: 6,0 m para 500 kV;
- Massa das cadeias de isoladores: 300 kg para 500 kV;
- 27 isoladores de vidro de 256 mm de diâmetro por penca na cadeia de isoladores;
- Flecha máxima de 3,5 % do comprimento do vão para 500 kV;
- Terreno aberto com poucos obstáculos;
- Utilização de 5 espaçadores igualmente espaçados ao longo do vão;

4.1 Cálculos detalhados: subestação 500 kV - Vão de 98 metros com 4 condutores Rail por fase.

4.1.1 Cálculo dos esforços para a condição inicial

O cálculo é detalhado de acordo com a metodologia exposta no item 3.1. Para facilitar a visualização, as equações são reescritas nesta seção.

Determina-se o vão equivalente, caso haja desnível entre os suportes. Para este exemplo, considerar-se-á um vão nivelado, portanto, $h = 0$.

$$a_e = a + \frac{2 \cdot H \cdot h}{m_c \cdot g \cdot a} \Rightarrow h = 0 \Rightarrow a = 98 \text{ (m)} \quad (4.1)$$

Para um valor inicial de tração horizontal, calcula-se a flecha.

$$f = \frac{1}{2 \cdot H} \cdot \left(\frac{m_c \cdot g \cdot a^2}{4} + m_c \cdot g \cdot L_K^2 + G_K \cdot L_K \right) \quad (4.2)$$

O valor obtido para flecha é comparado com o valor de projeto e caso diverja deste valor ajustes são feitos na tração H e o processo é repetido até que estes valores coincidam.

Este resultado é utilizado nas próximas etapa como condição inicial.

Este procedimento resulta em uma tração inicial T_0 , por condutor do *bundle*, de 632 kgf.

Nesta etapa pode-se determinar os esforços verticais aos quais a estrutura estará submetida:

$$F_{\text{vertical}} = \frac{1}{2} \cdot P_c \cdot (N \cdot a - 2 \cdot S_1) + P_i = 575 \text{ (kgf)} \quad (4.3)$$

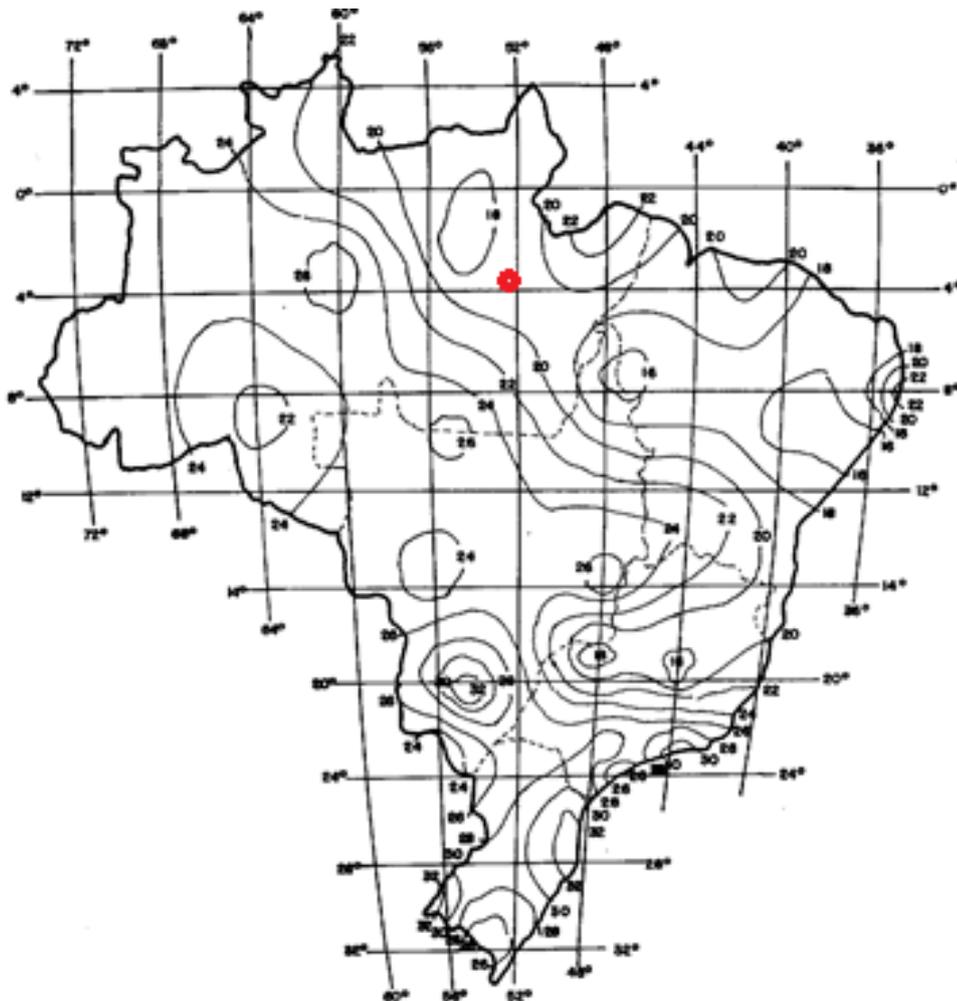
4.1.2 Resultados Obtidos Considerando a Norma NBR5422

Os itens abaixo detalham as considerações sobre a ação de ventos de acordo com a norma NBR 5422 [1].

4.1.2.1 Velocidade básica de vento

A velocidade básica de projeto é determinada a partir da Figura 4.1.

Figura 4.1 - Isopletas - Localização da instalação - Norma NBR 5422 [1].



4.1.2.2 Categoria do terreno

Para terreno aberto com poucos obstáculos, como considerada, o terreno será de categoria B, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Coeficientes de rugosidade do terreno [1].

Categoria do Terreno	Características do terreno	Coefficiente de rugosidade (Kr)
A	Extensões de água Áreas planas costeiras Desertos planos	1,08
B	Terreno aberto com poucos obstáculos Aeroportos Plantações com poucas árvores ou construções	1,00
C	Terreno com obstáculos numerosos e pequenos (sebes, árvores e construções)	0,85
D	Áreas urbanizadas Terrenos com muitas árvores altas	0,67

4.1.2.3 Correção do período de retorno

Figura 4.2 - Estimador do fator de escala da distribuição de Gumbel - α (m/s)⁻¹ [1].

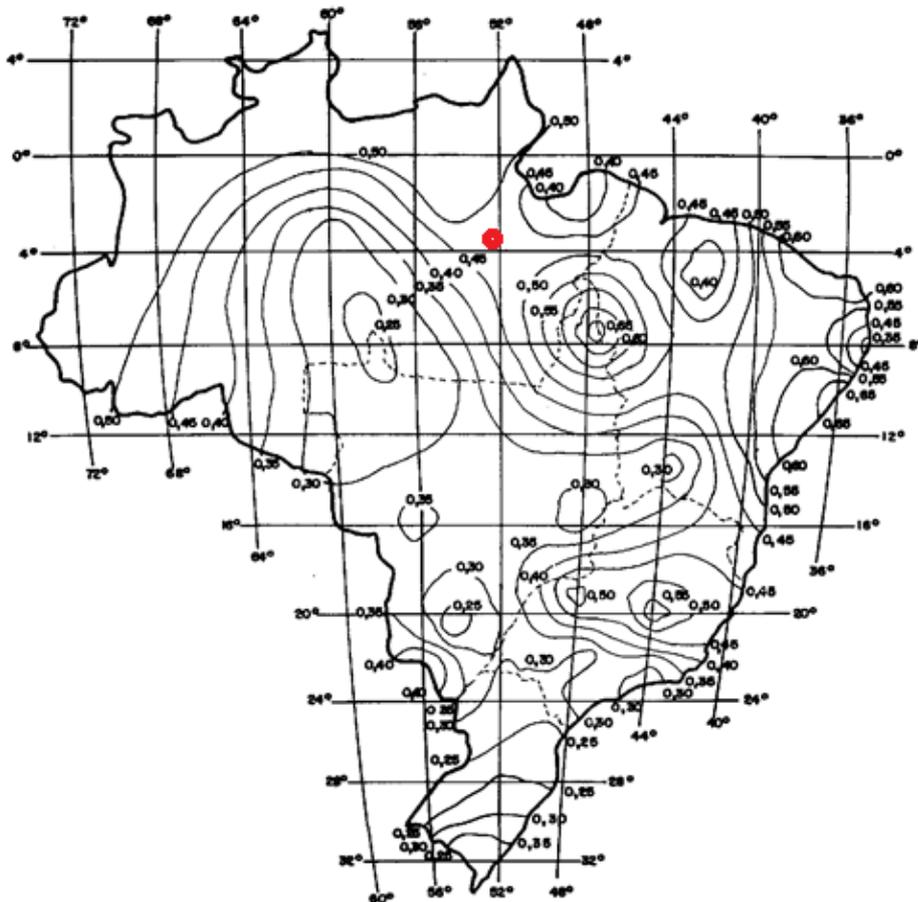
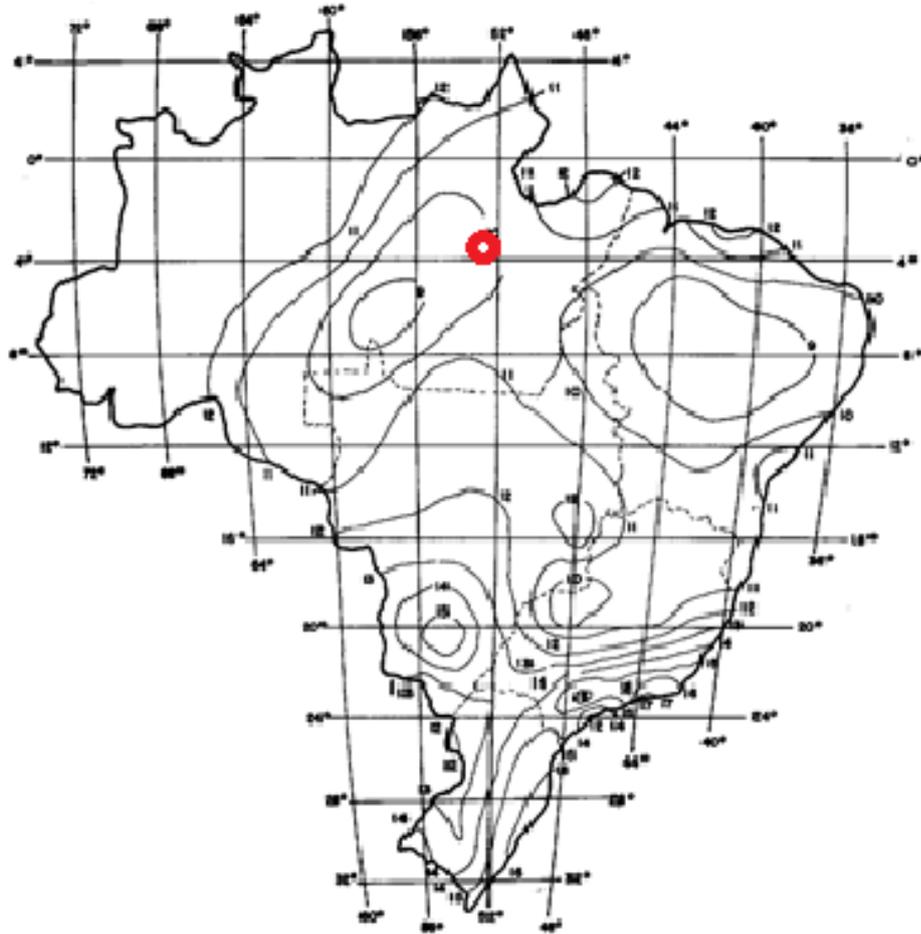


Figura 4.3 - Estimador do fator de posição da distribuição de Gumbel - β em m/s [1].



Estabelecem-se os valores dos dois estimadores:

- $\alpha = 0,45 \text{ (m/s)}^{-1}$ - é o estimador do fator de escala da distribuição de Gumbel; definido pela Figura 4.2;
- $\beta = 10 \text{ m/s}$ - é o estimador do fator de posição da distribuição de Gumbel, definido pela Figura 4.3.

Determinados os valores destes parâmetros, calcula-se o novo valor da velocidade de vento, referido ao novo período de retorno T (em anos).

$$V_T = \beta - \frac{\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]}{\alpha} = 10 - \frac{\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{250} \right) \right]}{0,45} = 22,27 \text{ (m/s)} \quad (4.4)$$

4.1.2.4 Correção de altura

A velocidade básica de vento é determinada para uma altura de 10 m acima do solo. Caso a altura de instalação dos condutores e cadeias de isoladores seja diferente deste valor é necessário corrigir o valor da velocidade básica. Esta correção depende de um fator “n” relacionado à rugosidade do terreno e ao período de integração adotado, de acordo com a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Valores de ‘n’ para correção de altura [1].

Categoria do Terreno	Parâmetro n	
	Tempo de integração t = 2 segundos	Tempo de integração t = 30 segundos
A	13	12
B	12	11
C	10	9,5
D	8,5	8

A norma NBR 5422/1988 [1] indica o período de integração de 2 segundos para ação de vento nas cadeias de isoladores e o período de 30 segundos para ação de vento nos condutores, portanto, ter-se-ão dois valores de velocidade de vento corrigida: um para utilizar para as cadeias de isoladores e outro para os condutores. Para a altura de instalação de 28 metros vem que:

$$\begin{aligned}
 V_{H_{\text{condutor}}} &= V_{10} \cdot \left(\frac{H}{10}\right)^{\frac{1}{n_{\text{condutor}}}} = 22,27 \cdot \left(\frac{28}{10}\right)^{\frac{1}{11}} = 24,46 \text{ (m/s)} \\
 V_{H_{\text{cadeia}}} &= V_{10} \cdot \left(\frac{H}{10}\right)^{\frac{1}{n_{\text{cadeia}}}} = 22,27 \cdot \left(\frac{28}{10}\right)^{\frac{1}{12}} = 24,27 \text{ (m/s)}
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

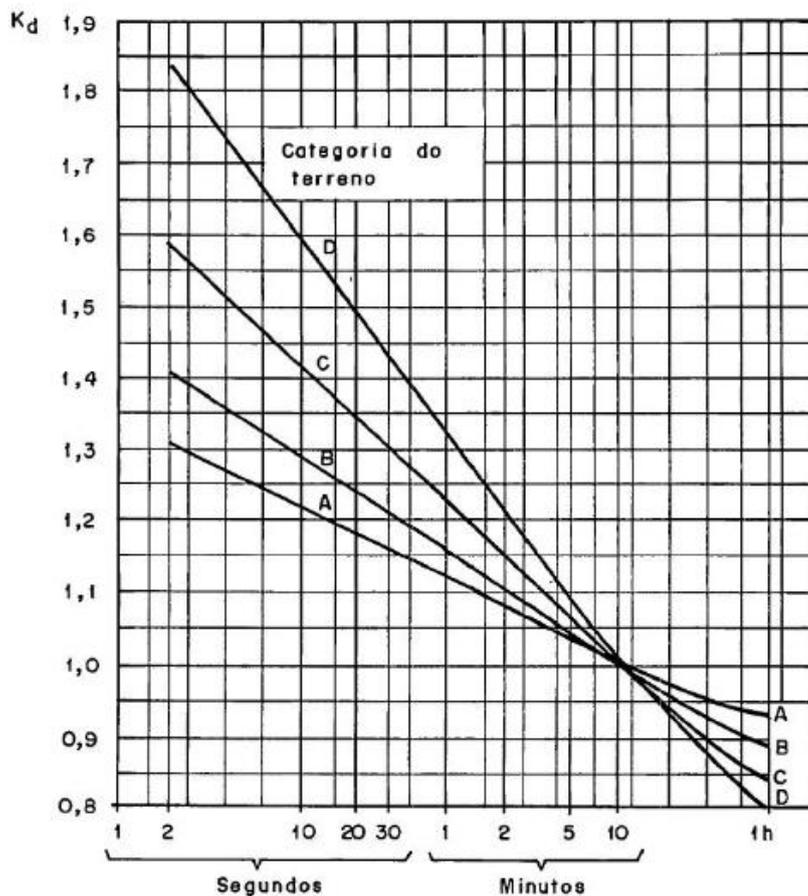
4.1.2.5 Correção do período de integração para a velocidade média

Determinam-se os valores dos fatores “k_d” para os condutores e cadeias de isoladores.

Novamente, utilizam-se os períodos de integração de 2 segundos para ação de vento nas cadeias de isoladores e de 30 segundos para ação de vento nos condutores.

$$\begin{aligned} k_{d_{\text{condutor}}} &= 1,21 \\ k_{d_{\text{cadeia}}} &= 1,41 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Figura 4.4 - Fator K_d - Diferentes períodos de integração [1].



4.1.2.6 Cálculo da carga de vento

A velocidade de projeto, levando em consideração todas as correções supracitadas, é determinada pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned} V_{P_{\text{condutor}}} &= V_T \cdot K_r \cdot K_{d_{\text{condutor}}} \cdot \left(\frac{H}{10}\right)^{\frac{1}{n}} = 29,35 \text{ (m/s)} \\ V_{P_{\text{cadeia}}} &= V_T \cdot K_r \cdot K_{d_{\text{cadeia}}} \cdot \left(\frac{H}{10}\right)^{\frac{1}{n}} = 34,47 \text{ (m/s)} \end{aligned} \quad (4.7)$$

A pressão dinâmica depende do valor da massa específica do ar “ ρ ” em kg/m^3 .

$$\rho = \frac{1,293}{1 + 0,00367 \cdot t} \cdot \left(\frac{16000 + 64 \cdot t - \text{Alt}}{16000 + 64 \cdot t + \text{Alt}} \right) = 1,1895 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (4.8)$$

A pressão dinâmica de referência em N/m² é calculada por:

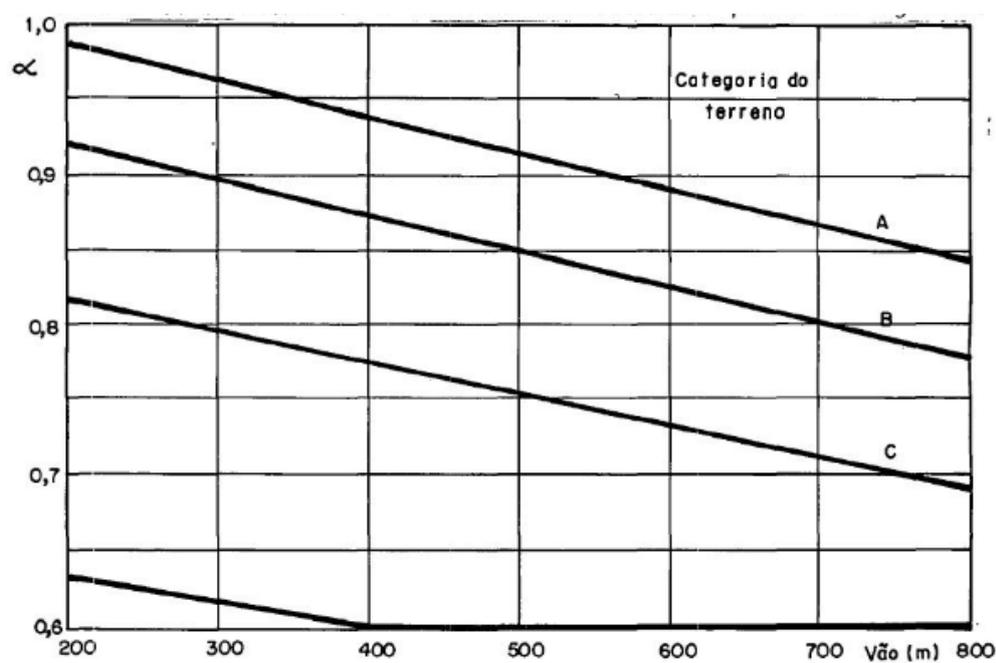
$$q_{0_{\text{condutor}}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_p^2 = 521 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$$q_{0_{\text{cadeia}}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_p^2 = 696 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (4.9)$$

4.1.2.7 Ação do vento nos condutores e na cadeia de isoladores

A ação do vento nos condutores depende do fator de efetividade que é obtido da análise do gráfico apresentado a seguir [1]. Para tanto, utilizaram-se os dados do gráfico para obter uma equação de reta que foi utilizada para extrapolar os limites do eixo das abcissas apresentados até o comprimento do vão estudado. Ressalta-se que esta norma é utilizada para linhas de transmissão, por isso o gráfico apresenta valores altos de comprimento.

Figura 4.5 - Fator de efetividade α [1].



A reta para a categoria B é dada a seguir:

$$\alpha = \frac{195 - 0,05 \cdot V}{200} \quad (4.10)$$

Onde:

- V é o comprimento do vão (m);
- α é o fator de efetividade que depende da categoria do terreno e do comprimento do vão e é dado pela Figura 4.5:

Para o comprimento de 98 metros do vão, tem-se que:

$$\alpha = \frac{195 - 0,05 \cdot 98}{200} = 0,9505 \quad (4.11)$$

Calcula-se então a ação dos ventos nos condutores, considerando a pior situação para o ângulo de incidência do vento, ou seja, 90°.

$$A_C = q_{0_{\text{condutor}}} \cdot C_{xc} \cdot \alpha \cdot d \cdot \frac{V}{2} \cdot \text{sen}^2(\theta) = \frac{521 \cdot 1,0 \cdot 0,9505 \cdot 0,02961 \cdot \frac{98}{2} \cdot \text{sen}(90^\circ)}{9,81} = 73,24 \text{ (kgf)} \quad (4.12)$$

Este valor é com relação à ação de vento por condutor. Para o caso de *bundle* este número deve ser multiplicado pelo número de condutores do *bundle*.

Ressalta-se também que o valor do comprimento do vão é dividido por dois, uma vez que os efeitos das forças serão divididos entre as duas estruturas de suporte de cada lado.

A ação do vento na cadeia de isoladores é dada pela expressão (4.13), considerando uma cadeia com 27 isoladores de 256 mm de diâmetro e comprimento total de 6,0 metros:

$$A_i = q_{0_{\text{cadeia}}} \cdot C_{xi} \cdot S_i = \frac{696 \cdot 1,2 \cdot 1,0}{9,81} = 86,44 \text{ (kgf/penca)} \quad (4.13)$$

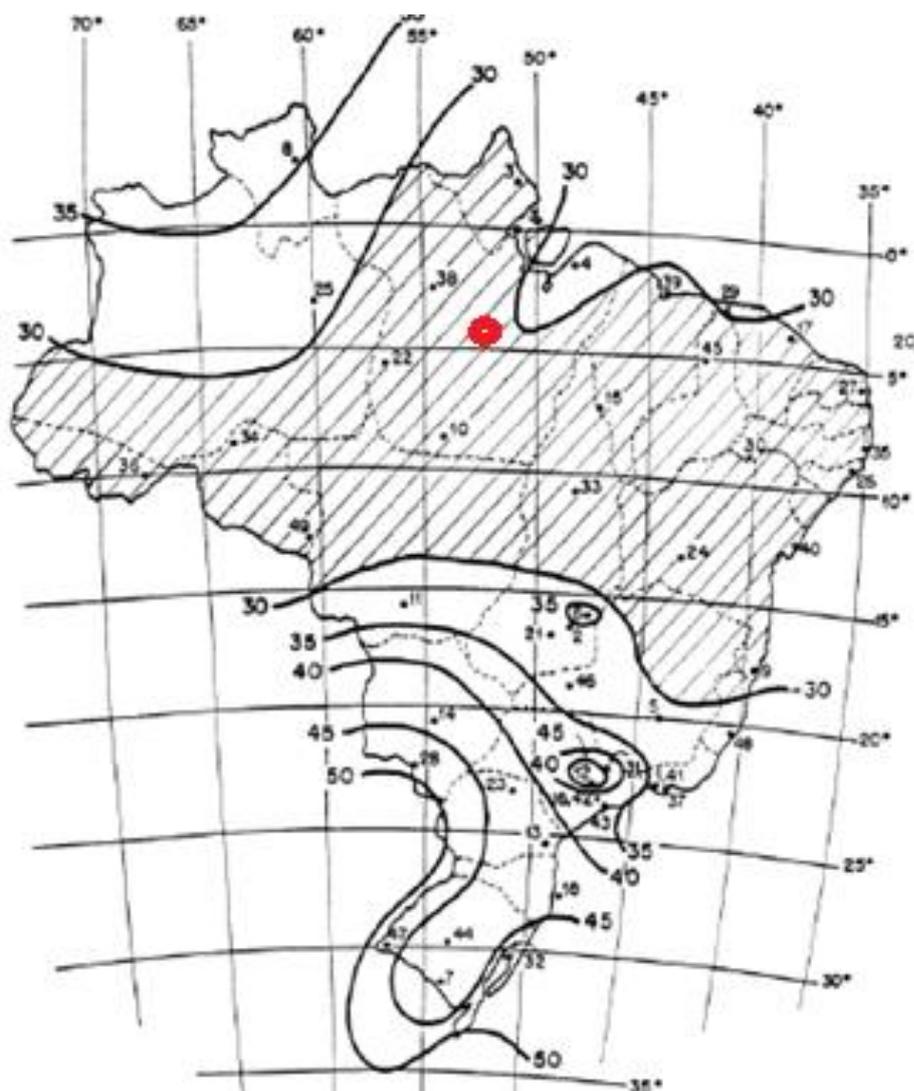
4.1.3 Norma NBR 6123/1988 - Forças devidas ao vento em edificações

A velocidade característica do vento “ V_k ” é determinada pela equação (4.14), que depende dos fatores S_1 , S_2 e S_3 :

$$V_k = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot V_0 \quad (4.14)$$

A velocidade básica de vento “ V_0 ” é definida a partir da Figura 4.6 que representa as isopletas do território nacional.

Figura 4.6 - Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s), NBR 6123 [2].



4.1.3.1 Determinação do fator topográfico S_1

O fator topográfico “ S_1 ” leva em consideração as variações do relevo do terreno. Para terreno plano ou fracamente acidentado $S_1 = 1,0$.

4.1.3.2 Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno: Fator S_2

O fator S_2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração e é definido pela seguinte fórmula:

$$S_2 = b \cdot F_r \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (4.15)$$

Onde:

- F_r é o fator de rajada;
- b e p são parâmetros relacionados à rugosidade do terreno;
- z é a altura acima do nível geral do terreno (m).

O Anexo A da norma define os valores dos parâmetros “ b ”, “ p ” e “ F_r ” para diversos intervalos de tempo de integração para as cinco categorias de rugosidade de terreno. Para edificações que excedem 80 m (que é o caso estudado para este vão) em alguma de suas dimensões é utilizada a metodologia apresentada no Anexo A, a qual determina um intervalo de tempo de integração que deverá ser utilizado para determinação do fator “ S_2 ”. O cálculo final da velocidade média de vento sobre o intervalo de tempo considerado é feito de maneira iterativa utilizando as seguintes expressões:

Para o cálculo do intervalo de tempo:

$$t = 7,5 \cdot \frac{L}{V_t(h)} \quad (4.16)$$

Onde:

- t é o intervalo de tempo (s);
- L é a altura ou largura da superfície frontal (m);
- $V_t(h)$ é a velocidade média do vento sobre t segundos no topo da edificação ou parte da edificação em estudo e é calculada por:

$$V_t(h) = S_1 \cdot S_2(h) \cdot V_0 \quad (4.17)$$

Verifica-se que o valor de velocidade média $V_i(h)$ depende da determinação do parâmetro S_2 que, por sua vez, depende da altura, da rugosidade do terreno e do intervalo de tempo de integração adotado e este depende da velocidade média $V_i(h)$.

O processo descrito resulta nos seguintes valores para o tempo de integração adotado e o valor do parâmetro S_2 para o comprimento de 98 metros do vão em estudo:

$$\begin{aligned} t &= 24,73 \text{ (s)} \\ S_2 &= 1,0058 \end{aligned} \quad (4.18)$$

4.1.3.3 Fator estatístico S_3

Para subestações é considerado neste trabalho $S_3 = 1,1$, de acordo com a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Valores para o fator estatístico S_3 [2].

Grupo	Descrição	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, ...).	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, ...).	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, ...).	0,88
5	Edificações temporárias.	0,83

4.1.3.4 Pressão dinâmica

A partir dos valores apresentados de “ S_1 ” e “ S_3 ”, pode-se escrever que:

$$V_k = V_o \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 = 25 \cdot 1,0 \cdot 1,0058 \cdot 1,1 = 27,66 \text{ (m/s)} \quad (4.19)$$

O valor da pressão dinâmica é dado pela expressão abaixo:

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 = 468,99 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (4.20)$$

4.1.3.5 Componente perpendicular ao cabo da força de arrasto

O cálculo da componente perpendicular ao cabo depende do coeficiente de arrasto que, por sua vez, depende do número de Reynolds.

O número de Reynolds é calculado pela fórmula abaixo:

$$Re = 70000 \cdot V_k \cdot d = 70000 \cdot 27,66 \cdot 0,02961 = 57331 \quad (4.21)$$

A Tabela 4.4 relaciona os valores obtidos para o número de Reynolds com o coeficiente de arrasto.

Tabela 4.4 - Número de Reynolds e coeficientes de arrasto para os condutores [2].

Número de Reynolds	Coeficiente de arrasto do condutor
$Re \leq 25000$	1,3
$42000 < Re$	1,1

A expressão para o cálculo da componente perpendicular ao cabo é a seguinte:

$$F_y = C_a \cdot q \cdot \frac{V}{2} \cdot d \cdot \sin^2 \alpha = \frac{1,1 \cdot 468,99 \cdot \frac{98}{2} \cdot 0,02961 \cdot \sin(90^\circ)}{9,81} = 76,30 \text{ (kgf)} \quad (4.22)$$

O resultado foi convertido para “kgf”, pois é a unidade mais comumente utilizada nos projetos.

4.1.3.6 Cargas de vento nas cadeias de isoladores

Determina-se o coeficiente de arrasto para a cadeia de isoladores, conforme Tabela 4.5:

Tabela 4.5 - Coeficientes de arrasto - Cadeias de isoladores [2].

Número de Reynolds	Cai
$Re < 4,2 \cdot 10^5$	1,2
$4,2 \cdot 10^5 \leq Re < 8,4 \cdot 10^5$	0,6
$8,4 \cdot 10^5 \leq Re < 2,3 \cdot 10^6$	0,7
$2,3 \cdot 10^6 \leq Re$	0,8

A ação dos ventos nas cadeias de isoladores é então determinada por:

$$F_i = C_{ai} \cdot q \cdot K \cdot L_i \cdot d_i = \frac{1,2 \cdot 468,99 \cdot 1,0 \cdot 6,0 \cdot 0,256}{9,81} = 88,12 \text{ (kgf/penca)} \quad (4.23)$$

4.1.4 Determinação dos resultados para os esforços estáticos

O item abaixo apresenta os resultados para os esforços estáticos.

4.1.4.1 Equação de mudança de estado

Para o cálculo das trações em outras condições operativas de temperatura e cargas de vento é utilizada a equação de mudança de estado, apresentada pela equação (4.24):

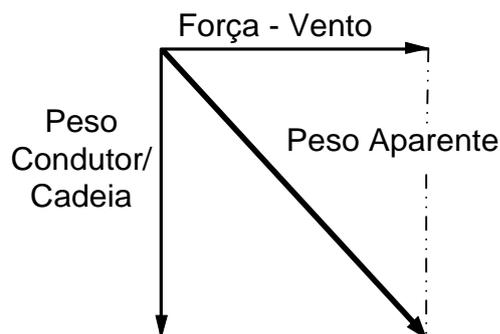
$$\begin{aligned} & \frac{E \cdot A \cdot (a \cdot m_{c2} \cdot g)^2}{24} + \frac{G_{K2} \cdot m_{c2} \cdot g \cdot L_K}{2} + \frac{G_{K2}^2 \cdot L_K}{3 \cdot a} = \\ & = H_2^2 \cdot \left\{ H_2 - H_1 + \frac{E \cdot A}{H_1^2} \cdot \left[\frac{(a \cdot m_{c1} \cdot g)^2}{24} + \frac{G_{K1} \cdot m_{c1} \cdot g \cdot L_K}{2} + \frac{G_{K1}^2 \cdot L_K}{3 \cdot a} \right] + E \cdot A \cdot \alpha \cdot \Delta\theta \right\} \quad (4.24) \end{aligned}$$

Para a condição de mínima temperatura, considerada neste trabalho como 0° C, tem-se que:

$$H_2 = 826 \text{ (kgf/conductor)} \quad (4.25)$$

Para a condição de vento máximo e temperatura coincidente deve-se substituir o peso por unidade de comprimento do condutor e o peso das cadeias de isoladores por um peso aparente resultante da interação com a força exercida pela ação dos ventos, conforme Figura 4.7.

Figura 4.7 - Composição do peso aparente para cálculo de mudança de estado.



Desta forma, tem-se que, na equação da mudança de estado, os valores dos pesos de condutores e cadeia de isoladores serão calculados pela expressão (4.26):

$$\begin{aligned} m_{c2} &= \sqrt{m_c^2 + F_y^2} \\ G_{K2} &= \sqrt{G_K^2 + F_i^2} \end{aligned} \quad (4.26)$$

Ressalta-se que a força de vento deve ser dividida pelo comprimento do vão em estudo para que a operação acima possa ser executada, uma vez que o peso do condutor “ m_c ” é dado por unidade de comprimento e desta forma é utilizado ao longo de toda a metodologia de cálculo apresentada.

Os resultados obtidos para esta condição, a partir da aplicação da equação de mudança de estado (4.24), são apresentados abaixo:

$$\begin{aligned} H_2 &= 980 \text{ [kgf/condutor]} - \text{NBR 5422} \\ H_2 &= 1004 \text{ [kgf/condutor]} - \text{NBR 6123} \end{aligned} \quad (4.27)$$

4.1.5 Determinação dos resultados para os esforços dinâmicos

São apresentados os cálculos para determinação dos esforços dinâmicos.

4.1.5.1 Cálculo da força $F_{t,d}$ sem Considerar o Efeito do *Dropper*

Calcula-se a força eletromagnética característica por unidade de comprimento em condutores flexíveis:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 0,75 \cdot \frac{(I_K)^2}{a} \cdot \frac{l_C}{V} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 0,75 \cdot \frac{(63000)^2}{8} \cdot \frac{(98 - 2 \cdot 6)}{98} = 65 \text{ (N/m)} \quad (4.28)$$

Determina-se a relação entre a característica da força eletromagnética “F” e a força devida à gravidade:

$$r = \frac{F'}{n \cdot m_s \cdot g} = \frac{65}{4 \cdot 1,6002 \cdot 9,81} = 1,04 \quad (4.29)$$

A direção “ δ ” da força resultante entre o peso do condutor e a força eletromagnética característica “F” é dada por:

$$\delta_1 = \tan^{-1}(r) = \tan^{-1}(1,0400) = 0,8050 \text{ (rad)} \quad (4.30)$$

O período de oscilação do condutor considerando a flecha (f_{es}) para a tração estática “ F_{st} ” é dado pela expressão (4.31):

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{0,8 \cdot \frac{f_{es}}{g}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{0,8 \cdot \frac{3,43}{9,81}} = 3,323 \text{ s} \quad (4.31)$$

Durante a passagem da corrente de curto-circuito o condutor oscila com um período dado por “ T_{res} ” que depende do período calculado acima e da direção da resultante entre a força peso e a força eletromagnética característica “F” e da relação r entre essas forças.

$$T_{res} = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} = \frac{3,3231}{\sqrt[4]{1+1,04^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{0,8050}{\pi/2} \right)^2 \right]} = 2,8833 \text{ (s)} \quad (4.32)$$

Calcula-se o módulo da elasticidade efetivo do condutor. Este valor é utilizado para determinar a norma da rigidez resultante entre condutores e estruturas de suporte.

$$\frac{F_{st}}{n \cdot A_s} < \sigma_{fin} \Rightarrow 1,2 \cdot 10^7 < 50 \cdot 10^6 \Rightarrow \text{verdadeiro}$$

$$E_{eff} = E \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin \left(\frac{F_{st}}{n \cdot A_s \cdot \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ \right) \right] = 5,3 \cdot 10^{10} \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin \left(\frac{1,2 \cdot 10^7}{50 \cdot 10^6} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \right] = 2,96 \cdot 10^{10} \text{ (N/m)} \quad (4.33)$$

A norma da rigidez resultante entre os suportes depende do valor de constante de *Spring* entre os suportes, representada por “S” e determinada a partir da Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Valores de constante de *Spring* para cada estrutura de suporte [3].

Faixa [N/m]	Tensão Nominal [kV]
150.103 até 1300.103	123
400.103 até 2000.103	245
600.103 até 3000.103	420

Calcula-se, então, a norma da rigidez:

$$N = \frac{1}{S \cdot l} + \frac{1}{n \cdot A_s \cdot E_{eff}} = \frac{1}{6,5 \cdot 10^5 \cdot 98} + \frac{1}{4 \cdot 5,1610^{-4} \cdot 2,96 \cdot 10^{10}} = 3,20 \cdot 10^{-8} \text{ (1/N)} \quad (4.34)$$

Para vãos com condutores tracionados, caso o valor de “S” não seja conhecido, o valor para cada estrutura nas seguintes faixas deve ser utilizado:

Efetua-se o cálculo do fator de *stress*.

$$\zeta = \frac{(n \cdot g \cdot m'_s \cdot l)^2}{24 \cdot F_{st}^3 \cdot N} = \frac{(4 \cdot 9,81 \cdot 1,6 \cdot 98)^2}{24 \cdot 2,48 \cdot 10^3 \cdot 3,20 \cdot 10^{-8}} = 3,2262 \quad (4.35)$$

Quando cessa a passagem da corrente de curto-circuito, o ângulo de oscilação do condutor é calculado da seguinte maneira:

$$0 \leq \frac{T_{kl}}{T_{res}} \leq 0,5 \Rightarrow \text{Verdadeiro}$$

$$\delta_{end} = \delta_1 \cdot \left[1 - \cos \left(360^\circ \cdot \frac{T_{kl}}{T_{res}} \right) \right] = 0,8050 \cdot \left[1 - \cos \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{0,6}{2,88} \right) \right] = 0,5955 \text{ (rad)} \quad (4.36)$$

O cálculo do máximo ângulo de oscilação depende de um parâmetro “ χ ”, dado por:

$$0 \leq \delta_{end} \leq 90^\circ$$

$$\chi = 1 - r \cdot \text{sen}(\delta_{end}) = 1 - 1,04 \cdot \text{sen}(0,5955) = 0,4166 \quad (4.37)$$

Então, é possível calcular o máximo ângulo de oscilação pela expressão abaixo:

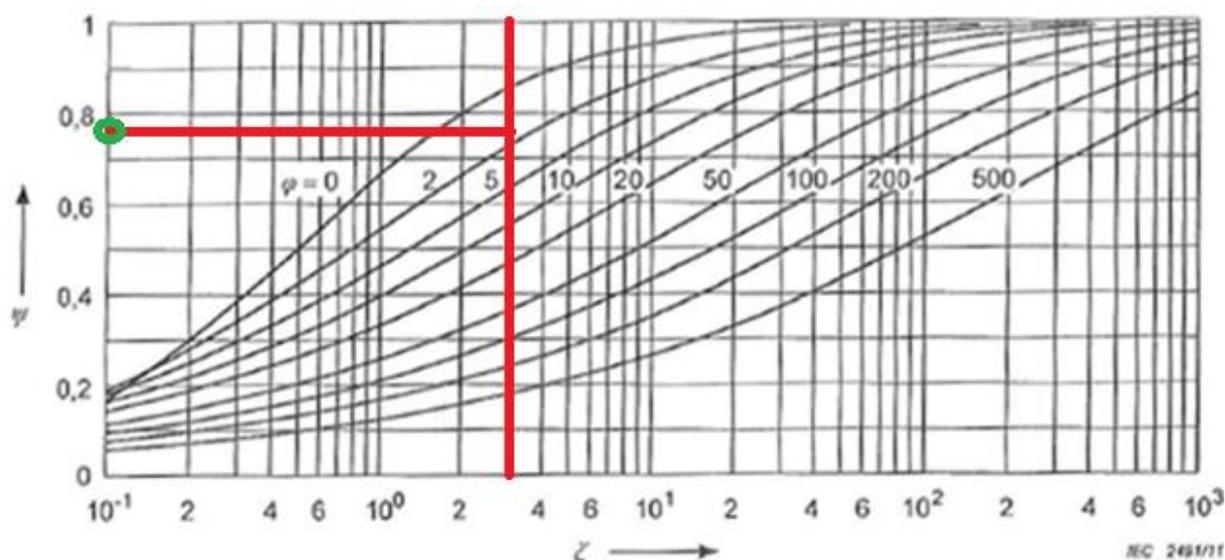
$$\begin{aligned} -0,985 &\leq \chi < 0,766 \\ \delta_{\max} &= 10^\circ + \cos^{-1}(0,4166) = 1,3156 \text{ (rad)} \end{aligned} \quad (4.38)$$

A partir da comparação do tempo para extinção da corrente de curto-circuito T_{ki} e o tempo de oscilação resultante “ T_{res} ”, calcula-se o parâmetro de carga:

$$\begin{aligned} T_{ki} &< \frac{T_{res}}{4} \\ \varphi &= 3 \cdot (r \cdot \sin(\delta_{\text{end}}) + \cos(\delta_{\text{end}}) - 1) = 3 \cdot (1,04 \cdot \sin(0,5955) + \cos(0,5955) - 1) = 1,2338 \end{aligned} \quad (4.39)$$

O fator da força de tração é determinado pelo gráfico abaixo:

Figura 4.8 - Determinação do fator da força de tração [3].



O anexo A.6 da norma fornece uma expressão para a determinação mais precisa do valor do fator de tração que depende dos valores do fator de stress e do parâmetro de carga, calculados em (3.68) e (3.72), respectivamente.

$$\begin{aligned} 1,2338^2 \cdot \psi^3 + 1,2338 \cdot (2 + 3,2262) \cdot \psi^2 + (1 + 2 \cdot 3,2262) \cdot \psi - 3,2262 \cdot (2 + 1,2338) &= 0 \\ \psi &= 0,7787 \end{aligned} \quad (4.40)$$

Finalmente, a tração “ $F_{t,d}$ ” é calculada por:

$$F_{t,d} = F_{st} \cdot (1 + \varphi \cdot \psi) = 2,4810^4 \cdot (1 + 1,2338 \cdot 0,7787) = 4,8644 \cdot 10^4 \text{ (N)} \quad (4.41)$$

4.1.5.2 Cálculo da Força $F_{f,d}$

As condições para consideração da força “ $F_{f,d}$ ” são satisfeitas e, portanto, o seu efeito é considerado.

Condições

$$\begin{aligned} r > 0,6 & \quad r = 1,04 \text{ (condição satisfeita)} \\ \delta_{\text{máx}} > 70^\circ & \quad \delta_{\text{máx}} = 1.3156 \text{ rad} = 75,37^\circ \text{ (condição satisfeita)} \end{aligned} \quad (4.42)$$

O valor da força “ $F_{f,d}$ ” é dado por:

$$F_{f,d} = 1,2 \cdot F_{st} \cdot \sqrt{1 + 8 \cdot \zeta \cdot \frac{\delta_{\text{máx}}}{180^\circ}} = 1,2 \cdot 2,4 \cdot 10^4 \cdot \sqrt{1 + 8 \cdot 3,22 \cdot \frac{1,32}{\pi}} = 1,023 \cdot 10^5 \text{ (N)} \quad (4.43)$$

Em vãos pequenos a rigidez à flexão faz com que o valor calculado acima seja superior ao real. O cálculo acima deve ser utilizado para vão cujo comprimento é superior a cem vezes o diâmetro do condutor, ou seja, $l > 100 \cdot d$.

4.1.5.3 Cálculo da Força $F_{pi,d}$

Verifica-se, em primeiro lugar, se os condutores colidem efetivamente, avaliando se as condições apresentadas são satisfeitas.

$$\begin{aligned} \frac{a_s}{d} \leq 2,0 \text{ e } l_s \geq 50 \cdot a_s & \quad \text{ou} \quad \frac{a_s}{d} \leq 2,5 \text{ e } l_s \geq 70 \cdot a_s \\ \frac{a_s}{d} = 15 \text{ (condição não satisfeita)} & \\ l_s = 21,5 \text{ metros (condição não satisfeita)} & \end{aligned} \quad (4.44)$$

Como as condições não foram atendidas, os condutores não colidem efetivamente e a metodologia a seguir deve ser adotada.

Ressalta-se que foram considerados 5 espaçadores, igualmente instalados ao longo do vão. O número de espaçadores influencia fortemente os valores obtidos para a força de *pinch*. Uma análise de sensibilidade deste parâmetro é efetuada na próxima seção.

Primeiramente, são determinados os valores de parâmetros v_1 , v_2 e v_3 .

$$v_1 = f \cdot \frac{1}{\text{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right)} \cdot \sqrt{\frac{(a_s - d) \cdot m_s'}{\frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_k}{n}\right)^2 \cdot \frac{n-1}{a_s}}} = 60 \cdot \frac{1}{\text{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)} \cdot \sqrt{\frac{(0,457-0,029) \cdot 1,6}{\frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{63000}{4}\right)^2 \cdot \frac{4-1}{0,457}}} = 3,884 \quad (4.45)$$

O fator “ v_2 ” depende do fator “ v_1 ” calculado e pode ser obtido pela expressão a seguir ou graficamente pela Figura 4.9.

$$v_2 = \frac{\sin(4 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi} - 2 \cdot \gamma) + \sin(2 \cdot \gamma)}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi}} + \frac{f \cdot \tau}{f \cdot T_{pi}} \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot f \cdot T_{pi}}{f \cdot \tau}} \right) \cdot \sin^2(\gamma) - \frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot \sin(\gamma)}{1 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau)^2} \left\{ \left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau \cdot \frac{\cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi} - \gamma)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi}} + \frac{\sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi} - \gamma)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi}} \right) e^{-\frac{f \cdot T_{pi}}{f \cdot \tau}} + \frac{\sin(\gamma) - 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau \cdot \cos(\gamma)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi}} \right\} \quad (4.46)$$

Onde:

- τ é a constante de tempo da rede e pode ser calculada a partir do procedimento exposto na norma IEC 60909-0 [20].

$$\frac{1}{\tau} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{3} \cdot \ln\left(\frac{\kappa - 1,02}{0,98}\right), \text{ para } \kappa \geq 1,1 \text{ e } \gamma = \tan^{-1}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau) \quad (4.47)$$

- Se $\kappa < 1,1$ o valor 1,1 deve ser utilizado;
- $f \cdot T_{pi}$ é solução da equação abaixo:

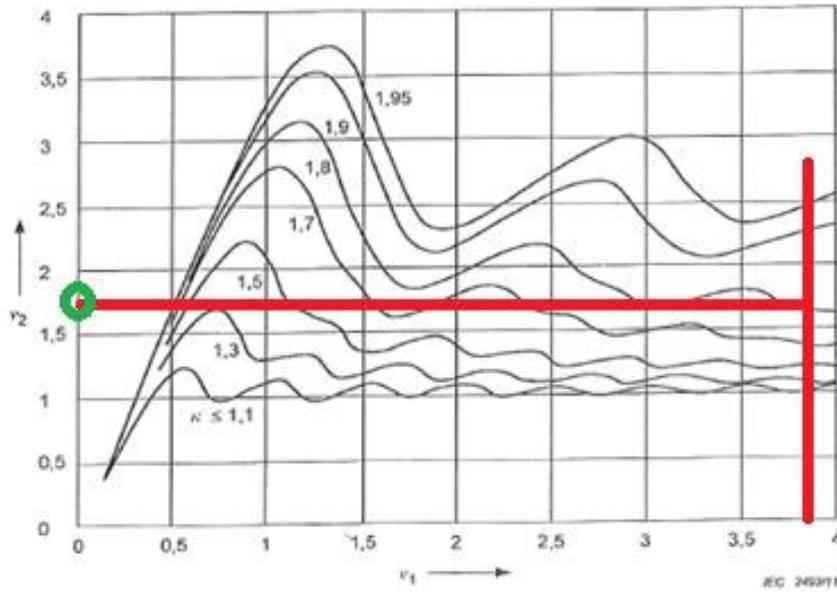
$$v_1 = f \cdot T_{pi} \cdot \sqrt{v_2} \quad (4.48)$$

Este valor é obtido por método iterativo e o resultado é mostrado abaixo:

$$v_2 = 1,6713 \quad (4.49)$$

Graficamente, tem-se que o fator “ v_2 ” depende do fator “ v_1 ” e varia conforme a Figura 4.9:

Figura 4.9 - Determinação do fator v_2 [3].

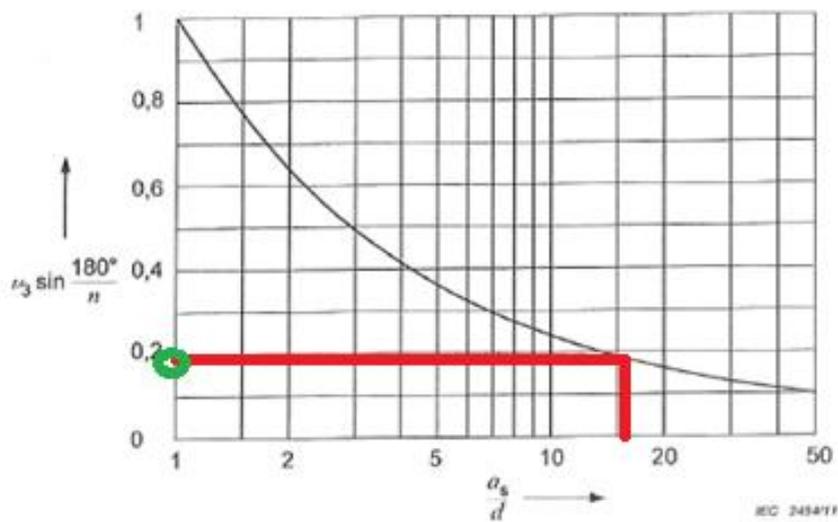


O fator “ v_3 ” é calculado pela expressão abaixo ou obtido pela Figura 4.10.

$$v_3 = \frac{\frac{d}{a_s}}{\sin\left(\frac{180^\circ}{n}\right)} \cdot \frac{\sqrt{\frac{a_s}{d}-1}}{\tan^{-1}\sqrt{\frac{a_s}{d}-1}} = \frac{0,029}{0,457} \cdot \frac{\sqrt{0,457-1}}{\tan^{-1}\sqrt{0,457-1}} = 0,265 \quad (4.50)$$

Sendo n o número de subcondutores do *bundle*.

Figura 4.10 - Determinação do fator v_3 [3].



A partir dos valores calculados de “ v_2 ” e “ v_3 ” determina-se a força “ F_v ”, relativa à passagem da corrente de curto-circuito. Representa a força de atração entre os subcondutores do *bundle*.

$$F_v = (n - 1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_k}{n}\right)^2 \cdot \frac{I_s}{a_s} \cdot \frac{v_2}{v_3} = (4 - 1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{63000}{4}\right)^2 \cdot \frac{21,5}{0,457} \cdot \frac{1,6713}{0,265} = 4,41 \cdot 10^4 \quad (4.51)$$

Dois fatores relativos à contração do *bundle* são calculados: “ ε_{st} ” e “ ε_{pi} ”.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{st} &= 1,5 \cdot \frac{F_{st} \cdot I_s^2 \cdot N}{(a_s - d)^2} \cdot \text{sen}^2\left(\frac{180^\circ}{n}\right) = 1,5 \cdot \frac{2,48 \cdot 10^4 \cdot 21,5^2 \cdot 3,20 \cdot 10^{-8}}{(0,457 - 0,0296)^2} \cdot \text{sen}^2\left(\frac{\pi}{4}\right) = 1,5081 \\ \varepsilon_{pi} &= 0,375 \cdot n \cdot \frac{F_v \cdot I_s^3 \cdot N}{(a_s - d)^3} \cdot \text{sen}^3\left(\frac{180^\circ}{n}\right) = 0,375 \cdot 4 \cdot \frac{2,48 \cdot 10^4 \cdot 21,5^3 \cdot 3,20 \cdot 10^{-8}}{(0,457 - 0,0296)^3} \cdot \text{sen}^3\left(\frac{\pi}{4}\right) = 95,49 \end{aligned} \quad (4.52)$$

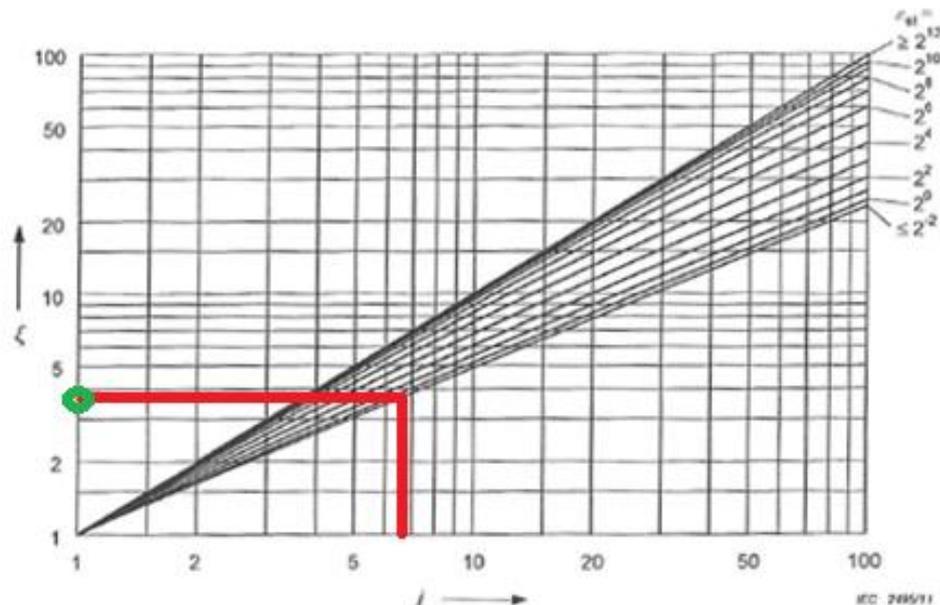
O parâmetro “ j ” determina a configuração dos subcondutores durante o curto-circuito: a partir deste cálculo é possível determinar se os condutores colidem ou se a distância entre eles é apenas reduzida sem colisão.

$$j = \sqrt{\frac{\varepsilon_{pi}}{1 + \varepsilon_{st}}} = \sqrt{\frac{95,49}{1 + 1,5081}} = 6,17 \quad (4.53)$$

Como $j > 1$, seguem os cálculos para esta condição.

Determina-se o fator “ ξ ” a partir da Figura 4.11 ou da expressão (4.54)

Figura 4.11 - Determinação de ξ [3].



$$\begin{aligned}
 \xi^3 + \varepsilon_{st} \cdot \xi^2 - j^2 \cdot (1 + \varepsilon_{st}) &= 0 \\
 \xi^3 + 1,51 \cdot \xi^2 - 4,12^2 \cdot (1 + 1,51) &= 0 \\
 \xi &= 4,12 \\
 j^{\frac{2}{3}} &\leq \xi \leq j \\
 6,17^{\frac{2}{3}} &\leq 4,12 \leq 6,17 \Rightarrow \text{Verdadeiro}
 \end{aligned} \tag{4.54}$$

Por fim, determina-se o valor da força de *pinch*.

$$\begin{aligned}
 v_4 &= \frac{a_s - d}{d} = \frac{0,457 - 0,0296}{0,0296} = 14,43 \\
 v_e &= \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} \cdot n \cdot (n-1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_k}{n} \right)^2 \cdot N \cdot v_2 \cdot \left(\frac{l_s}{a_s - d} \right)^4 \cdot \frac{\text{sen}^4 \left(\frac{180^\circ}{n} \right)}{\xi^3} \cdot \left\{ 1 - \frac{\tan^{-1} \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{1/2} = \\
 &= \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} \cdot 4 \cdot (4-1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{63000}{4} \right)^2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-8} \cdot 1,67 \cdot \left(\frac{21,5}{0,457-0,0296} \right)^4 \cdot \frac{\text{sen}^4 \left(\frac{\pi}{4} \right)}{4,12^3} \cdot \left\{ 1 - \frac{\tan^{-1} \sqrt{14,43}}{\sqrt{14,43}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \\
 v_e &= 1,0360
 \end{aligned} \tag{4.55}$$

O valor da força de pinçamento é dado pela expressão:

$$F_{pi,d} = F_{st} \cdot \left(1 + \frac{v_e}{\varepsilon_{st}} \cdot \xi \right) = 2,48 \cdot 10^4 \cdot \left(1 + \frac{1,0360}{1,5081} \cdot 4,1193 \right) = 9,5 \cdot 10^4 \text{ (N)} \tag{4.56}$$

4.2 Resultados obtidos para outras condições

A Tabela 4.7 e Tabela 4.8 a seguir resumem os resultados para diversas condições. As características de cada vão são apresentadas.

Tabela 4.7 - Resultados para diversas condições – ABNT NBR 6123/1988 [2].

Comprimento do Vão [m]	Condutor	Tração Estática			Tração Dinâmica 80°C			Tração Dinâmica 0 °C		
		Sem Vento 80°C [kgf]	Sem Vento 0°C [kgf]	Vento Máximo 22°C [kgf]	F _{t,d} [kgf]	F _{f,d} [kgf]	F _{pi,d} [kgf]	F _{t,d} [kgf]	F _{f,d} [kgf]	F _{pi,d} [kgf]
98	4x Rail	2528	3304	4017	4958	10428	9685	6128	10440	10838
90	4x Bluebird	5159	6942	7126	6124	--	14960	8135	--	17141
47	1x Lupine	565	721	812	1845	2738	--	2017	2545	--
26	2x Grosbeak	297	342	440	1043	1207	850	1077	1191	900
35	1x Oriole	233	262	378	1449	1197	--	1476	1191	--

Tabela 4.8 - Resultados para diversas condições – ABNT NBR 5422/1985 [1].

Comprimento do Vão [m]	Condutor	Tração Estática			Tração Dinâmica 80°C			Tração Dinâmica 0 °C		
		Sem Vento 80°C [kgf]	Sem Vento 0°C [kgf]	Vento Máximo 22°C [kgf]	F _{t,d} [kgf]	F _{f,d} [kgf]	F _{pi,d} [kgf]	F _{t,d} [kgf]	F _{f,d} [kgf]	F _{pi,d} [kgf]
98	4x Rail	2528	3304	3923	4958	10428	9685	6128	10440	10838
90	4x Bluebird	5159	6942	7119	6124	--	14960	8135	--	17141
47	1x Lupine	565	721	813	1845	2738	--	2017	2545	--
26	2x Grosbeak	297	342	472	1043	1207	850	1077	1191	900
35	1x Oriole	233	262	384	1449	1197	--	1476	1191	--

A Tabela 4.9 e a Tabela 4.10 a seguir apresentam o resultado obtido para o efeito simultâneo do vento e da passagem da corrente de curto-circuito. Para tanto, foi considerado, em um primeiro momento, 100% da carga de vento e máxima corrente de curto-circuito e, posteriormente, 60% da carga de vento e máxima corrente de curto circuito, conforme indicado na ABNT NBR 8681/2004 [4]

Tabela 4.9 - Resultados para diversas condições - 100% da carga de vento e corrente de curto-circuito máxima.

Comprimento do Vão [m]	Condutor	Tração Dinâmica Vento Máximo 5422			Tração Dinâmica Vento Máximo 6123		
		F _{t,d} [kgf]	F _{f,d} [kgf]	F _{pi,d} [kgf]	F _{t,d} [kgf]	F _{f,d} [kgf]	F _{pi,d} [kgf]
98	4x Rail	6758	9638	11844	6685	10595	11713
90	4x Bluebird	8162	--	17360	8267	--	17352
47	1x Lupine	2094	2435	--	1993	2595	--
26	2x Grosbeak	1139	1089	1007	1139	1268	1042
35	1x Oriole	1520	1032	--	1569	1178	--

Tabela 4.10 - Resultados para diversas condições - 60% da carga de vento e corrente de curto-circuito máxima.

Comprimento do Vão [m]	Condutor	Tração Dinâmica Vento Máximo 5422			Tração Dinâmica Vento Máximo 6123		
		F _{t,d} [kgf]	F _{f,d} [kgf]	F _{pi,d} [kgf]	F _{t,d} [kgf]	F _{f,d} [kgf]	F _{pi,d} [kgf]
98	4x Rail	6067	9798	10950	6118	10621	11009
90	4x Bluebird	7634	--	16728	7727	--	16731
47	1x Lupine	2012	2513	--	1896	2689	--
26	2x Grosbeak	1097	1116	948	1050	1351	932
35	1x Oriole	1456	1086	--	1486	1263	--

A norma IEC 60865 [3] não possui recomendações para efeitos simultâneos de curto-circuito e outros fatores. Nas brochuras do CIGRÉ 105 [17] e 214 [18] há comentários sobre considerações de efeitos simultâneos. Comenta-se que alguns países, como Alemanha, consideram o efeito simultâneo, mas que, até o momento, não há procedimento matemático disponível ou normas para considerar a combinação destes efeitos, apesar de que abordagens probabilísticas podem ser adotadas, afinal, ambos os parâmetros variam no tempo independentemente um do outro. Conclui-se que uma carga estática equivalente não pode ser formulada.

4.3 Análise de sensibilidade para os diversos parâmetros

Nos itens a seguir são apresentadas curvas que mostram a variação das forças resultantes, estáticas e dinâmicas, com a variação as grandezas envolvidas. Os cálculos nesta seção são realizados considerando a norma ABNT NBR 6123 [2] para considerações dos efeitos dos ventos sem considerar ação simultânea dos ventos e do curto-circuito.

4.3.1 Variação do comprimento do vão

Para análise dos esforços considerando a variação do comprimento do vão utilizado foram adotados os seguintes dados:

Tabela 4.11 - Dados utilizados para os cálculos - Variação do Comprimento do vão.

		Condutor Rail	Condutor Oriole
Cadeia de isoladores	Peso (P_i)	300 [kg]	65 [kg]
	Número	2	1
	Comprimento (S_i)	6 [m]	2,75 [m]
Vão	Flecha (%)	3,5%	3,5%
Vento	Fator S_1	1,0	1,0
	Fator S_2	1,0058	1,0058
	Fator S_3	1,1	1,1
	V_0	25 [m/s]	25 [m/s]
Curto-Circuito	Constante de Spring (S)	650000 [N/m]	75000 [N/m]
	Corrente de curto-circuito (I)	63 [kA]	31,5 [kA]
	Distância entre os subcondutores (as)	0,457 [m]	0,20 [m]
	Distância entre fases (a)	8 [m]	3 [m]
	Fator de assimetria (k)	1,81	1,81
	Tempo para eliminação do curto-circuito (T_k)	0,1 [s]	0,75 [s]
	Número de espaçadores	3	3

Os dados de catálogo dos condutores são apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Dados dos condutores utilizados [21].

	Bitola [kcmil]	Nº de Fios de Alumínio	Diâmetro dos Fios de Alumínio [mm]	Nº de Fios de Aço	Diâmetro dos Fios de Aço [mm]	Seção Transversal de Alumínio [mm ²]	Seção Transversal de Aço [mm ²]
Oriole	336,4	30	2,69	7	2,69	170,5	210,28
Rail	954,0	45	3,7	7	2,47	483,85	517,39

As tabelas e gráficos a seguir apresentam os resultados obtidos para diversos comprimentos do vão em estudo considerando quatro ou dois condutores Rail ou Oriole por fase.

Tabela 4.13 - Esforços para variação do comprimento do vão - Conductor Rail - 4 por fase.

Comprimento do Vão [m]	Conductor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
20	4x Rail	1881	2355	2643	1885	0	3567	2384	0	3907
40	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	11531	2115	0	12098
60	4x Rail	1846	2311	2779	1919	0	10200	2469	0	10935
80	4x Rail	2184	2807	3403	2286	0	9770	2978	0	10725
100	4x Rail	2569	3362	4088	2700	0	9687	3542	0	10861
120	4x Rail	2978	3939	4793	3138	0	9776	4126	0	11153
140	4x Rail	3401	4524	5505	3589	0	9965	4716	0	11525
160	4x Rail	3832	5113	6217	4050	0	10215	5308	0	11943
180	4x Rail	4269	5701	6927	4516	0	10506	5899	0	12386
200	4x Rail	4710	6289	7633	4986	0	10824	6489	0	12844
220	4x Rail	5154	6875	8335	5459	0	11161	7075	0	13310
240	4x Rail	5601	7459	9033	5934	0	11511	7660	0	13780
260	4x Rail	6049	8041	9727	6411	0	11872	8242	0	14251
280	4x Rail	6498	8620	10417	6888	0	12239	8821	0	14721
300	4x Rail	6948	9198	11102	7367	0	12610	9398	0	15187

Figura 4.12 - Variação dos esforços estáticos com o comprimento do vão - Condutor Rail - 4 por fase.

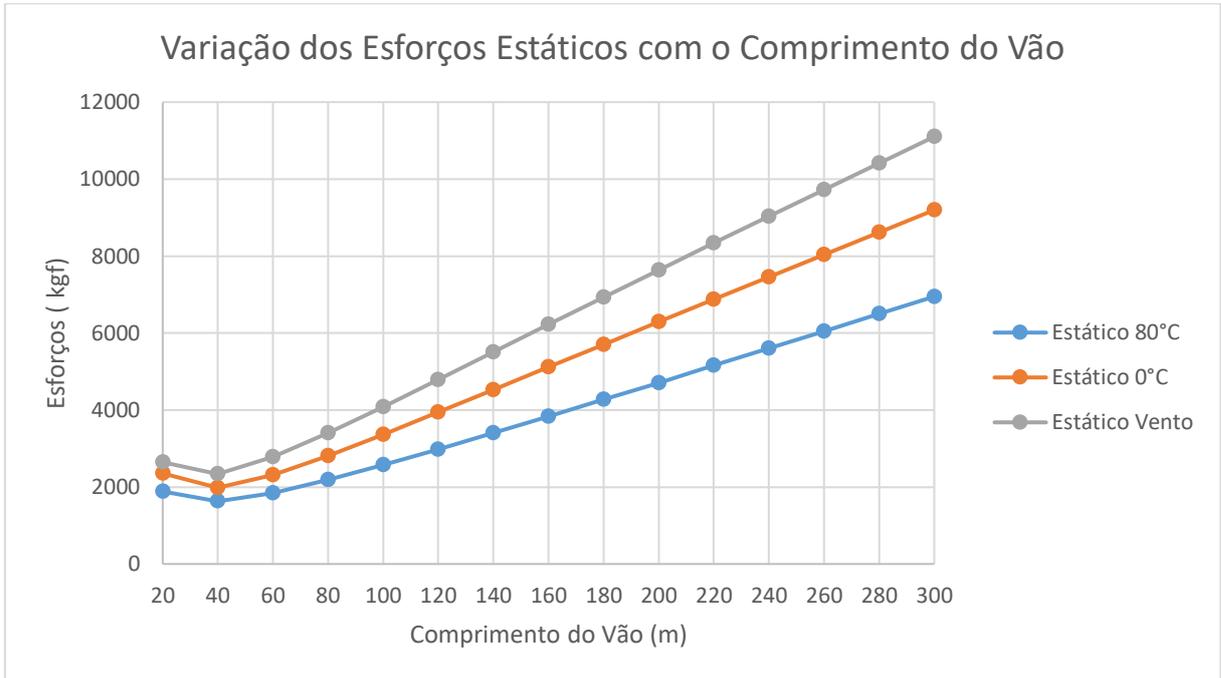


Figura 4.13 - Variação dos esforços dinâmicos com o comprimento do vão - Condutor Rail - 4 por fase.

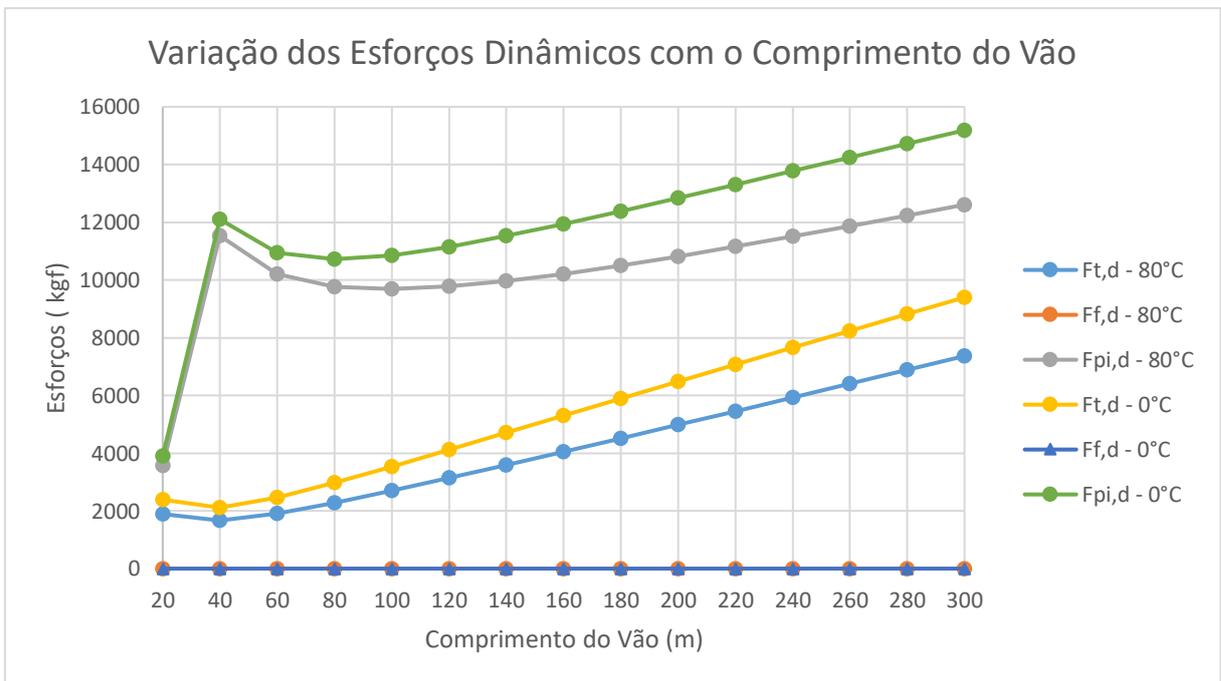


Tabela 4.14 - Esforços para variação do comprimento do vão - Conductor Rail - 2 por fase.

Comprimento do Vão [m]	Conductor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
20	2x Rail	1574	1911	2126	1580	0	3709	1958	0	3944
40	2x Rail	1133	1312	1526	1229	0	7618	1588	0	7950
60	2x Rail	1136	1336	1586	1309	0	6329	1654	0	6693
80	2x Rail	1252	1512	1817	1485	0	5809	1845	0	6263
100	2x Rail	1413	1750	2117	1704	0	5588	2098	0	6150
120	2x Rail	1596	2018	2449	1944	0	5516	2380	0	6186
140	2x Rail	1792	2300	2794	2198	0	5527	2674	0	6300
160	2x Rail	1996	2588	3145	2461	0	5591	2972	0	6456
180	2x Rail	2206	2880	3497	2728	0	5689	3271	0	6637
200	2x Rail	2419	3172	3848	3000	0	5809	3569	0	6832
220	2x Rail	2636	3464	4198	3275	0	5946	3865	0	7035
240	2x Rail	2854	3755	4546	3551	0	6093	4159	0	7244
260	2x Rail	3074	4045	4892	3829	0	6250	4451	0	7454
280	2x Rail	3295	4334	5236	4108	0	6412	4741	0	7665
300	2x Rail	3517	4622	5578	4387	0	6578	5029	0	7876

Figura 4.14 - Variação dos esforços estáticos com o comprimento do vão - Conductor Rail - 2 por fase.

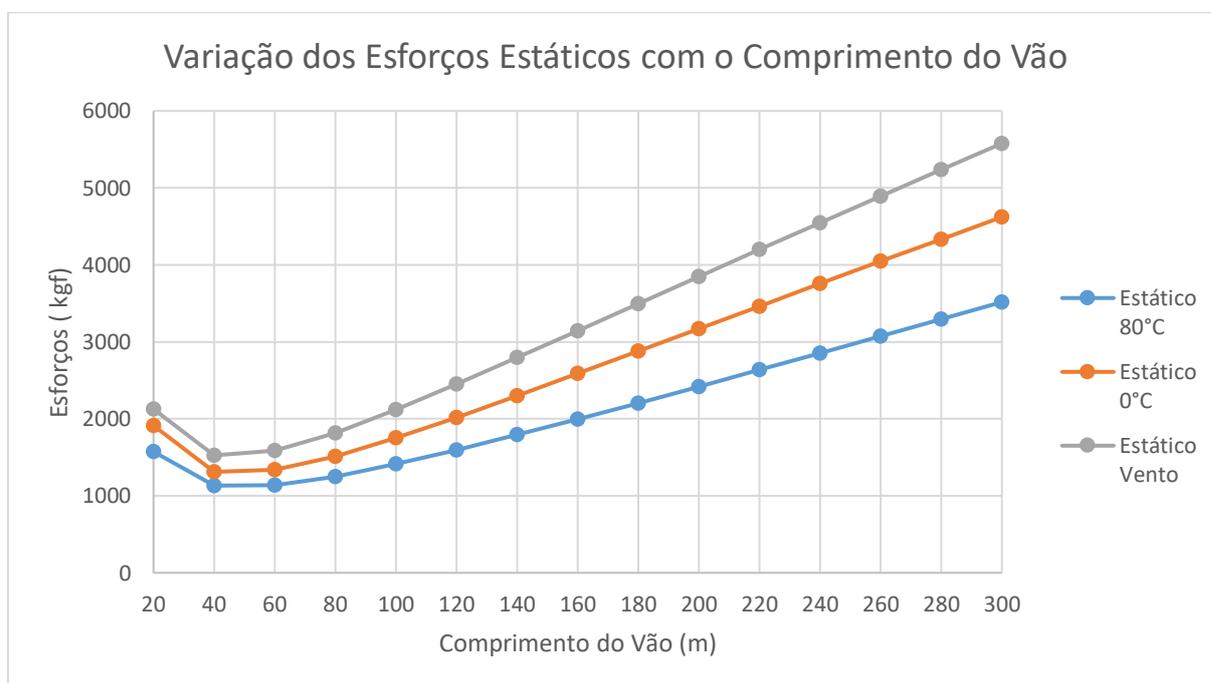


Figura 4.15 - Variação dos esforços dinâmicos com o comprimento do vão - Condutor Rail - 2 por fase.

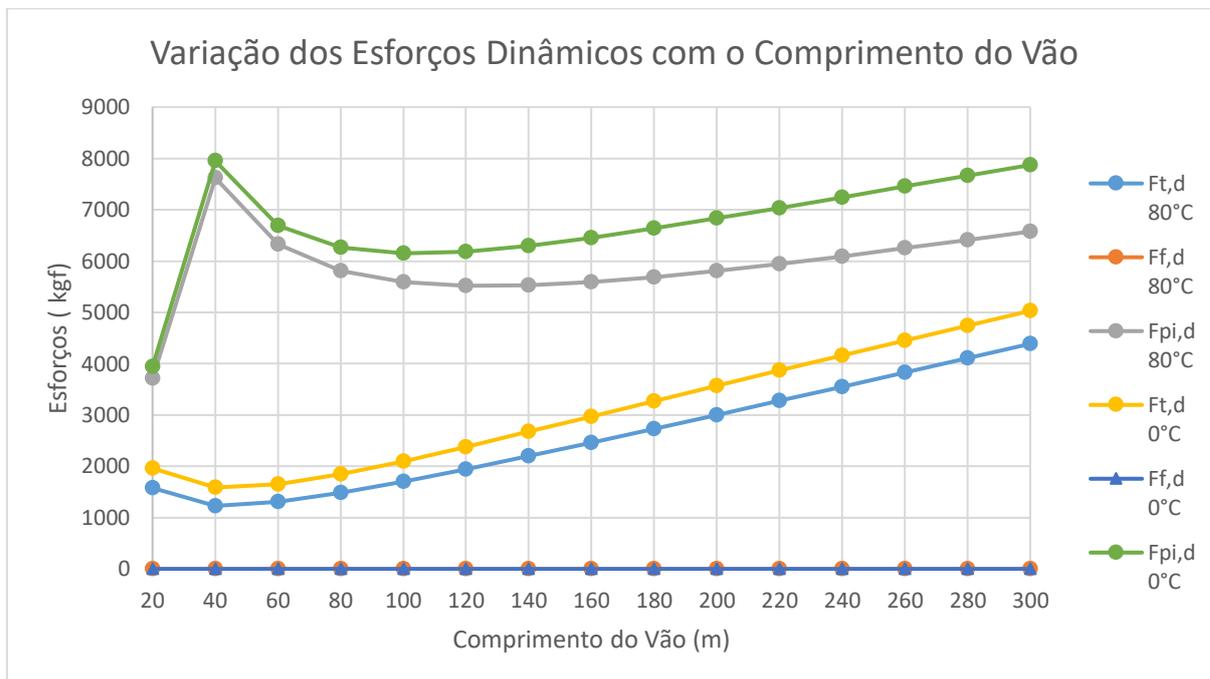


Tabela 4.15 - Esforços para variação do comprimento do vão - Condutor Oriole - 4 por fase.

Comprimento do Vão [m]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
20	4x Oriole	364	428	579	613	770	1503	647	850	1576
40	4x Oriole	517	638	935	1158	1707	1518	1257	1722	1655
60	4x Oriole	717	905	1356	1728	2641	1680	1907	2592	1889
80	4x Oriole	929	1182	1781	2306	3549	1874	2560	3448	2153
100	4x Oriole	1146	1462	2202	2885	4440	2082	3213	4272	2426
120	4x Oriole	1365	1742	2620	3465	5319	2296	3862	5044	2704
140	4x Oriole	1586	2022	3032	4044	6187	2514	4509	5771	2983
160	4x Oriole	1808	2300	3441	4623	7047	2734	5151	6462	3263
180	4x Oriole	2030	2579	3845	5199	7897	2956	5775	7122	3542
200	4x Oriole	2252	2856	4245	5774	8739	3178	6352	7755	3820
220	4x Oriole	2475	3133	4642	6348	9572	3401	6890	8366	4097
240	4x Oriole	2698	3408	5034	6918	10395	3625	7393	8955	4372
260	4x Oriole	2921	3683	5424	7487	11208	3848	7865	9524	4646
280	4x Oriole	3144	3957	5810	8052	12010	4071	8311	10073	4919
300	4x Oriole	3368	4229	6193	8614	12798	4294	8733	10602	5189

Figura 4.16 - Variação dos esforços estáticos com o comprimento do vão - Condutor Oriole - 4 por fase.

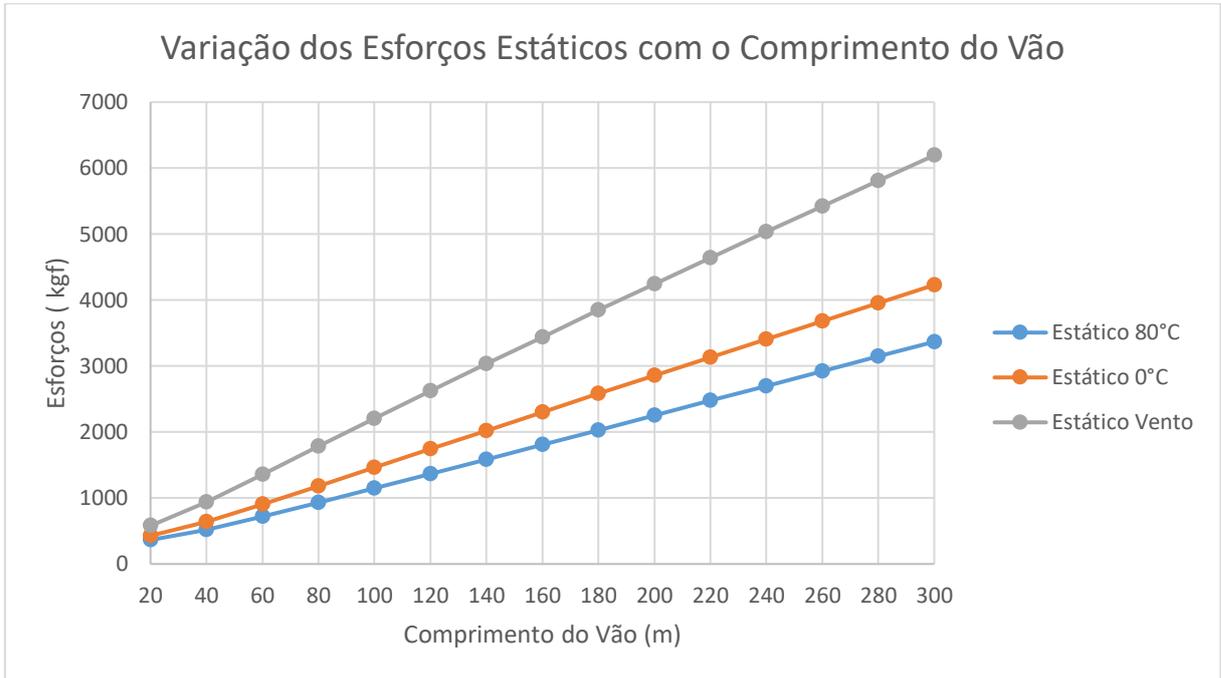


Figura 4.17 - Variação dos esforços dinâmicos com o comprimento do vão - Condutor Oriole - 4 por fase.

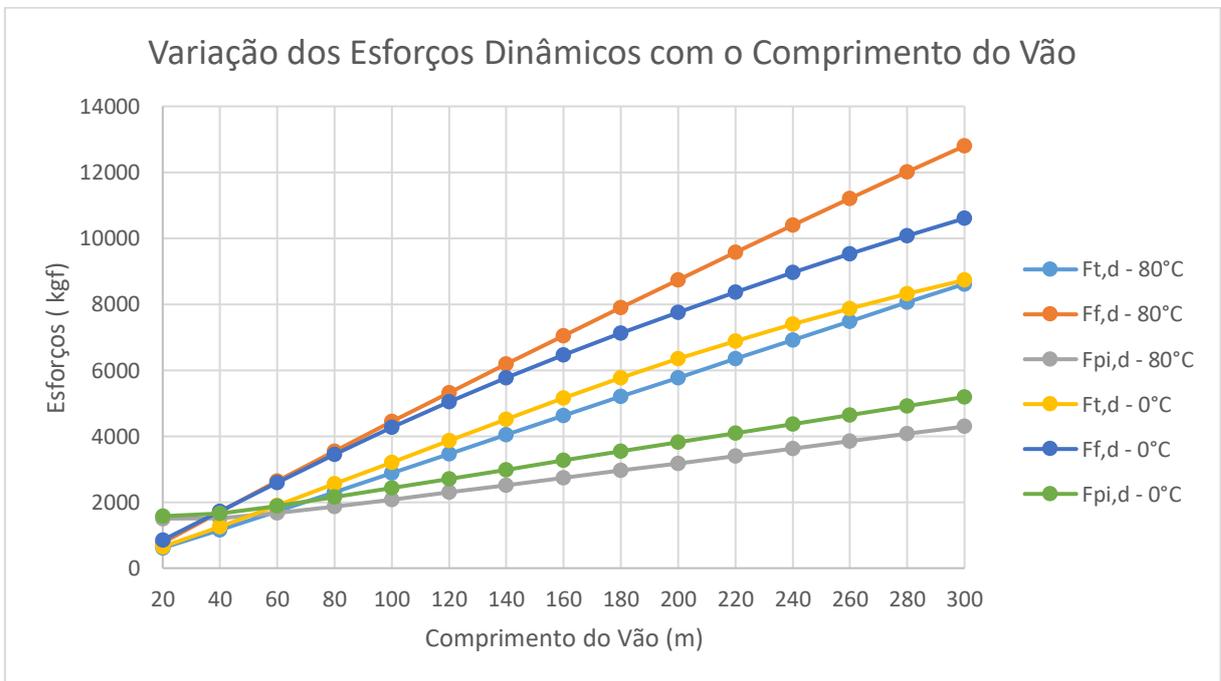


Tabela 4.16 - Esforços para variação do comprimento do vão - Condutor Oriole - 2 por fase.

Comprimento do Vão [m]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
20	2x Oriole	245	276	354	616	590	1038	608	661	1075
40	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	962	1203	1367	1024
60	2x Oriole	380	465	680	1737	2019	1010	1819	2000	1110
80	2x Oriole	481	600	892	2296	2686	1089	2439	2604	1227
100	2x Oriole	586	738	1103	2854	3329	1181	3056	3193	1355
120	2x Oriole	693	877	1312	3412	3956	1279	3667	3771	1487
140	2x Oriole	802	1016	1519	3967	4570	1381	4274	4339	1621
160	2x Oriole	912	1156	1723	4519	5172	1486	4874	4899	1756
180	2x Oriole	1022	1294	1925	5069	5765	1592	5468	5448	1891
200	2x Oriole	1132	1433	2126	5615	6347	1699	6055	5987	2026
220	2x Oriole	1243	1571	2324	6157	6918	1806	6635	6515	2160
240	2x Oriole	1354	1708	2520	6695	7479	1914	7206	7029	2294
260	2x Oriole	1465	1845	2715	7229	8028	2022	7767	7527	2426
280	2x Oriole	1577	1982	2908	7756	8565	2130	8307	8010	2558
300	2x Oriole	1688	2118	3099	8278	9087	2239	8801	8473	2689

Figura 4.18 - Variação dos esforços estáticos com o comprimento do vão - Condutor Oriole - 2 por fase.

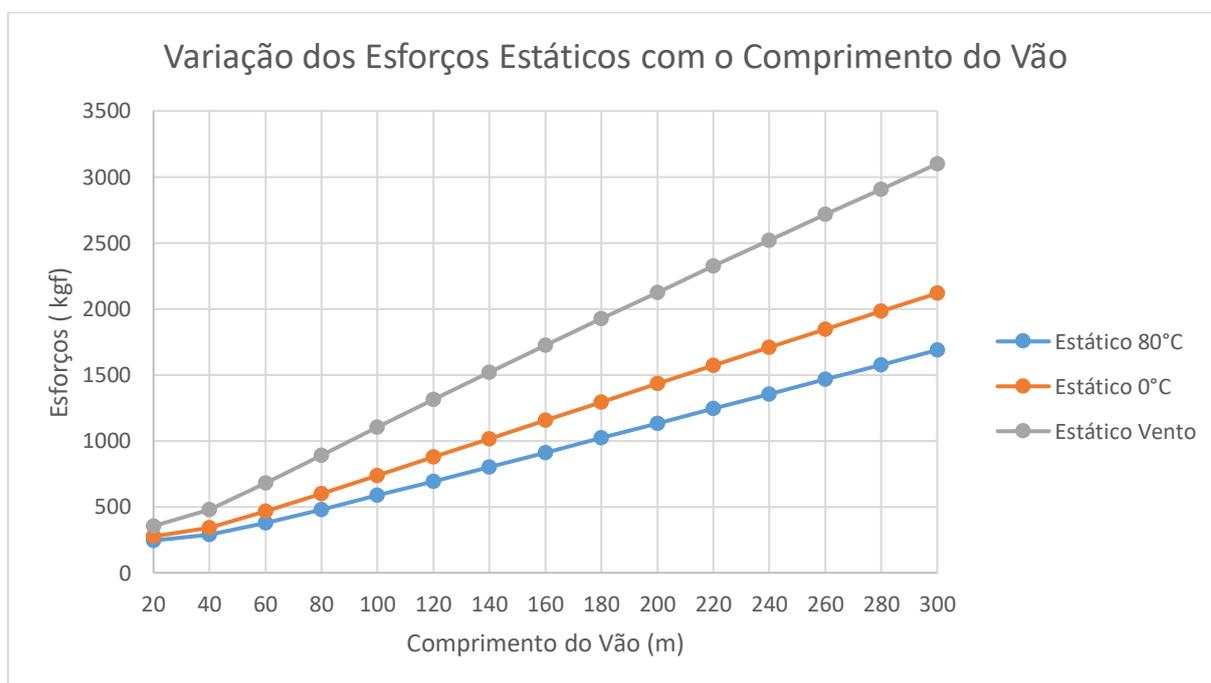
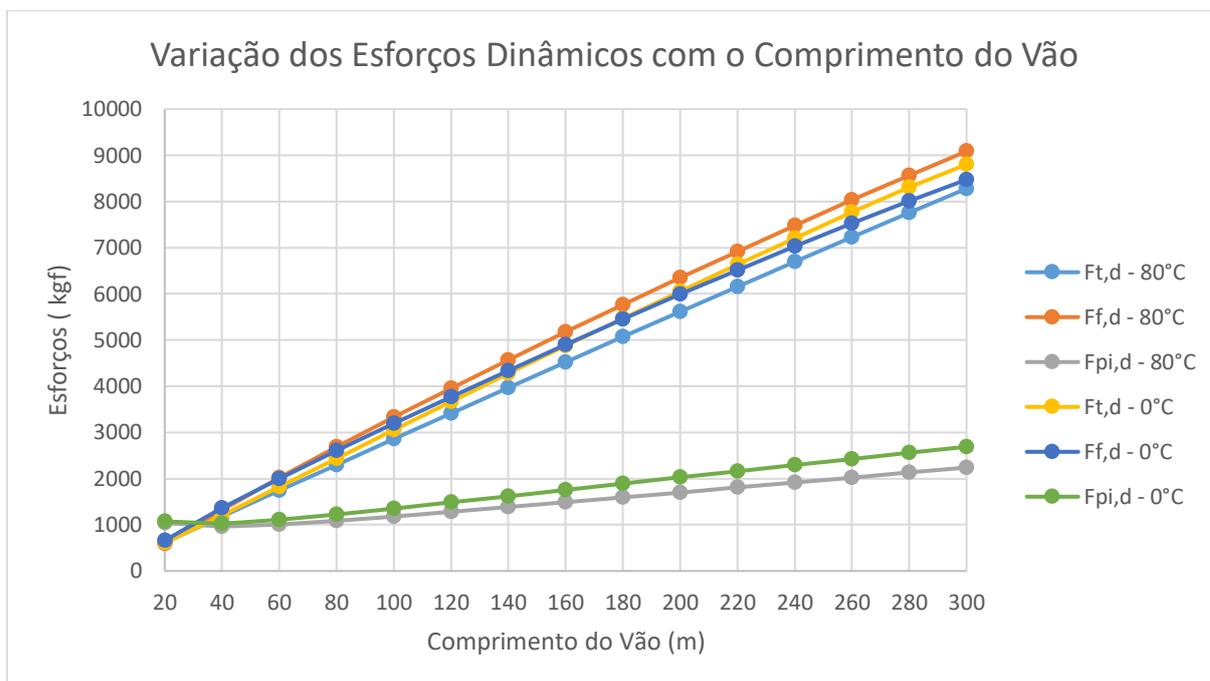


Figura 4.19 - Variação dos esforços dinâmicos com o comprimento do vão - Conductor Oriole - 2 por fase.



Nos casos com condutores Rail observa-se que, para os esforços estáticos nos vãos menores ocorre um efeito que contraria a expectativa. Esperava-se que à medida que o vão aumentasse os esforços estáticos aumentassem também. Este efeito se dá devido ao efeito das cadeias de isoladores e suas características. Ressalta-se que durante o trabalho na empresa de consultoria, constatou-se que algumas projetistas simplesmente ignoram o efeito das cadeias de isoladores nos vãos da subestação e calculam os esforços apenas para os condutores. Ainda com relação aos esforços estáticos, para os cabos mais leves observa-se uma influência maior do comprimento do vão no esforço calculado considerando a ação do vento.

Com relação aos esforços dinâmicos, para os condutores Rail, observa-se que, para o tempo de duração do curto-circuito utilizado o efeito da força $F_{f,d}$ é desconsiderado, de acordo com a metodologia da norma IEC 60865-1 [3]. A força $F_{t,d}$ acompanha o efeito observado para as forças estáticas. A força $F_{pi,d}$ apresenta um pico por volta dos 40 metros de comprimento do vão e depois é significativamente reduzida. A força de *pinch* para 40 metros de comprimento do vão é praticamente igual à força de *pinch* para um vão de 300 metros. Para o cabo Oriole observa-se que tanto $F_{t,d}$ quanto $F_{f,d}$ aumentam de acordo com o aumento do comprimento do vão. A força $F_{pi,d}$, apesar de aumentar, é bem menos influenciada pelo comprimento do vão. Ressalta-se que o número de espaçadores foi mantido constante para todos os casos analisados.

4.3.2 Variação do condutor utilizado

As análises foram realizadas considerando quatro condutores maiores e mais pesados por fase para o nível de tensão de 500 kV (diâmetro entre 27 mm até 45 mm) – conforme tabela 4.18 e 4.19 – e dois condutores menores e mais leves por fase para o nível de tensão de 138 kV (diâmetro entre 15 mm e 25,2 mm) - conforme Tabelas 4.20 e 4.21 – em vãos de 40 metros e 90 metros de comprimento.

Para análise dos esforços considerando a variação do condutor utilizado foram adotados os seguintes dados:

Tabela 4.17 - Dados utilizados para os cálculos - Variação do condutor utilizado.

		Condutor 500 kV	Condutor 138 kV
Cadeia de isoladores	Peso (P_i)	300 [kg]	65 [kg]
	Número	2	1
	Comprimento (S_i)	6 [m]	2,75 [m]
Vão	Flecha (%)	3,5%	3,5%
Vento	Fator S_1	1,0	1,0
	Fator S_2	1,0058	1,0058
	Fator S_3	1,1	1,1
	V_0	25 [m/s]	25 [m/s]
Curto-Circuito	Constante de Spring (S)	650000 [N/m]	75000 [N/m]
	Corrente de curto-circuito (I)	63 [kA]	31,5 [kA]
	Distância entre os subcondutores (as)	0,457 [m]	0,20 [m]
	Distância entre fases (a)	8 [m]	3 [m]
	Fator de assimetria (k)	1,81	1,81
	Tempo para eliminação do curto-circuito (T_k)	0,1 [s]	0,75 [s]
	Número de espaçadores	3	3

Tabela 4.18 - Esforços para variação do condutor utilizado - 4 Condutores por fase - Vão de 40 metros.

Diâmetro do Condutor [m]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
0,0270	4x Tern	1463	1754	2103	1515	0	11305	1997	0	11812
0,0277	4x Condor	1580	1881	2223	1625	0	11520	2081	0	12018
0,0287	4x Ruddy	1572	1904	2257	1617	0	11416	2108	0	11961
0,0295	4x Canary	1705	2049	2394	1743	0	11723	2217	0	12263
0,0296	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	11531	2169	0	12098
0,0331	4x Bunting	1875	2327	2683	1907	0	11974	2465	0	12638
0,0340	4x Grackle	2049	2524	2865	2076	0	12505	2637	0	13182
0,0342	4x Bittern	1958	2443	2797	1987	0	12215	2569	0	12915
0,0351	4x Pheasant	2144	2654	2991	2168	0	12554	2757	0	13265
0,0352	4x Dipper	2040	2561	2911	2067	0	12423	2676	0	13159
0,0362	4x Martin	2237	2783	3116	2259	0	12670	2878	0	13417
0,0362	4x Bobolink	2123	2678	3023	2148	0	12501	2784	0	13271
0,0441	4x Kiwi	2759	3651	3938	2774	0	13244	3715	0	10475
0,0448	4x Bluebird	2949	3853	4125	2964	0	9930	3910	0	10234
0,0458	4x Thrasher	2964	3936	4198	2978	0	9923	3992	0	10251

Figura 4.20 - Variação dos esforços estáticos com o condutor utilizado - 4 condutores por fase - vão 40 metros.

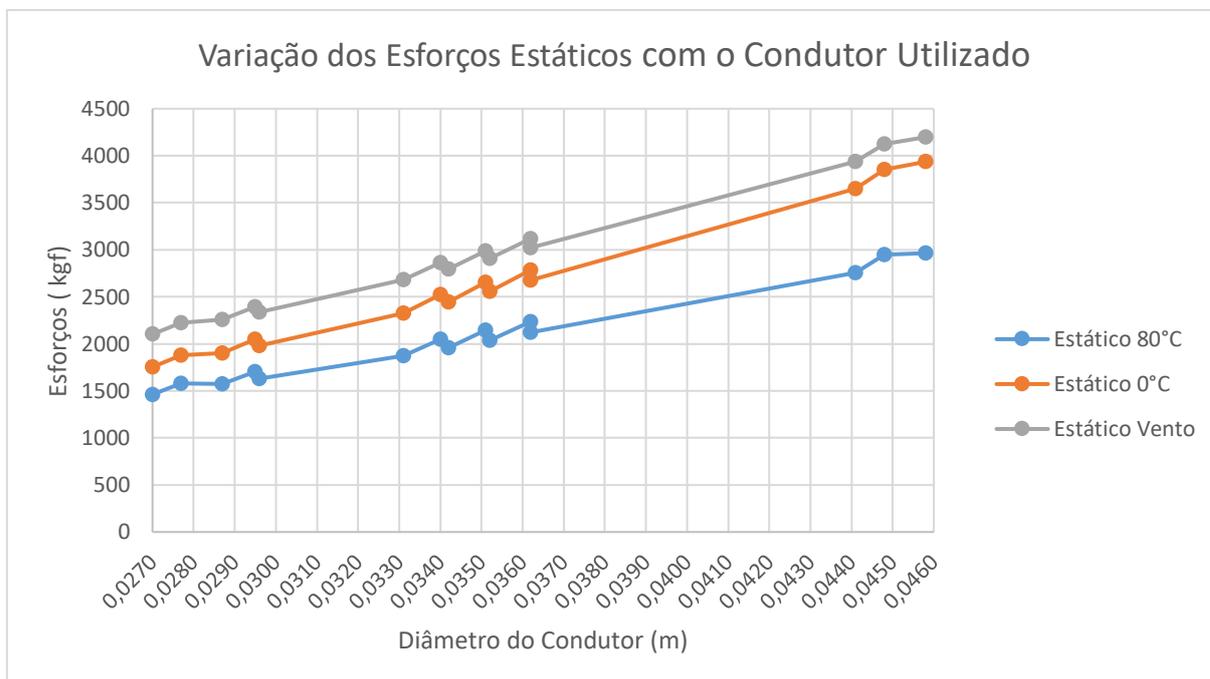


Figura 4.21 - Variação dos esforços dinâmicos com o condutor utilizado- 4 condutores por fase - vão 90 metros.

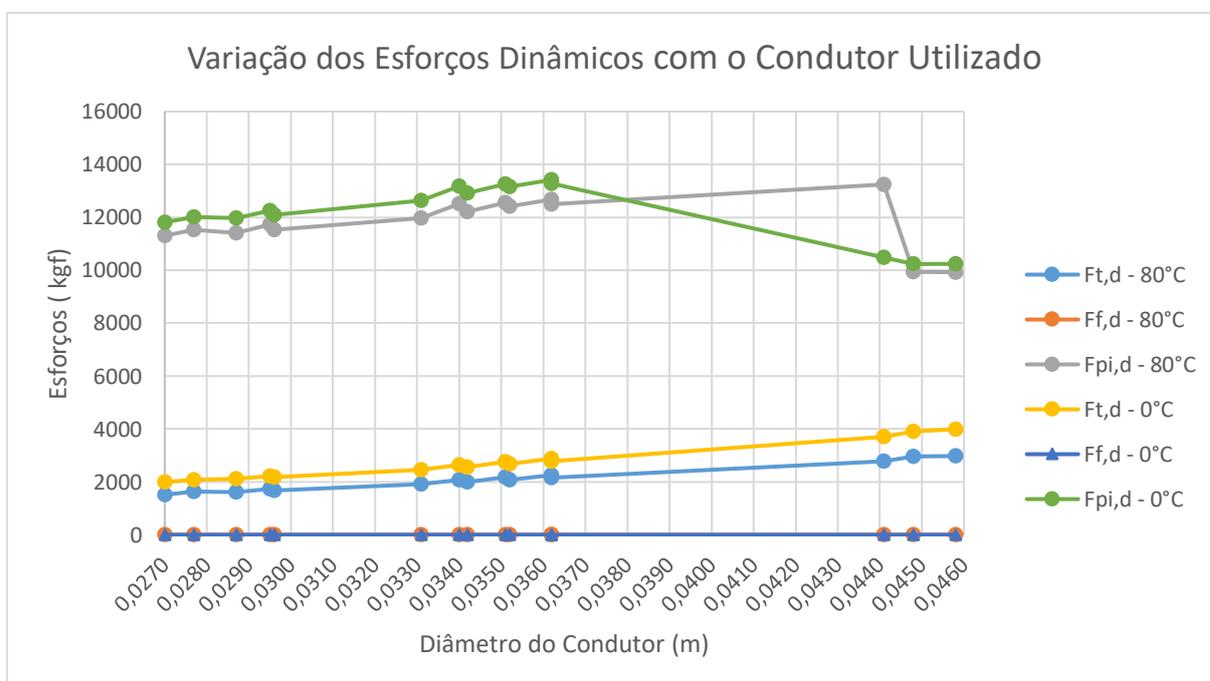


Tabela 4.19 - Esforços para variação do condutor utilizado- 4 condutores por fase - vão 90 metros.

Diâmetro do Condutor [m]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
0,0270	4x Tern	2024	2593	3254	2168	0	9131	2847	0	10052
0,0277	4x Condor	2272	2865	3493	2395	0	9623	3077	0	10543
0,0287	4x Ruddy	2254	2915	3575	2379	0	9483	3134	0	10499
0,0295	4x Canary	2535	3222	3846	2642	0	10062	3405	0	11079
0,0296	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	9699	3285	0	10766
0,0331	4x Bunting	2894	3813	4450	2984	0	10575	3970	0	11857
0,0340	4x Grackle	3261	4220	4806	3338	0	11367	4351	0	12668
0,0342	4x Bittern	3068	4056	4683	3151	0	10927	4202	0	12282
0,0351	4x Pheasant	3460	4490	5061	3532	0	11589	4612	0	12958
0,0352	4x Dipper	3242	4301	4912	3320	0	11252	4437	0	12680
0,0362	4x Martin	3656	4758	5314	3723	0	11856	4870	0	13295
0,0362	4x Bobolink	3416	4544	5140	3489	0	11473	4671	0	12970
0,0441	4x Kiwi	4757	6536	6982	4805	0	13149	6619	0	15313
0,0448	4x Bluebird	5159	6943	7351	5203	0	13667	7016	0	15803
0,0458	4x Thrasher	5191	7109	7499	5234	0	13609	7182	0	15902

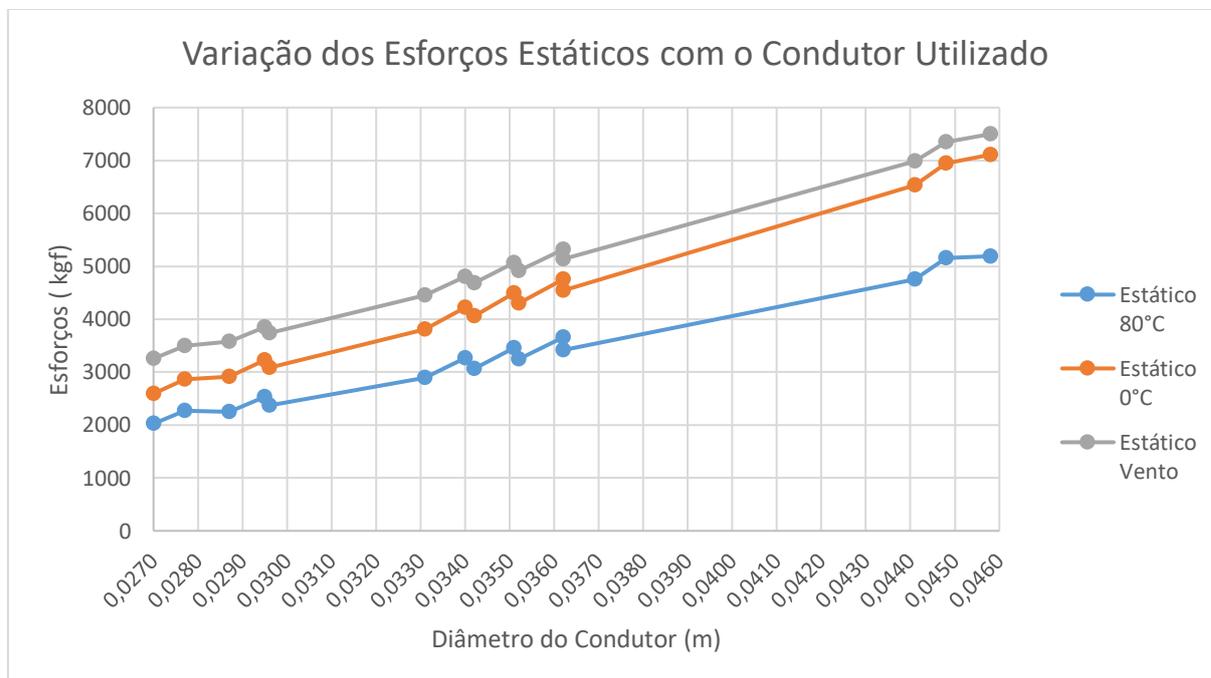
Figura 4.22 - Variação dos esforços estáticos com o condutor utilizado- 4 condutores por fase - vão 90 metros.

Figura 4.23 - Variação dos esforços dinâmicos com o condutor utilizado - 4 condutores por fase - vão 90 metros.

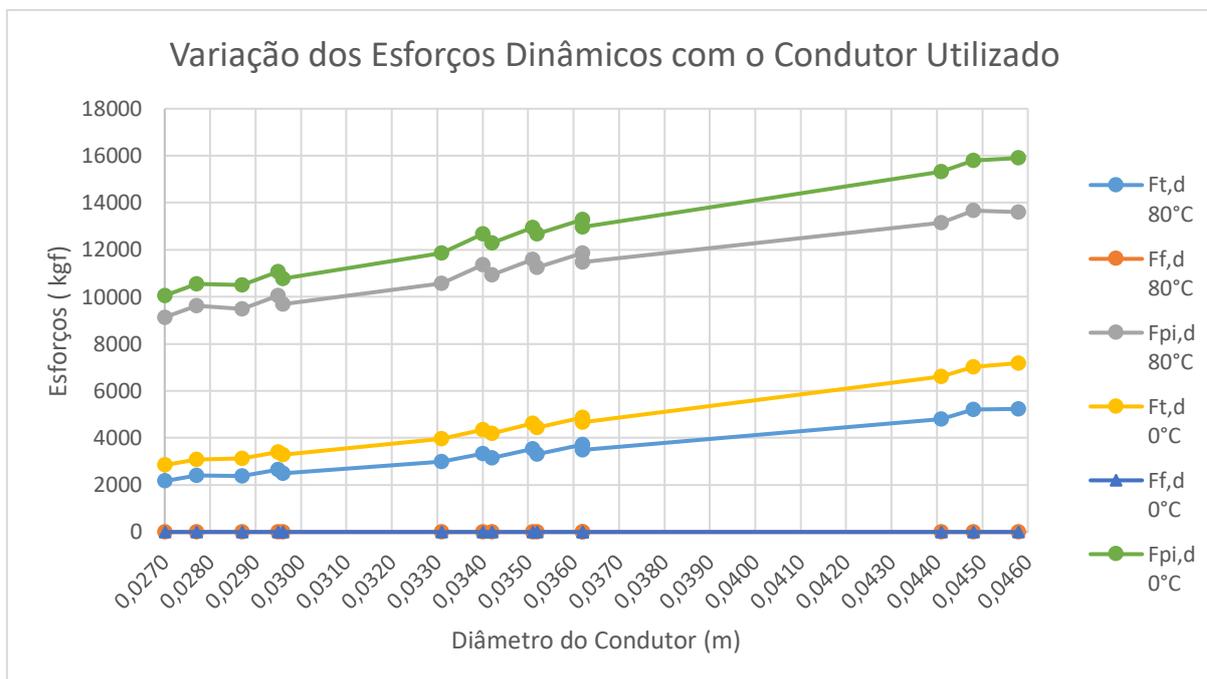


Tabela 4.20 - Esforços para variação do condutor utilizado - 2 condutores por fase - vão 40 metros.

Diâmetro do Condutor [m]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
0,0155	2x Waxwing	188	219	341	1213	843	858	1204	948	899
0,0163	2x Partridge	221	257	383	1202	1012	919	1202	1101	965
0,0173	2x Ostrich	241	283	416	1196	1104	941	1205	1179	993
0,0174	2x Merlin	221	263	401	1203	1008	914	1211	1087	968
0,0183	2x Linnet	262	311	450	1189	1199	953	1207	1260	1012
0,0188	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	962	1203	1367	1024
0,0215	2x Flicker	328	402	560	1170	1464	980	1219	1482	1065
0,0218	2x Hawk	346	422	558	1167	1531	992	1219	1545	1079
0,0223	2x Osprey	323	407	552	1172	1448	975	1230	1456	1071
0,0224	2x Hen	385	465	597	1160	1639	1018	1216	1569	1108
0,0232	2x Parakeet	372	462	604	1162	1625	1005	1228	1552	1106
0,0239	2x Kingbird	361	460	610	1164	1587	996	1239	1547	1108
0,0242	2x Duck	399	496	640	1156	1620	1023	1230	1562	1131
0,0248	2x Rook	416	522	667	1157	1631	1044	1240	1583	1162
0,0252	2x Grosbeak	440	549	691	1156	1645	1073	1242	1615	1193

Figura 4.24 - Variação dos esforços estáticos com o condutor utilizado - 2 condutores por fase - vão 40 metros.

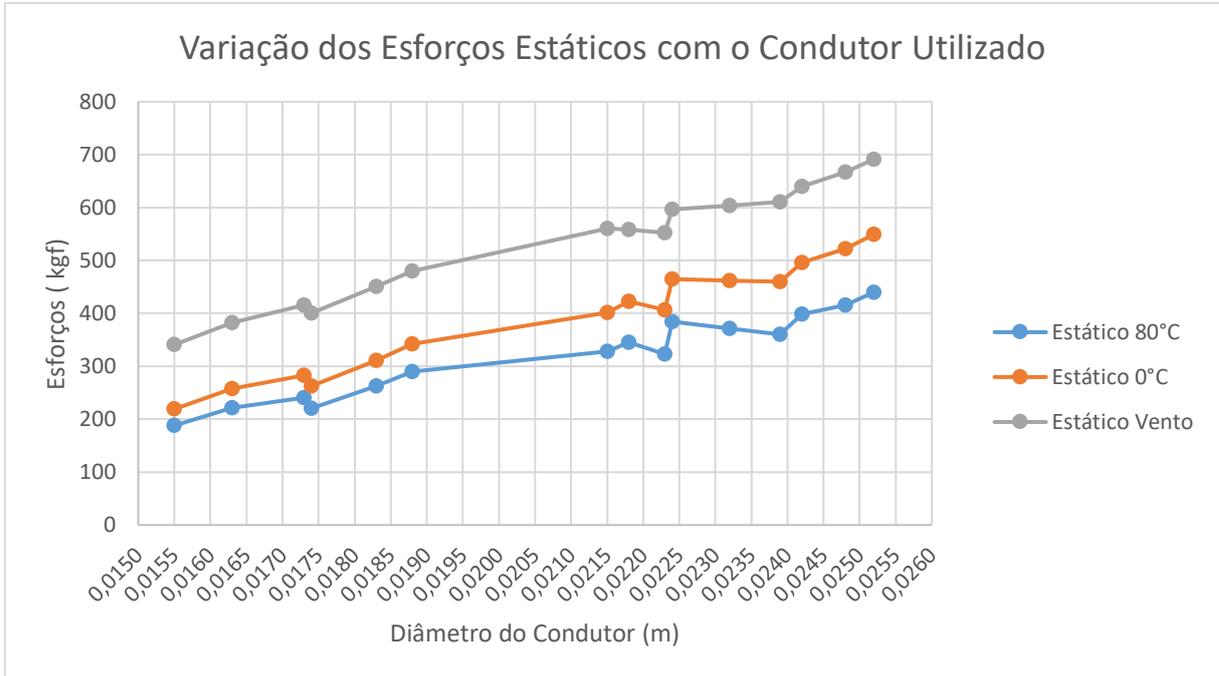


Figura 4.25 - Variação dos esforços dinâmicos com o condutor utilizado - 2 condutores por fase - vão 40 metros.

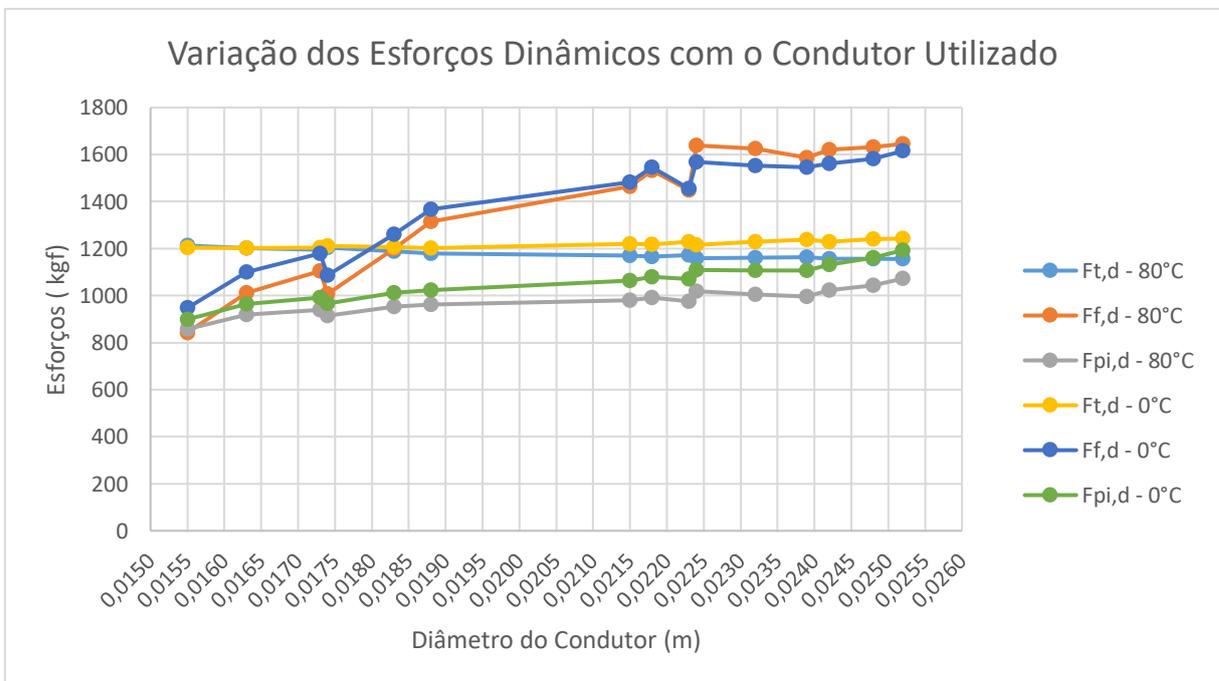


Tabela 4.21 - Esforços para variação do condutor utilizado - 2 condutores por fase - vão 90 metros.

Diâmetro do Condutor [m]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
0,0155	2x Waxwing	305	398	727	2549	1953	866	2691	1925	984
0,0163	2x Partridge	380	482	802	2570	2336	981	2714	2285	1106
0,0173	2x Ostrich	423	540	872	2574	2541	1034	2735	2463	1174
0,0174	2x Merlin	378	501	858	2567	2322	973	2745	2237	1124
0,0183	2x Linnet	471	604	945	2576	2753	1081	2753	2649	1237
0,0188	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1134	2748	2900	1290
0,0215	2x Flicker	617	809	1178	2573	3339	1207	2805	3153	1422
0,0218	2x Hawk	656	852	1158	2574	3492	1246	2805	3303	1463
0,0223	2x Osprey	606	827	1163	2574	3302	1195	2839	3082	1441
0,0224	2x Hen	743	942	1232	2573	3800	1328	2798	3610	1546
0,0232	2x Parakeet	714	942	1258	2573	3697	1296	2832	3472	1546
0,0239	2x Kingbird	690	945	1285	2573	3610	1271	2865	3353	1551
0,0242	2x Duck	774	1014	1331	2566	3876	1349	2831	3645	1612
0,0248	2x Rook	812	1074	1390	2575	3929	1396	2861	3615	1680
0,0252	2x Grosbeak	866	1132	1439	2579	3906	1457	2864	3658	1745

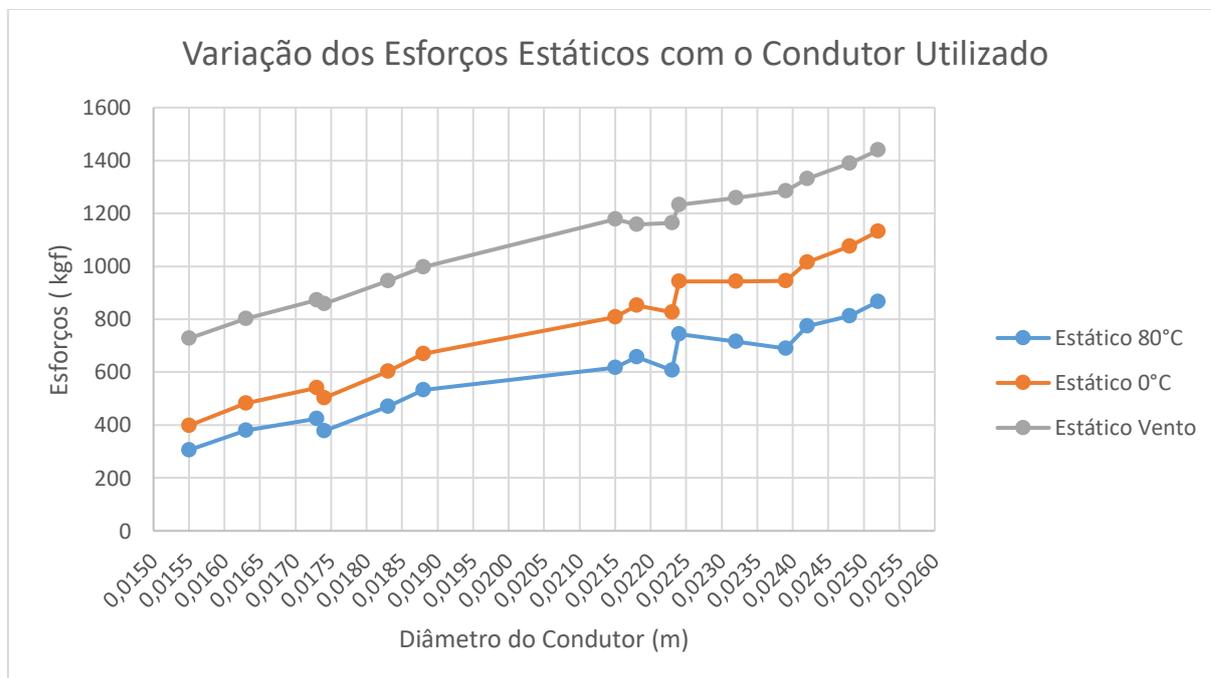
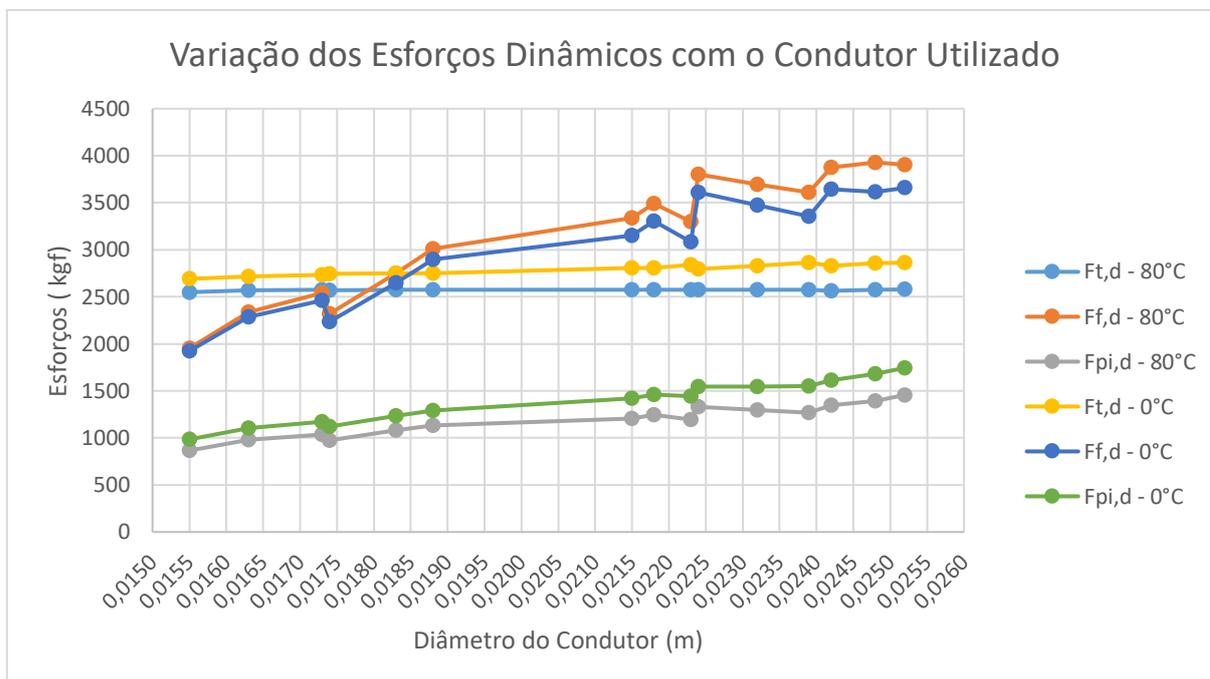
Figura 4.26 - Variação dos esforços estáticos com o condutor utilizado - 2 condutores por fase - vão 90 metros.

Figura 4.27 - Variação dos esforços dinâmicos com o condutor utilizado - 2 condutores por fase - vão 90 metros.



A alteração dos condutores utilizados altera os esforços dinâmicos e estáticos. Com relação aos estáticos, quanto maior o diâmetro e massa do condutor utilizados, maiores são os esforços de tração.

Para os esforços dinâmicos, nos vãos em 500 kV, tanto a força $F_{t,d}$ quanto a força $F_{pi,d}$ são muito afetadas pela variação do condutor utilizado sendo que, para o vão menor, o efeito da variação do condutor é bem menos pronunciado. Para os vãos em 138 kV, também há alteração destas forças, mas o efeito é bem menor: no vão de 90 metros, por exemplo, as forças $F_{t,d}$ para a máxima e mínima temperatura praticamente não se alteram. A força de *drop-back*, no entanto, sofre considerável alteração com a mudança dos condutores, quando satisfeitas as condições para seu cálculo. Isto se deve ao fato desta força considerar a tração à qual a estrutura é solicitada quando o condutor volta à posição inicial após a passagem da corrente de curto-circuito.

4.3.3 Variação do valor da flecha adotada

Para análise dos esforços considerando a variação da flecha adotada considerou-se um vão menor (40 metros) e um maior (90 metros) para os condutores Rail e Oriole. Os outros dados considerados permanecem constantes para as análises que seguem e são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 4.22 - Dados utilizados para os cálculos - Variação da flecha adotada.

		Condutor Rail	Condutor Oriole
Cadeia de isoladores	Peso (P_i)	300 [kg]	65 [kg]
	Número	2	1
	Comprimento (S_i)	6 [m]	2,75 [m]
Vão	Comprimento (V)	40/90 [m]	40/90 [m]
Vento	Fator S_1	1,0	1,0
	Fator S_2	1,0058	1,0058
	Fator S_3	1,1	1,1
	V_0	25 [m/s]	25 [m/s]
Curto-Circuito	Constante de Spring (S)	650000 [N/m]	75000 [N/m]
	Corrente de curto-circuito (I)	63 [kA]	31,5 [kA]
	Distância entre os subcondutores (as)	0,457 [m]	0,20 [m]
	Distância entre fases (a)	8 [m]	3 [m]
	Fator de assimetria (k)	1,81	1,81
	Tempo para eliminação do curto-circuito (T_k)	0,1 [s]	0,75 [s]
	Número de espaçadores	3	3

Tabela 4.23 - Esforços para variação do valor adotado de flecha - 4 Condutores Rail por fase - Vão 40 metros.

Flecha [%]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
2,5	4x Rail	2273	3588	3751	2311	0	12549	3802	0	14456
2,7	4x Rail	2106	3057	3333	2146	0	12292	3274	0	13708
2,9	4x Rail	1962	2675	3005	2003	0	12067	2891	0	13154
3,1	4x Rail	1836	2388	2740	1878	0	11868	2597	0	12725
3,3	4x Rail	1726	2163	2521	1768	0	11690	2362	0	12381
3,5	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	11531	2169	0	12098
3,7	4x Rail	1541	1831	2180	1582	0	11388	2008	0	11859
3,9	4x Rail	1462	1704	2044	1503	0	11258	1869	0	11655
4,1	4x Rail	1391	1595	1925	1431	0	11139	1749	0	11477
4,3	4x Rail	1327	1500	1820	1366	0	11030	1644	0	11321
4,5	4x Rail	1268	1417	1726	1307	0	10931	1552	0	11183
4,7	4x Rail	1215	1344	1643	1252	0	10839	1469	0	11059
4,9	4x Rail	1165	1278	1567	1202	0	10754	1395	0	10947
5,1	4x Rail	1120	1219	1498	1156	0	10675	1328	0	10846
5,3	4x Rail	1078	1165	1435	1113	0	10601	1267	0	10754

Figura 4.28 - Variação dos esforços estáticos com o valor adotado de flecha- 4 Condutores Rail por fase - Vão 40 metros.

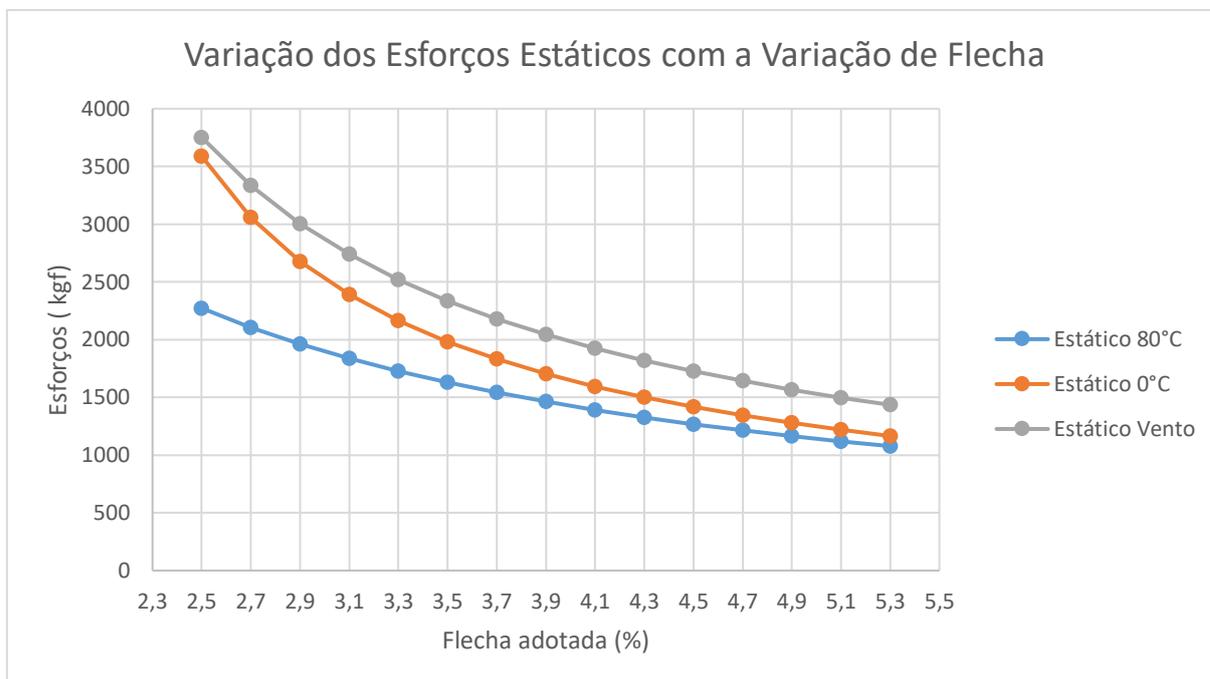


Figura 4.29 - Variação dos esforços dinâmicos com o valor adotado de flecha - 4 Condutores Rail por fase -Vão 40 metros.

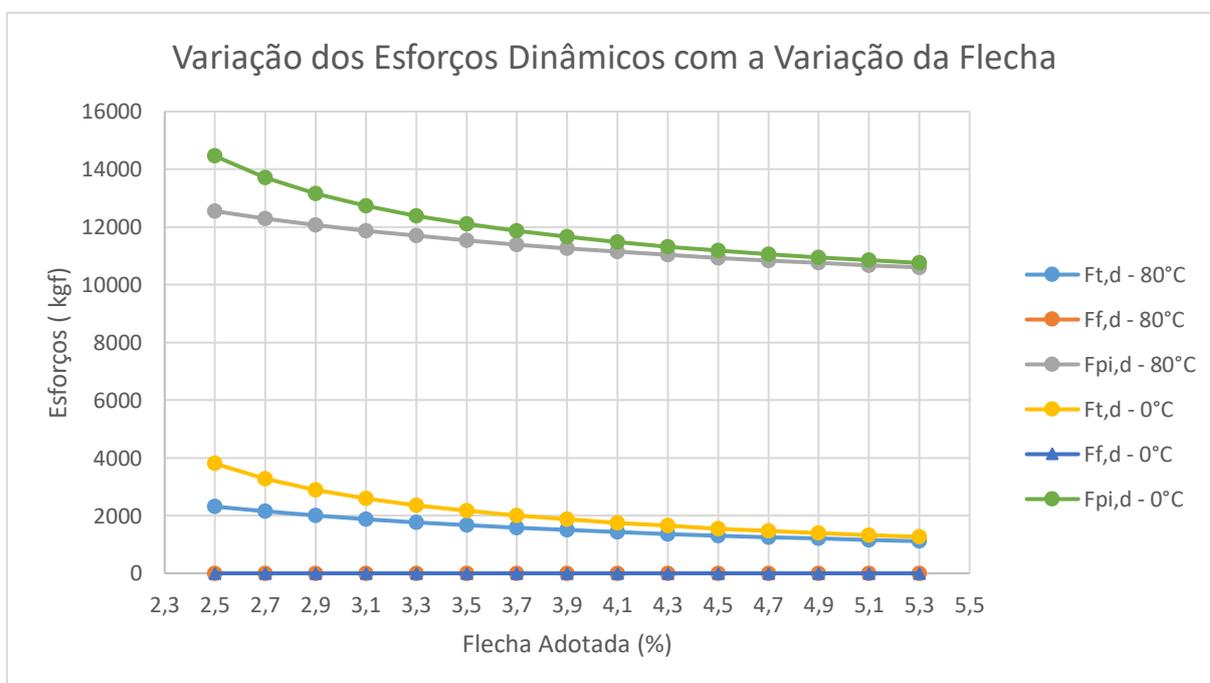


Tabela 4.24 - Esforços para variação do valor adotado de flecha - 4 Condutores Rail por fase -vão 90 metros.

Flecha [%]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
2,5	4x Rail	3317	6076	6129	3451	0	11110	6408	0	14787
2,7	4x Rail	3072	5065	5429	3204	0	10754	5382	0	13501
2,9	4x Rail	2861	4341	4872	2989	0	10442	4631	0	12540
3,1	4x Rail	2677	3808	4422	2802	0	10166	4067	0	11806
3,3	4x Rail	2515	3401	4051	2636	0	9920	3632	0	11230
3,5	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	9699	3285	0	10766
3,7	4x Rail	2244	2821	3477	2357	0	9500	3003	0	10382
3,9	4x Rail	2130	2606	3251	2238	0	9320	2769	0	10058
4,1	4x Rail	2026	2425	3054	2131	0	9155	2571	0	9781
4,3	4x Rail	1932	2270	2880	2033	0	9004	2401	0	9540
4,5	4x Rail	1846	2135	2727	1944	0	8866	2254	0	9329
4,7	4x Rail	1768	2017	2590	1862	0	8738	2125	0	9141
4,9	4x Rail	1696	1913	2467	1787	0	8620	2011	0	8973
5,1	4x Rail	1630	1819	2355	1718	0	8510	1909	0	8822
5,3	4x Rail	1568	1735	2254	1654	0	8408	1818	0	8685

Figura 4.30 - Variação dos esforços estáticos com o valor adotado de flecha - 4 Condutores Rail por fase -vão 90 metros.

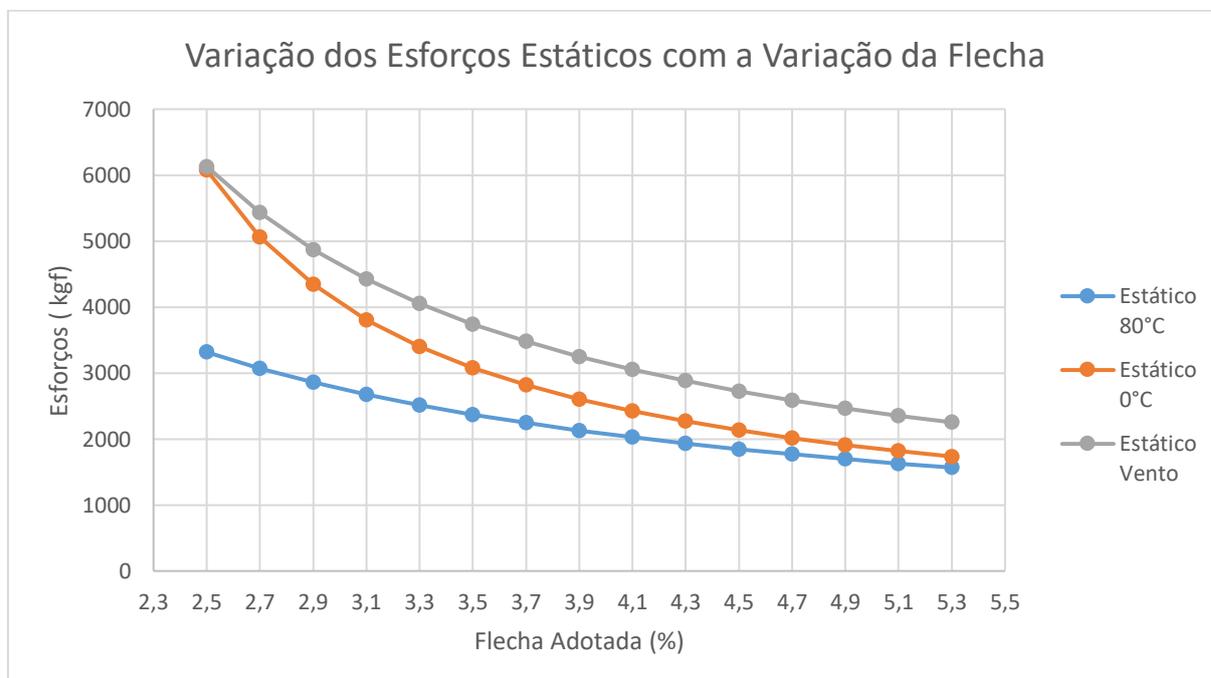


Figura 4.31 - Variação dos esforços dinâmicos com o valor adotado de flecha - 4 Condutores Rail por fase -vão 90 metros.

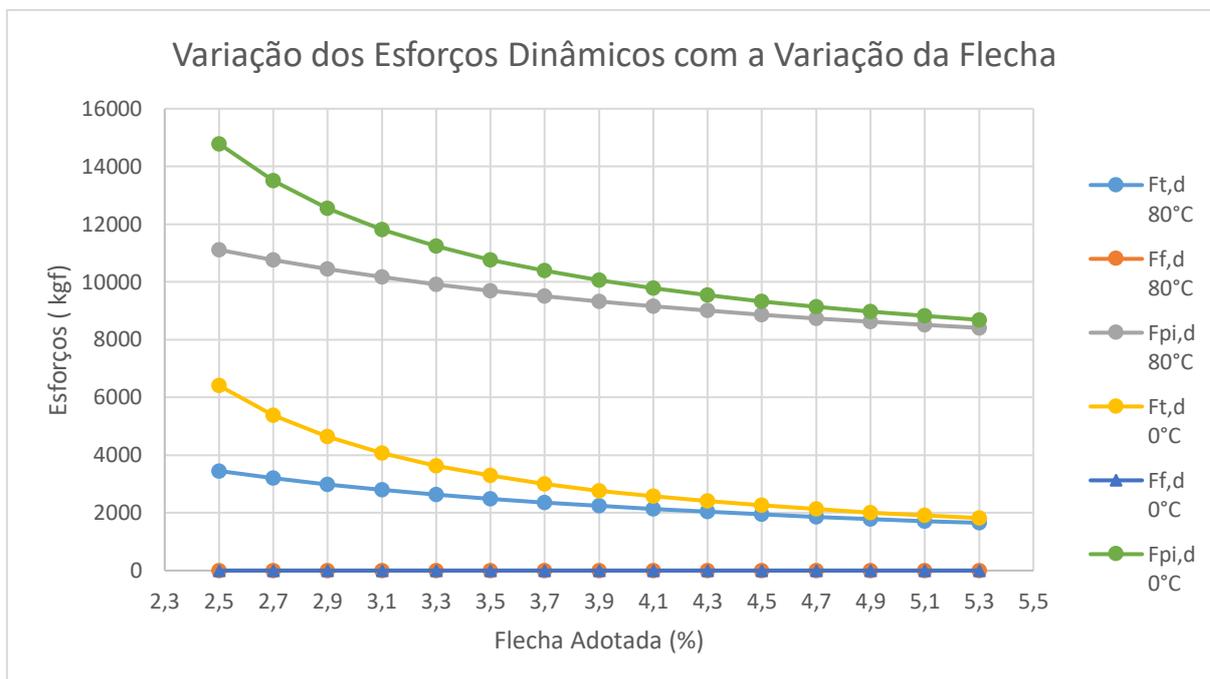


Tabela 4.25 - Esforços para variação do valor adotado de flecha - 2 Condutores Oriole por fase -vão 40 metros.

Flecha [%]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
2,5	2x Oriole	405	589	749	1302	1188	1097	1411	1235	1307
2,7	2x Oriole	375	510	671	1275	1210	1063	1356	1243	1218
2,9	2x Oriole	350	452	610	1250	1235	1033	1310	1267	1151
3,1	2x Oriole	327	407	559	1226	1260	1006	1270	1297	1100
3,3	2x Oriole	308	371	516	1202	1287	983	1235	1331	1058
3,5	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	962	1203	1367	1024
3,7	2x Oriole	275	317	449	1157	1341	944	1172	1403	995
3,9	2x Oriole	261	296	422	1136	1369	927	1143	1438	970
4,1	2x Oriole	248	278	399	1115	1396	912	1116	1474	948
4,3	2x Oriole	236	262	377	1094	1424	898	1089	1509	929
4,5	2x Oriole	226	248	358	1074	1451	885	1064	1544	912
4,7	2x Oriole	216	236	341	1054	1477	873	1039	1577	897
4,9	2x Oriole	208	225	326	1034	1504	863	1015	1611	883
5,1	2x Oriole	200	214	312	1015	1530	853	992	1643	871
5,3	2x Oriole	192	205	299	996	1556	844	970	1675	860

Figura 4.32 - Variação dos esforços estáticos com o valor adotado de flecha - 2 Condutores Oriole por fase -vão 40 metros.

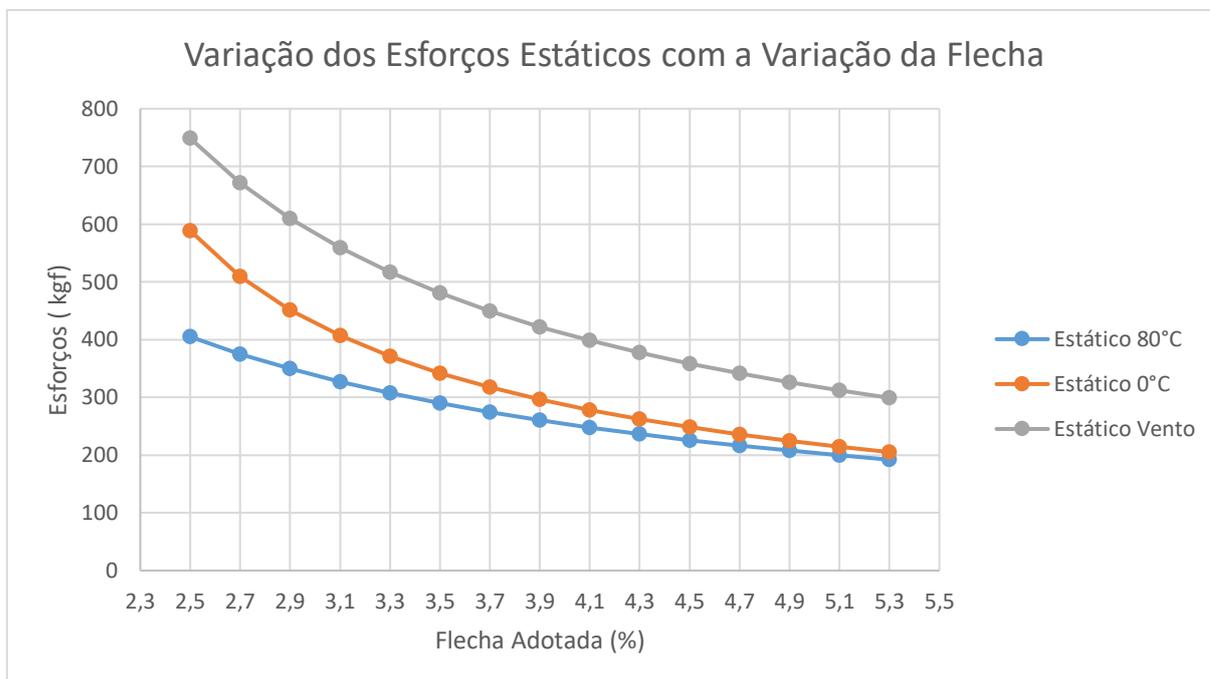


Figura 4.33 - Variação dos esforços dinâmicos com o valor adotado de flecha - 2 Condutores Oriole por fase -vão 40 metros.

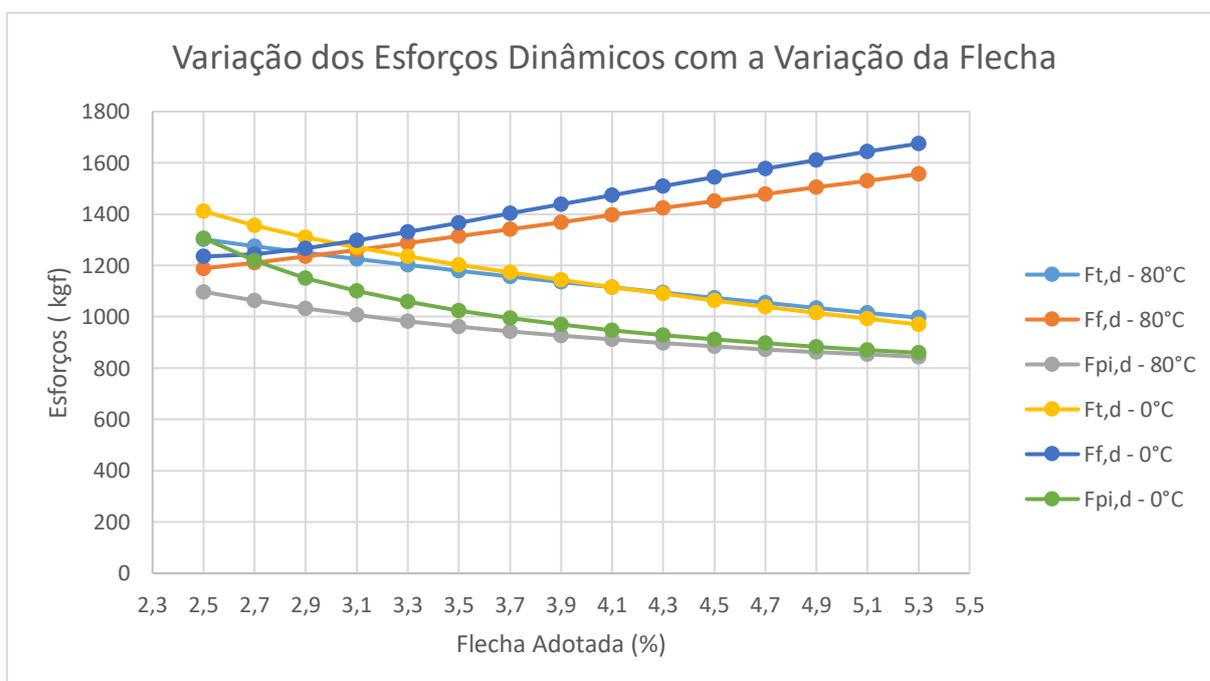


Tabela 4.26 - Esforços para variação do valor adotado de flecha - 2 Condutores Oriole por fase -Vão 90 metros.

Flecha [%]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
2,5	2x Oriole	745	1247	1556	2879	2696	1377	3277	2595	1929
2,7	2x Oriole	690	1057	1400	2814	2757	1314	3138	2610	1723
2,9	2x Oriole	643	919	1271	2751	2820	1260	3022	2665	1571
3,1	2x Oriole	601	815	1164	2691	2883	1213	2921	2738	1455
3,3	2x Oriole	565	734	1074	2632	2947	1171	2831	2818	1364
3,5	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1134	2748	2900	1290
3,7	2x Oriole	504	615	931	2520	3073	1101	2671	2982	1229
3,9	2x Oriole	478	571	874	2466	3135	1070	2598	3062	1178
4,1	2x Oriole	455	533	823	2413	3197	1043	2529	3141	1134
4,3	2x Oriole	434	500	778	2361	3257	1018	2463	3217	1096
4,5	2x Oriole	415	471	738	2311	3317	995	2399	3291	1062
4,7	2x Oriole	397	446	702	2262	3376	974	2338	3364	1032
4,9	2x Oriole	381	424	670	2213	3434	955	2280	3434	1006
5,1	2x Oriole	366	403	640	2166	3491	937	2223	3503	982
5,3	2x Oriole	352	385	613	2121	3548	920	2169	3570	960

Figura 4.34 - Variação dos esforços estáticos com o valor adotado de flecha - 2 Condutores Oriole por fase -Vão 90 metros.

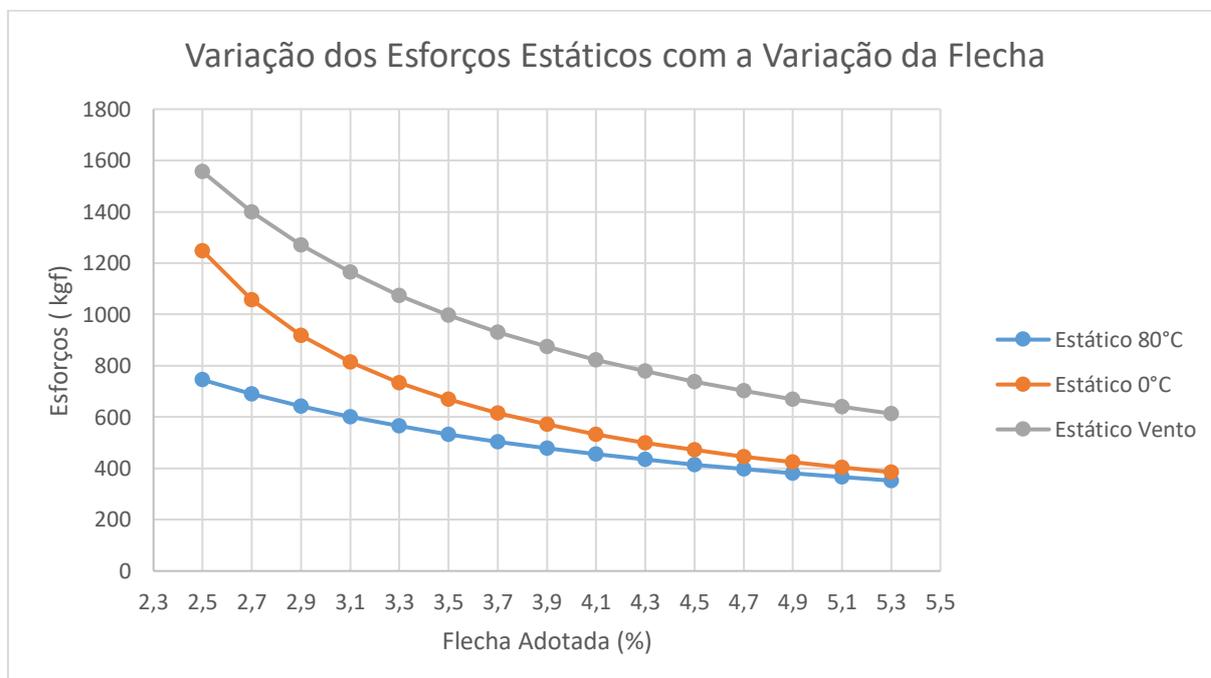
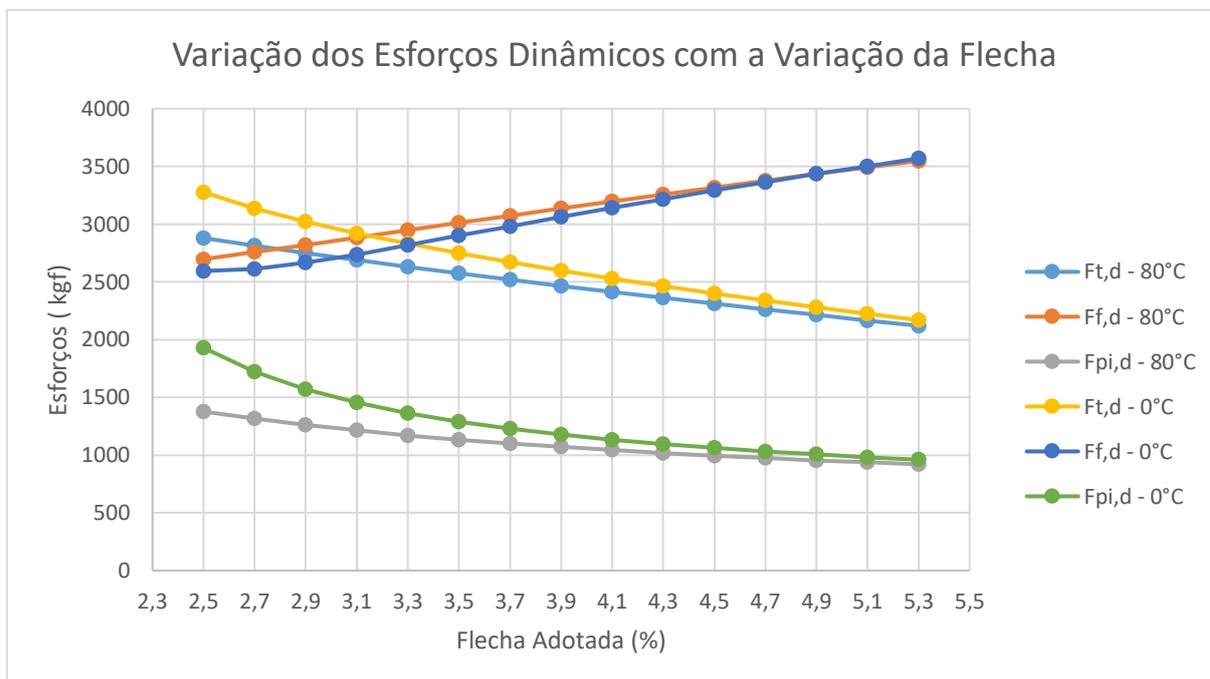


Figura 4.35 - Variação dos esforços dinâmicos com o valor adotado de flecha - 2 Condutores Oriole por fase - Vão 90 metros.



Observa-se que os esforços estáticos são influenciados consideravelmente pelo valor adotado de flecha sendo que, para as menores flechas analisadas, há uma elevação considerável dos valores de esforços estáticos para a temperatura mínima adotada de 0°C. Pelo gráfico é possível notar que para flechas menores os esforços à temperatura mínima ultrapassariam os esforços considerando o vento máximo, tornando-se, portanto, os mais críticos para o projeto das estruturas.

Com relação aos esforços dinâmicos, observa-se uma redução dos valores de $F_{t,d}$ e $F_{pi,d}$ com a redução dos valores dos esforços estáticos, o que é natural, uma vez que há uma dependência direta dos valores dos esforços estáticos. Entretanto, observa-se que o valor de $F_{f,d}$ aumenta com o aumento da flecha. Isso se dá devido ao fato de que um condutor mais leve e com uma flecha maior acaba oscilando mais (maiores ângulos de oscilação). Apesar da tração inicial ser menor, o efeito da força de *drop-back* acaba sendo maximizado devido aos maiores ângulos de oscilação

4.3.4 Variação do número de espaçadores

Para análise dos esforços considerando a variação do número de espaçadores distribuídos ao longo do vão em estudo considerou-se um vão menor (40 metros) e um maior (90 metros) para os dois condutores analisados no item anterior: Rail e Oriole. Os outros dados considerados permanecem constantes para as análises que seguem.

Tabela 4.27 - Dados utilizados para os cálculos - Variação do Número de Espaçadores.

		Condutor Rail	Condutor Oriole
Cadeia de isoladores	Peso (P_i)	300 [kg]	65 [kg]
	Número	2	1
	Comprimento (S_i)	6 [m]	2,75 [m]
Vão	Comprimento (V)	40/90 [m]	40/90 [m]
	Flecha (%)	3,5	3,5
Vento	Fator S_1	1,0	1,0
	Fator S_2	1,0058	1,0058
	Fator S_3	1,1	1,1
	V_0	25 [m/s]	25 [m/s]
Curto-Circuito	Constante de Spring (S)	650000 [N/m]	75000 [N/m]
	Corrente de curto-circuito (I)	63 [kA]	31,5 [kA]
	Distância entre os subcondutores (as)	0,457 [m]	0,20 [m]
	Distância entre fases (a)	8 [m]	3 [m]
	Fator de assimetria (k)	1,81	1,81
	Tempo para eliminação do curto-circuito (T_k)	0,1 [s]	0,75 [s]

Tabela 4.28 - Esforços para variação do número de espaçadores- 4 Condutores Rail por fase -Vão 40 metros.

Espaçadores [un.]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
1	4x Rail	1639	1996	2349	1806	0	7976	2194	0	8482
3	4x Rail	1661	2027	2374	1822	0	11585	2218	0	12169
5	4x Rail	1683	2057	2399	1839	0	6538	2242	0	6784
7	4x Rail	1705	2088	2424	1856	0	5319	2267	0	5584
9	4x Rail	1727	2118	2449	1873	0	4651	2292	0	4926
11	4x Rail	1749	2149	2474	1890	0	4215	2317	0	4499
13	4x Rail	1772	2180	2499	1908	0	3906	2343	0	4199
15	4x Rail	1794	2210	2524	1926	0	3674	2369	0	3978
17	4x Rail	1816	2241	2549	1944	0	3495	2395	0	3809
19	4x Rail	1838	2272	2574	1962	0	3352	2421	0	3678
21	4x Rail	1860	2302	2599	1981	0	3237	2448	0	3575
23	4x Rail	1882	2333	2625	1999	0	3143	2475	0	3492
25	4x Rail	1904	2364	2650	2018	0	3065	2502	0	3427
27	4x Rail	1926	2395	2675	2037	0	3000	2529	0	3374
29	4x Rail	1948	2426	2701	2056	0	2946	2556	0	3333

Para considerar as massas dos espaçadores, estas foram somada e divididas uniformemente ao longo do vão em estudo. A massa destes espaçadores por unidade de comprimento foi, então, somada à massa do condutor de forma que o peso específico do condutor fosse alterado ao longo da metodologia de cálculo. Como foi considerada uma grande quantidade de espaçadores em alguns casos, a massa destes elementos torna-se relevante para o cálculo, não podendo, portanto, ser desprezada.

Figura 4.36 - Variação dos esforços estáticos com o número de espaçadores - 4 Condutores Rail por fase - Vão 40 metros.

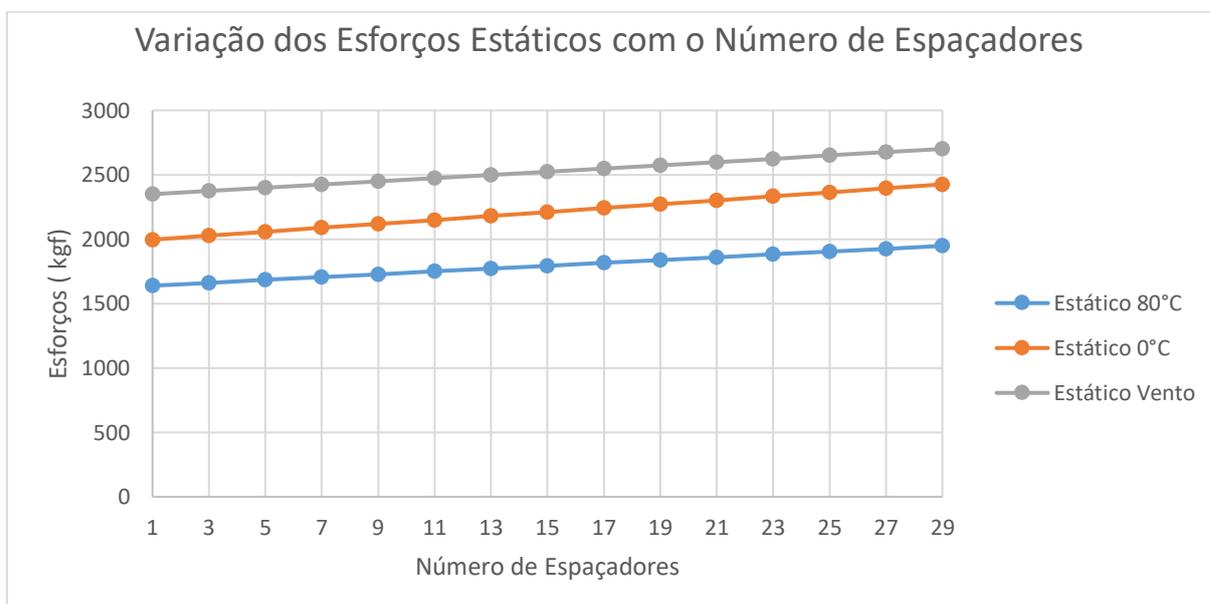


Figura 4.37 - Variação dos esforços dinâmicos com o número de espaçadores - 4 Condutores Rail por fase - Vão 40 metros.

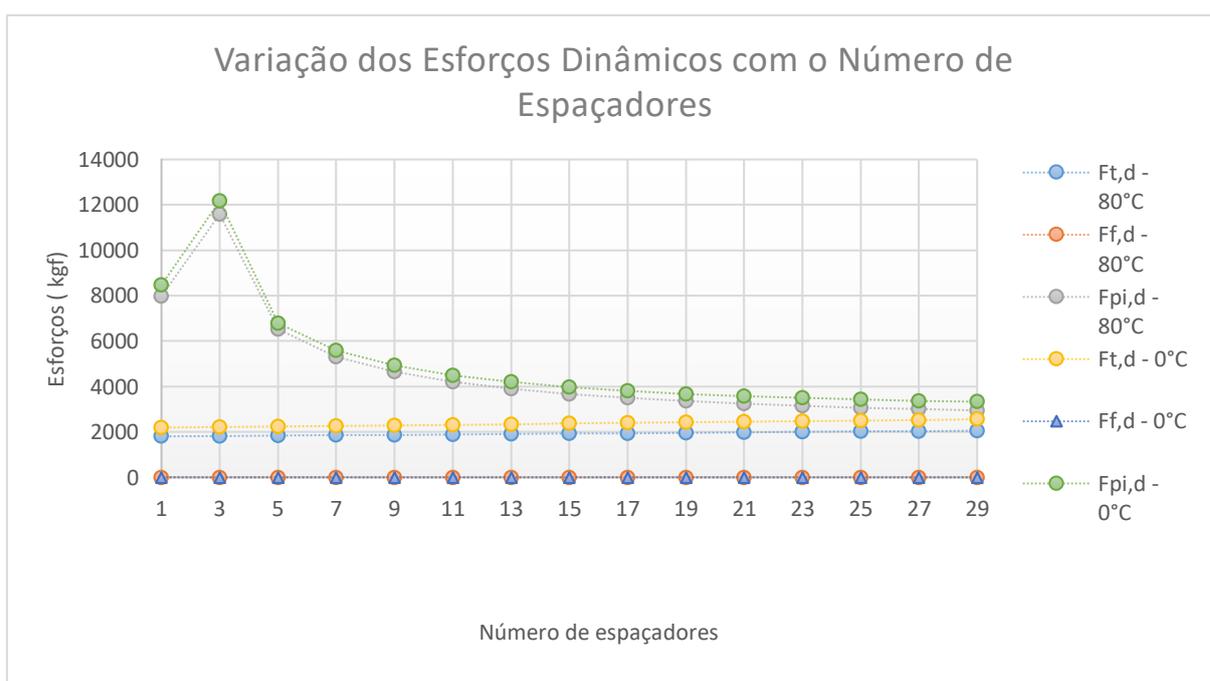


Tabela 4.29 - Esforços para variação do número de espaçadores- 4 Condutores Rail por fase -Vão 90 metros.

Espaçadores [un.]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
1	4x Rail	2381	3092	3749	2525	0	7101	3302	0	8054
3	4x Rail	2397	3115	3766	2541	0	9738	3323	0	10816
5	4x Rail	2414	3138	3783	2556	0	11943	3344	0	13123
7	4x Rail	2431	3161	3800	2571	0	13911	3365	0	15181
9	4x Rail	2447	3184	3817	2586	0	15722	3386	0	17076
11	4x Rail	2464	3207	3834	2602	0	10453	3407	0	10912
13	4x Rail	2481	3230	3851	2617	0	9029	3428	0	9557
15	4x Rail	2498	3253	3868	2632	0	8146	3450	0	8696
17	4x Rail	2514	3276	3885	2648	0	7516	3471	0	8079
19	4x Rail	2531	3299	3902	2663	0	7036	3492	0	7607
21	4x Rail	2548	3322	3919	2679	0	6653	3513	0	7232
23	4x Rail	2564	3346	3936	2694	0	6340	3534	0	6925
25	4x Rail	2581	3369	3953	2710	0	6078	3556	0	6670
27	4x Rail	2598	3392	3970	2725	0	5855	3577	0	6454
29	4x Rail	2615	3415	3987	2741	0	5663	3598	0	6270

Figura 4.38 - Variação dos esforços estáticos com o número de espaçadores - 4 Condutores Rail por fase - Vão 90 metros.

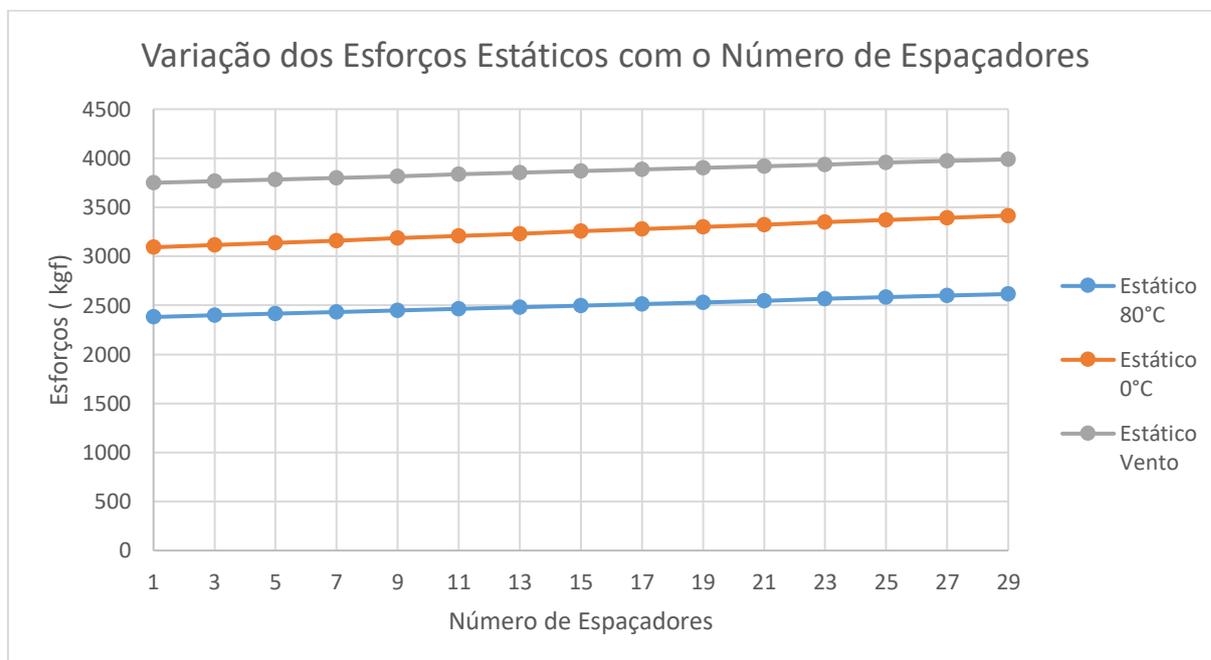


Figura 4.39 - Variação dos esforços dinâmicos com o número de espaçadores - 4 Condutores Rail por fase -Vão 90 metros.

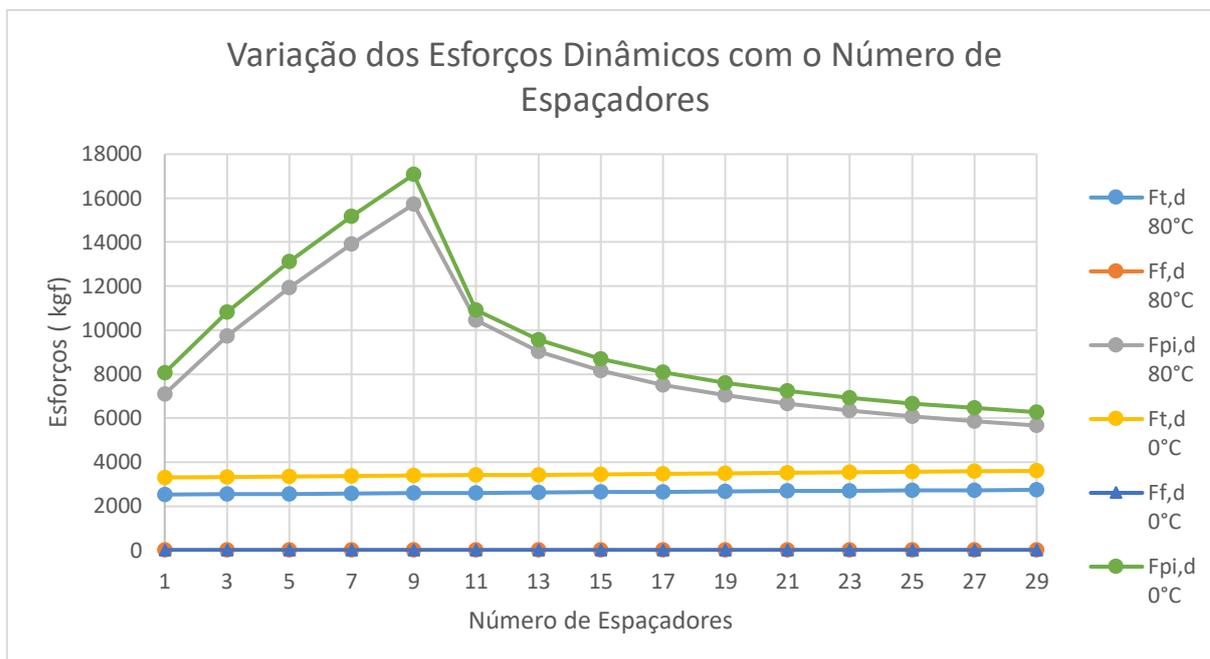


Tabela 4.30 - Esforços para variação do número de espaçadores- 2 Condutores Oriole por fase -Vão 40 metros.

Espaçadores [un.]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
1	2x Oriole	298	353	489	1176	1345	733	1240	1272	794
3	2x Oriole	315	374	506	1169	1406	992	1238	1328	1062
5	2x Oriole	332	396	523	1164	1465	1213	1237	1383	1290
7	2x Oriole	349	418	540	1159	1522	1412	1236	1436	1497
9	2x Oriole	366	439	557	1155	1578	1597	1236	1488	1690
11	2x Oriole	382	461	574	1151	1623	1772	1237	1530	1872
13	2x Oriole	399	483	591	1149	1604	1940	1239	1516	2047
15	2x Oriole	416	505	608	1147	1610	2100	1241	1524	2215
17	2x Oriole	433	526	625	1145	1623	2256	1243	1539	2378
19	2x Oriole	449	548	642	1144	1639	1805	1246	1557	1833
21	2x Oriole	466	570	660	1144	1657	1595	1250	1576	1647
23	2x Oriole	483	591	677	1144	1676	1474	1254	1597	1536
25	2x Oriole	500	613	694	1145	1696	1390	1259	1619	1458
27	2x Oriole	516	635	712	1147	1716	1326	1264	1641	1400
29	2x Oriole	533	657	729	1148	1737	1277	1270	1664	1355

Figura 4.40 - Variação dos esforços estáticos com o número de espaçadores - 2 Condutores Oriole por fase -vão 40 metros.

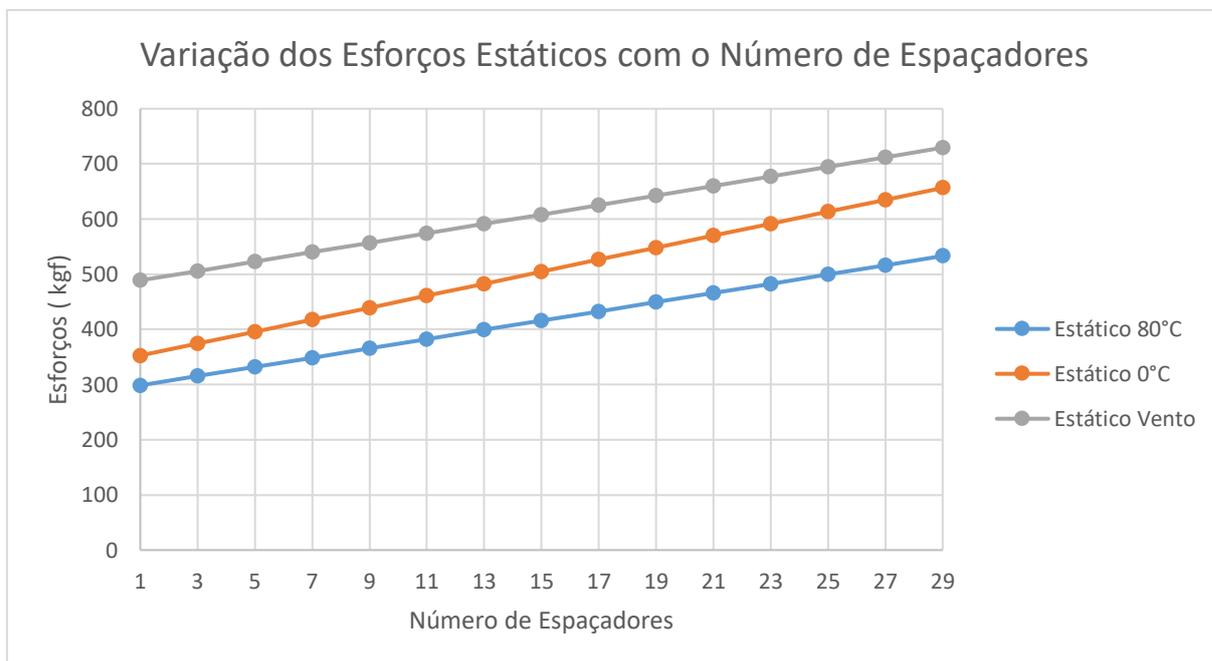


Figura 4.41 - Variação dos esforços dinâmicos com o número de espaçadores - 2 Condutores Oriole por fase -vão 40 metros.

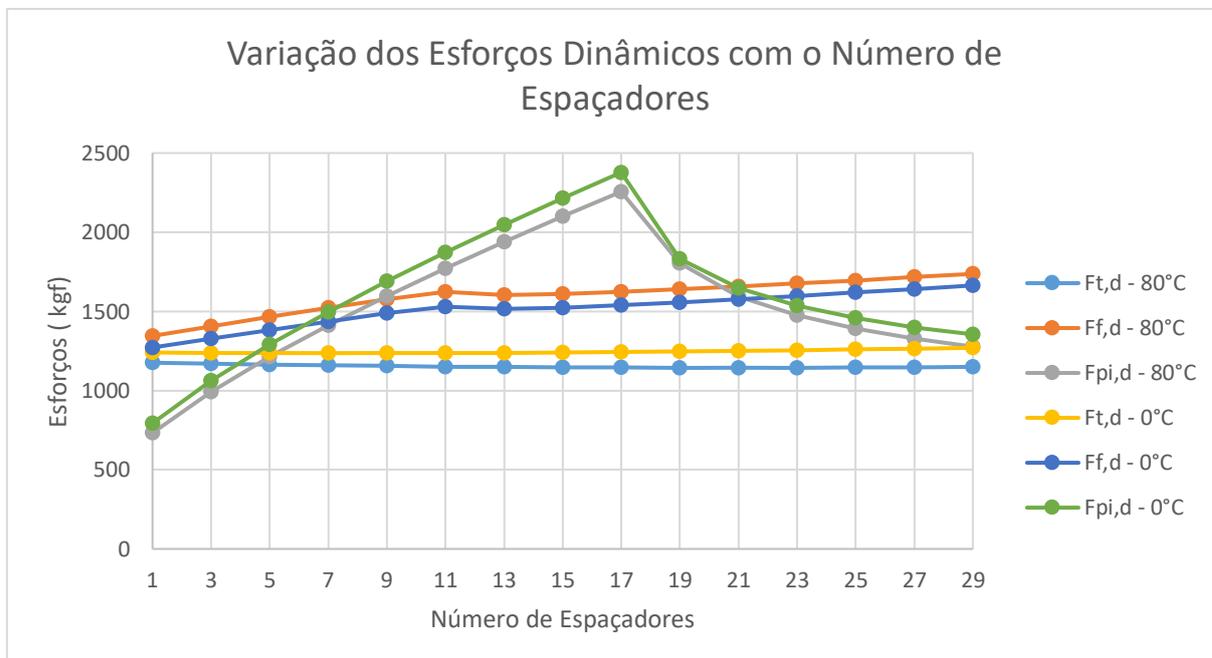


Tabela 4.31 - Esforços para variação do número de espaçadores- 2 Condutores Oriole por fase -Vão 90 metros.

Espaçadores [un.]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
1	2x Oriole	540	678	1004	2574	3038	932	2786	2810	1084
3	2x Oriole	556	698	1016	2571	3092	1161	2787	2861	1324
5	2x Oriole	571	718	1028	2568	3146	1354	2787	2911	1527
7	2x Oriole	586	737	1041	2566	3199	1529	2787	2961	1710
9	2x Oriole	601	757	1053	2564	3252	1691	2788	3010	1881
11	2x Oriole	617	776	1066	2562	3304	1844	2789	3059	2042
13	2x Oriole	632	795	1078	2560	3355	1990	2789	3108	2195
15	2x Oriole	647	815	1091	2558	3406	2131	2790	3156	2343
17	2x Oriole	662	834	1104	2556	3457	2266	2791	3203	2487
19	2x Oriole	677	854	1117	2555	3507	2398	2792	3251	2626
21	2x Oriole	693	873	1130	2554	3556	2527	2794	3297	2761
23	2x Oriole	708	892	1143	2552	3605	2652	2795	3344	2894
25	2x Oriole	723	912	1156	2551	3654	2775	2797	3390	3023
27	2x Oriole	738	931	1170	2550	3702	2896	2798	3435	3151
29	2x Oriole	754	950	1183	2550	3750	3014	2800	3481	3276

Figura 4.42 - Variação dos esforços estáticos com o número de espaçadores - 2 Condutores Oriole por fase -Vão 90 metros.

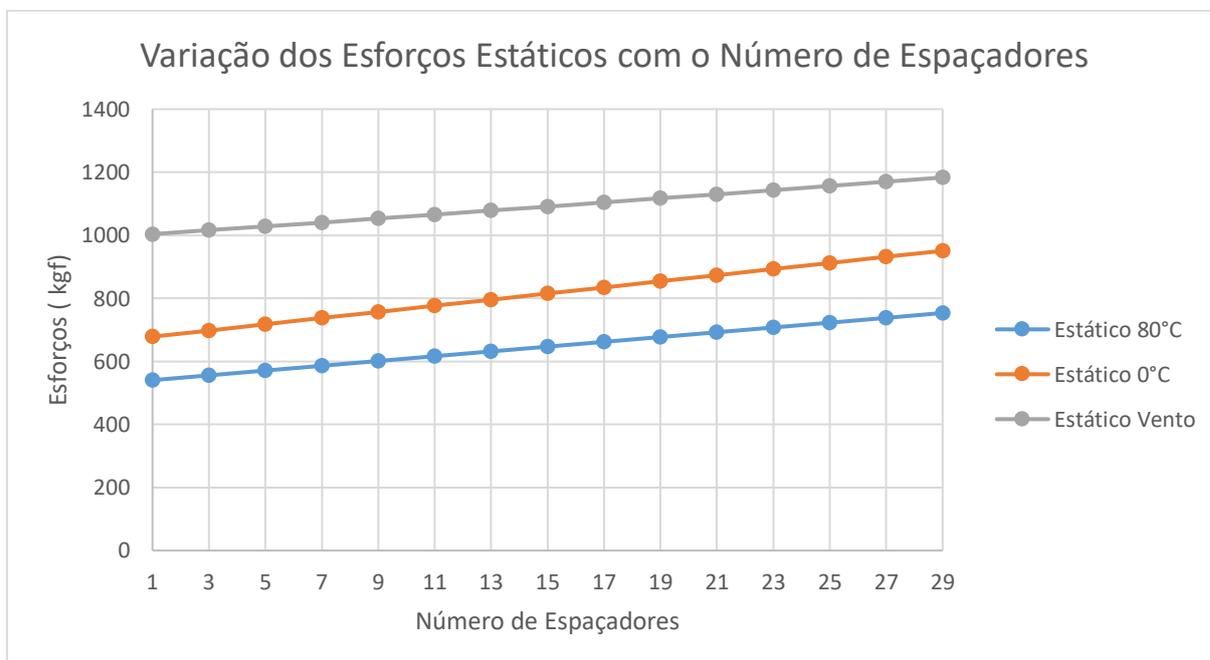
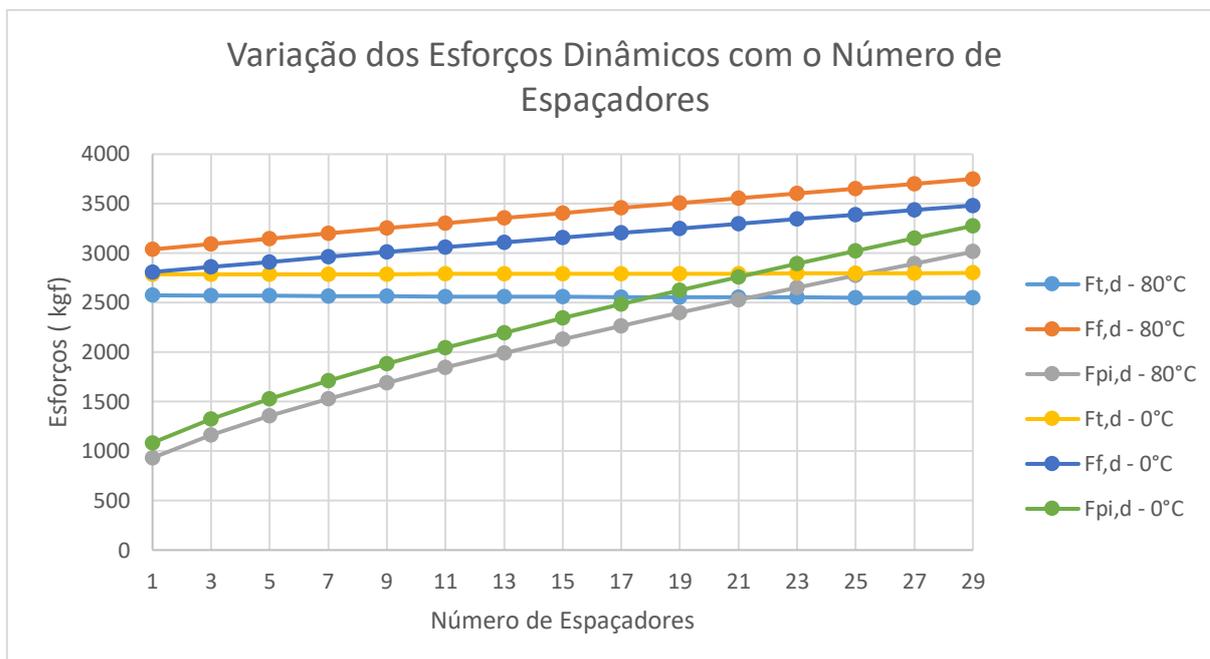


Figura 4.43 - Variação dos esforços dinâmicos com o número de espaçadores - 2 Condutores Oriole por fase - Vão 90 metros.



Com relação aos esforços estáticos, o aumento do número de espaçadores influencia a massa por unidade de comprimento considerada, uma vez que a massa dos espaçadores foi distribuída igualmente ao longo do vão. Para o condutor com maior massa (Rail) o efeito é menor assim como o efeito no vão maior (90 metros).

O maior efeito da alteração do número de espaçadores dá-se com relação aos esforços dinâmicos. As forças $F_{t,d}$ e $F_{f,d}$ não são muito influenciadas pela variação do número de espaçadores, sendo que, uma vez que dependem diretamente dos esforços estáticos, variações nestas forças alteram, conseqüentemente, o valor dinâmico calculado. A força de *pinch* é muito influenciada devido à alteração da distância entre os espaçadores. Observa-se que, para os três primeiros casos, há um aumento significativo na força de *pinch* até um valor de pico, seguido de uma considerável redução deste esforço. A partir do pico, os condutores deixam de colidir efetivamente e, desta forma, há esta redução no seu valor. No último caso, se o número de espaçadores fosse aumentado ainda mais, ter-se-ia o mesmo comportamento.

4.3.5 Variação do valor do espaçamento entre os subcondutores

Para análise dos esforços considerando a variação do espaçamento entre os subcondutores considerou-se um vão pequeno (40 metros) e um grande (90 metros) para os dois condutores analisados no item anterior: Rail e Oriole. Os demais dados considerados permanecem constantes para as análises que seguem.

Tabela 4.32 - Dados utilizados para os cálculos - variação do espaçamento entre subcondutores.

		Condutor Rail	Condutor Oriole
Cadeia de isoladores	Peso (P_i)	300 [kg]	65 [kg]
	Número	2	1
	Comprimento (S_i)	6 [m]	2,75 [m]
Vão	Comprimento (V)	40/90 [m]	40/90 [m]
	Flecha (%)	3,5	3,5
Vento	Fator S_1	1,0	1,0
	Fator S_2	1,0058	1,0058
	Fator S_3	1,1	1,1
	V0	25 [m/s]	25 [m/s]
Curto-Circuito	Constante de Spring (S)	650000 [N/m]	75000 [N/m]
	Corrente de curto-circuito (I)	63 [kA]	31,5 [kA]
	Distância entre fases (a)	8 [m]	3 [m]
	Fator de assimetria (k)	1,81	1,81
	Tempo para eliminação do curto-circuito (T_k)	0,1 [s]	0,75 [s]
	Espaçadores	3	3

Tabela 4.33 - Esforços para variação do espaçamento entre subcondutores - 4 Condutores Rail por fase - Vão 40 metros.

Distância Entre Subcondutores [m]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
0,2	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	7247	2169	0	7724
0,25	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	8371	2169	0	8870
0,3	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	9613	2169	0	10137
0,35	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	9933	2169	0	10465
0,4	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	10872	2169	0	11423
0,45	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	11450	2169	0	12014
0,5	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	11931	2169	0	12507
0,55	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	7787	2169	0	7977
0,6	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	6733	2169	0	6952
0,65	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	6307	2169	0	6536
0,7	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	5791	2169	0	6026
0,75	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	5412	2169	0	5650
0,8	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	5098	2169	0	5339
0,9	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	4630	2169	0	4873
1	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	4314	2169	0	4561

Ressalta-se que o espaçamento entre os subcondutores não influencia os resultados obtidos para os valores estáticos e, portanto, os gráficos referentes a estes esforços não são apresentados neste item.

Figura 4.44 - Variação dos esforços dinâmicos com o espaçamento entre subcondutores - 4 Condutores Rail por fase -Vão 40 metros.

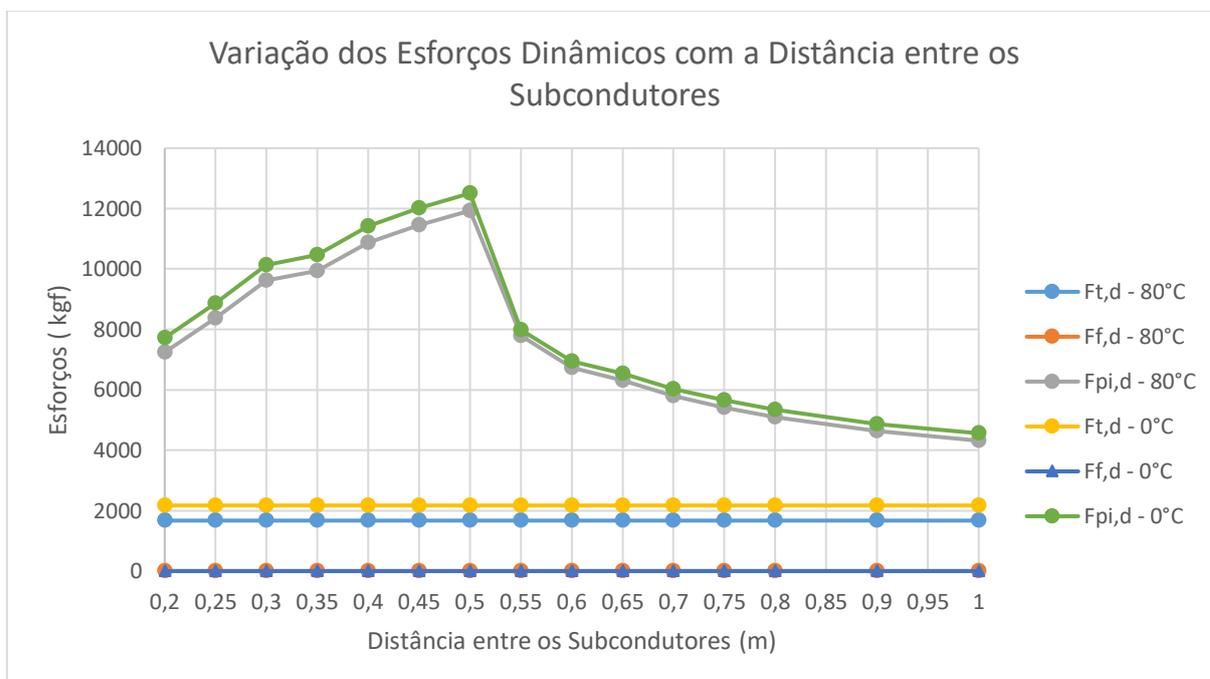
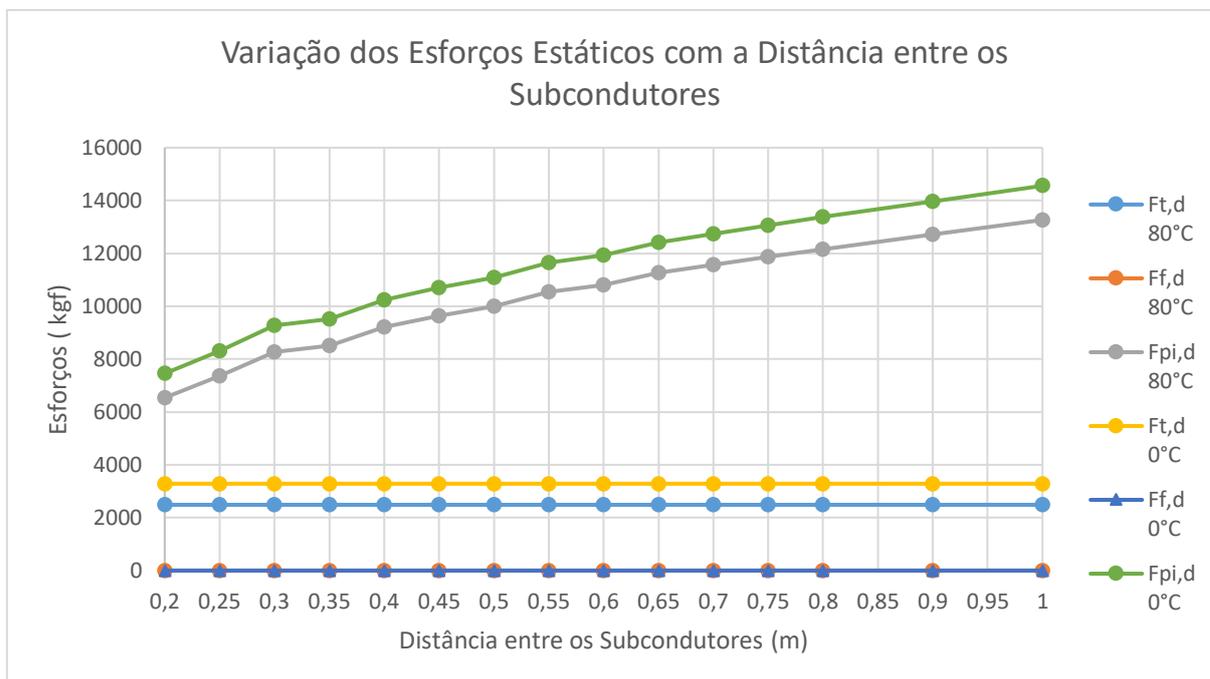


Tabela 4.34 - Esforços para variação do espaçamento entre subcondutores- 4 Condutores Rail por fase - Vão 90 metros.

Distância Entre Subcondutores [m]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
0,2	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	6539	3285	0	7455
0,25	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	7364	3285	0	8317
0,3	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	8275	3285	0	9270
0,35	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	8516	3285	0	9523
0,4	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	9209	3285	0	10250
0,45	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	9639	3285	0	10702
0,5	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	9999	3285	0	11082
0,55	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	10540	3285	0	11650
0,6	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	10807	3285	0	11934
0,65	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	11271	3285	0	12424
0,7	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	11567	3285	0	12738
0,75	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	11874	3285	0	13064
0,8	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	12162	3285	0	13372
0,9	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	12718	3285	0	13968
1	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	13267	3285	0	14560

**Figura 4.45 - Variação dos esforços dinâmicos com o espaçamento entre subcondutores - 4 Condutores
Rail por fase -vão 90 metros.**



**Tabela 4.35 - Esforços para variação do espaçamento entre subcondutores- 2 Condutores Oriole por fase -
vão 40 metros.**

Distância Entre Subcondutores [m]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
0,2	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	962	1203	1367	1024
0,25	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	1012	1203	1367	1074
0,3	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	1142	1203	1367	1206
0,35	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	1238	1203	1367	1303
0,4	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	1259	1203	1367	1325
0,45	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	1340	1203	1367	1408
0,5	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	1403	1203	1367	1473
0,55	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	1429	1203	1367	1500
0,6	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	1489	1203	1367	1561
0,65	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	1522	1203	1367	1596
0,7	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	1547	1203	1367	1622
0,75	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	1595	1203	1367	1673
0,8	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	1612	1203	1367	1692
0,9	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	1649	1203	1367	1736
1	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	1642	1203	1367	1743

Figura 4.46 - Variação dos esforços dinâmicos com o espaçamento entre subcondutores - 2 Condutores Oriole por fase - Vão 40 metros.

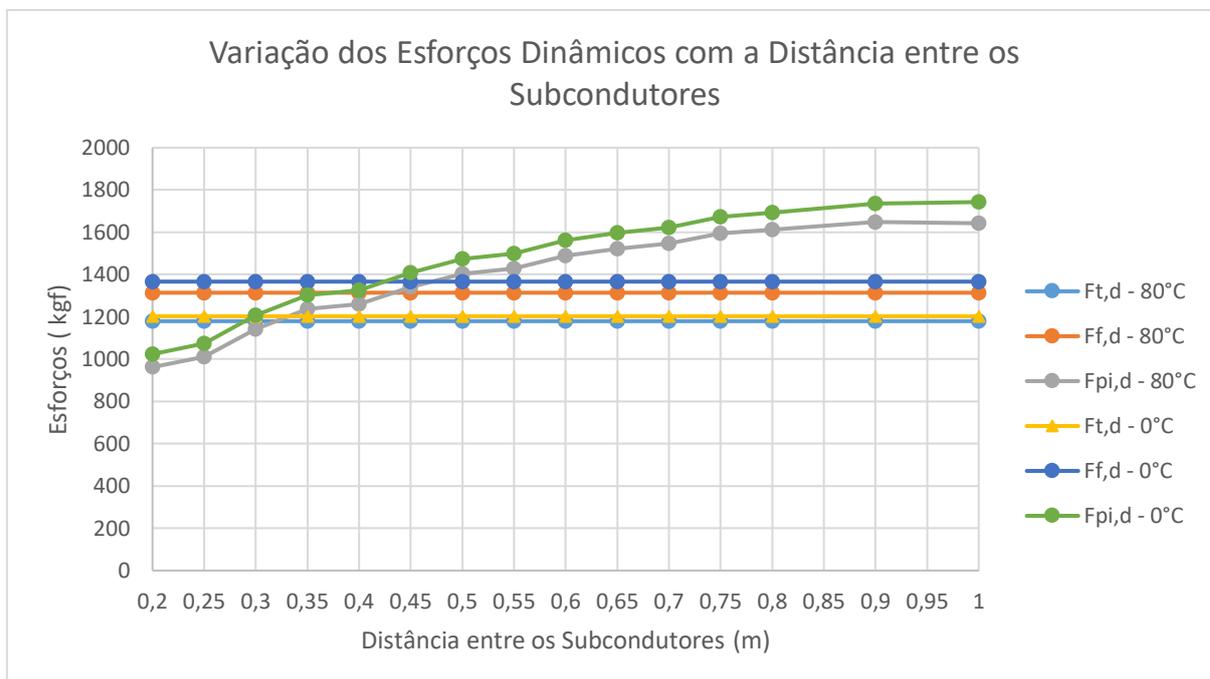
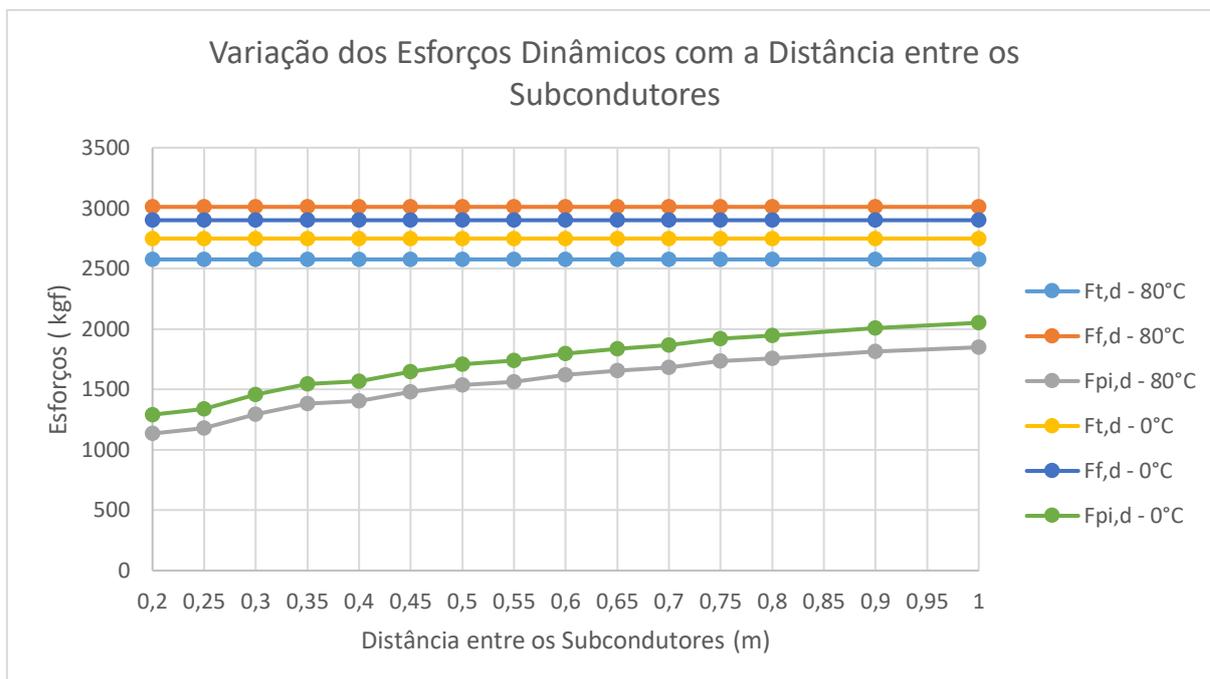


Tabela 4.36 - Esforços para variação do espaçamento entre subcondutores- 2 Condutores Oriole por fase - Vão 90 metros.

Distância Entre Subcondutores [m]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
0,2	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1134	2748	2900	1290
0,25	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1179	2748	2900	1336
0,3	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1295	2748	2900	1457
0,35	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1382	2748	2900	1546
0,4	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1403	2748	2900	1569
0,45	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1477	2748	2900	1646
0,5	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1537	2748	2900	1708
0,55	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1563	2748	2900	1737
0,6	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1620	2748	2900	1797
0,65	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1655	2748	2900	1834
0,7	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1683	2748	2900	1864
0,75	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1733	2748	2900	1918
0,8	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1756	2748	2900	1944
0,9	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1813	2748	2900	2007
1	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1848	2748	2900	2051

Figura 4.47 - Variação dos esforços dinâmicos com o espaçamento entre subcondutores - 2 Condutores Oriole por fase -vão 90 metros.



O espaçamento entre os subcondutores e o número de espaçadores influenciam fortemente os esforços devidos ao efeito de *pinch*. Observa-se, no primeiro caso um valor muito alto para o esforço de *pinch* para um espaçamento entre 0,4 e 0,5 metros (comumente utilizado para 500 kV). Para o vão maior com condutor Rail e para os vãos com condutores Oriole, observa-se que o valor dos esforços devidos ao *pinch* aumenta, à medida que a distância entre os subcondutores aumenta. Alterações no número de espaçadores poderiam reduzir os esforços obtidos para o espaçamento de 0,457 m comumente utilizado para o nível de tensão de 500 kV. Outro fator que influencia consideravelmente esta questão é a intensidade da corrente de curto-circuito adotada. Este parâmetro será analisado no item 4.3.6.

4.3.6 Variação do valor da magnitude da corrente de curto-circuito

Para análise dos esforços considerando a variação da magnitude da corrente de curto-circuito considerou-se um vão pequeno (40 metros) e um grande (90 metros) para os dois condutores analisados no item anterior: Rail e Oriole. Os demais dados considerados permanecem constantes para as análises que seguem.

Ressalta-se que a corrente de curto-circuito adotada não influencia os resultados obtidos para os valores estáticos e, portanto, os gráficos referentes a estes esforços não são apresentados neste item.

Tabela 4.37 - Dados utilizados para os cálculos - variação da corrente de curto-circuito.

		Condutor Rail	Condutor Oriole
Cadeia de isoladores	Peso (P_i)	300 [kg]	65 [kg]
	Número	2	1
	Comprimento (S_i)	6 [m]	2,75 [m]
Vão	Comprimento (V)	40/90 [m]	40/90 [m]
	Flecha (%)	3,5	3,5
Vento	Fator S_1	1,0	1,0
	Fator S_2	1,0058	1,0058
	Fator S_3	1,1	1,1
	V_0	25 [m/s]	25 [m/s]
Curto-Circuito	Constante de Spring (S)	650000 [N/m]	75000 [N/m]
	Distância entre os subcondutores (as)	0,457 [m]	0,20 [m]
	Distância entre fases (a)	8 [m]	3 [m]
	Fator de assimetria (k)	1,81	1,81
	Tempo para eliminação do curto-circuito (T_k)	0,1 [s]	0,75 [s]
	Espaçadores	3	3

Tabela 4.38 - Esforços para variação da corrente de curto-circuito - 4 Condutores Rail por fase - Vão 40 metros.

Corrente [A]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
30000	4x Rail	1628	1981	2337	1630	0	3220	1991	0	3458
32500	4x Rail	1628	1981	2337	1631	0	3535	1995	0	3764
35000	4x Rail	1628	1981	2337	1632	0	3869	1999	0	4091
37500	4x Rail	1628	1981	2337	1633	0	4257	2005	0	4472
40000	4x Rail	1628	1981	2337	1635	0	4650	2012	0	4859
42500	4x Rail	1628	1981	2337	1636	0	5090	2021	0	5291
45000	4x Rail	1628	1981	2337	1639	0	5565	2031	0	5756
47500	4x Rail	1628	1981	2337	1641	0	6007	2043	0	6187
50000	4x Rail	1628	1981	2337	1644	0	6692	2056	0	6848
52500	4x Rail	1628	1981	2337	1648	0	10322	2073	0	10867
55000	4x Rail	1628	1981	2337	1652	0	10574	2091	0	11123
57500	4x Rail	1628	1981	2337	1657	0	10763	2112	0	11316
60000	4x Rail	1628	1981	2337	1662	0	11054	2136	0	11612
62500	4x Rail	1628	1981	2337	1668	0	11469	2164	0	12034
65000	4x Rail	1628	1981	2337	1675	0	11795	2194	0	12366

Figura 4.48 - Variação dos esforços dinâmicos com a corrente de curto-circuito - 4 Condutores Rail por fase - Vão 40 metros.

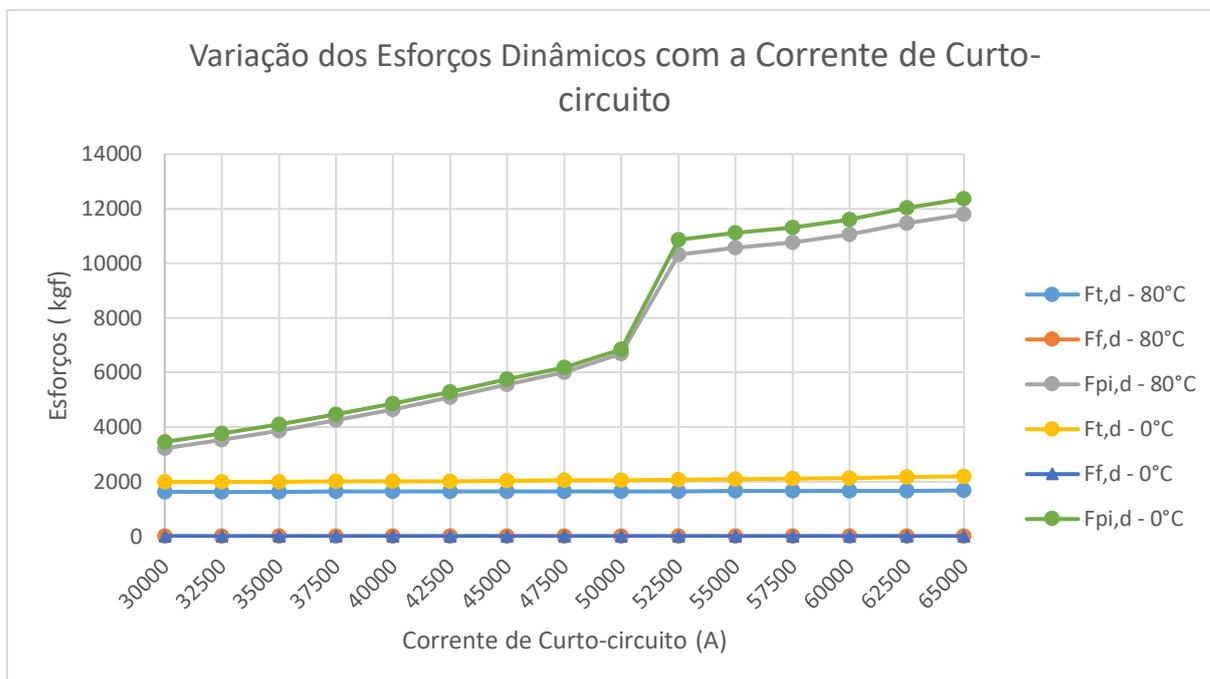


Tabela 4.39 - Esforços para variação da corrente de curto-circuito- 4 Condutores Rail por fase - Vão 90 metros.

Corrente [A]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
30000	4x Rail	2372	3080	3741	2378	0	6601	3091	0	7527
32500	4x Rail	2372	3080	3741	2380	0	6851	3094	0	7789
35000	4x Rail	2372	3080	3741	2383	0	7092	3099	0	8041
37500	4x Rail	2372	3080	3741	2387	0	7346	3106	0	8307
40000	4x Rail	2372	3080	3741	2391	0	7580	3113	0	8551
42500	4x Rail	2372	3080	3741	2396	0	7817	3122	0	8800
45000	4x Rail	2372	3080	3741	2402	0	8050	3133	0	9043
47500	4x Rail	2372	3080	3741	2409	0	8246	3146	0	9248
50000	4x Rail	2372	3080	3741	2418	0	8516	3161	0	9529
52500	4x Rail	2372	3080	3741	2428	0	8818	3179	0	9845
55000	4x Rail	2372	3080	3741	2440	0	9001	3199	0	10037
57500	4x Rail	2372	3080	3741	2453	0	9139	3222	0	10181
60000	4x Rail	2372	3080	3741	2468	0	9351	3249	0	10402
62500	4x Rail	2372	3080	3741	2485	0	9654	3279	0	10718
65000	4x Rail	2372	3080	3741	2504	0	9891	3313	0	10966

Figura 4.49 - Variação dos esforços dinâmicos com a corrente de curto-circuito - 4 Condutores Rail por fase - Vão 90 metros.

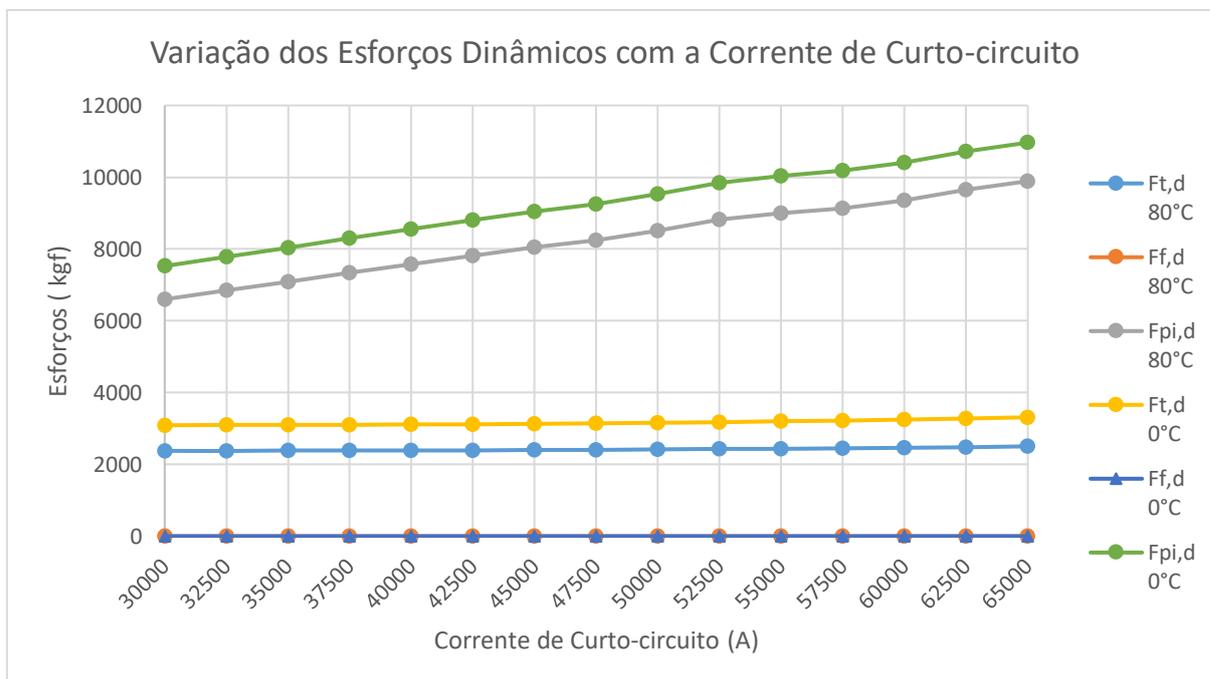


Tabela 4.40 - Esforços para variação da corrente de curto-circuito- 2 Condutores Oriole por fase - Vão 40 metros.

Corrente [A]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
30000	2x Oriole	290	342	480	1091	1314	924	1114	1367	985
32500	2x Oriole	290	342	480	1240	1314	990	1263	1367	1052
35000	2x Oriole	290	342	480	1394	1314	1056	1417	1367	1118
37500	2x Oriole	290	342	480	1553	1314	1103	1576	1367	1166
40000	2x Oriole	290	342	480	1716	1314	1139	1739	1367	1202
42500	2x Oriole	290	342	480	1883	1314	1168	1907	1367	1232
45000	2x Oriole	290	342	480	2053	1314	1194	2077	1367	1257
47500	2x Oriole	290	342	480	2226	1314	1216	2251	1367	1280
50000	2x Oriole	290	342	480	2402	1314	1237	2428	1367	1301
52500	2x Oriole	290	342	480	2581	1314	1256	2608	1367	1320
55000	2x Oriole	290	342	480	2763	1314	1273	2791	1367	1338
57500	2x Oriole	290	342	480	2947	1314	1290	2976	1367	1354
60000	2x Oriole	290	342	480	3134	1314	1305	3164	1367	1370
62500	2x Oriole	290	342	480	3323	1314	1320	3354	1367	1385
65000	2x Oriole	290	342	480	3515	1314	1334	3547	1367	1399

Figura 4.50 - Variação dos esforços dinâmicos com a corrente de curto-circuito - 2 Condutores Oriole por fase -Vão 40 metros.

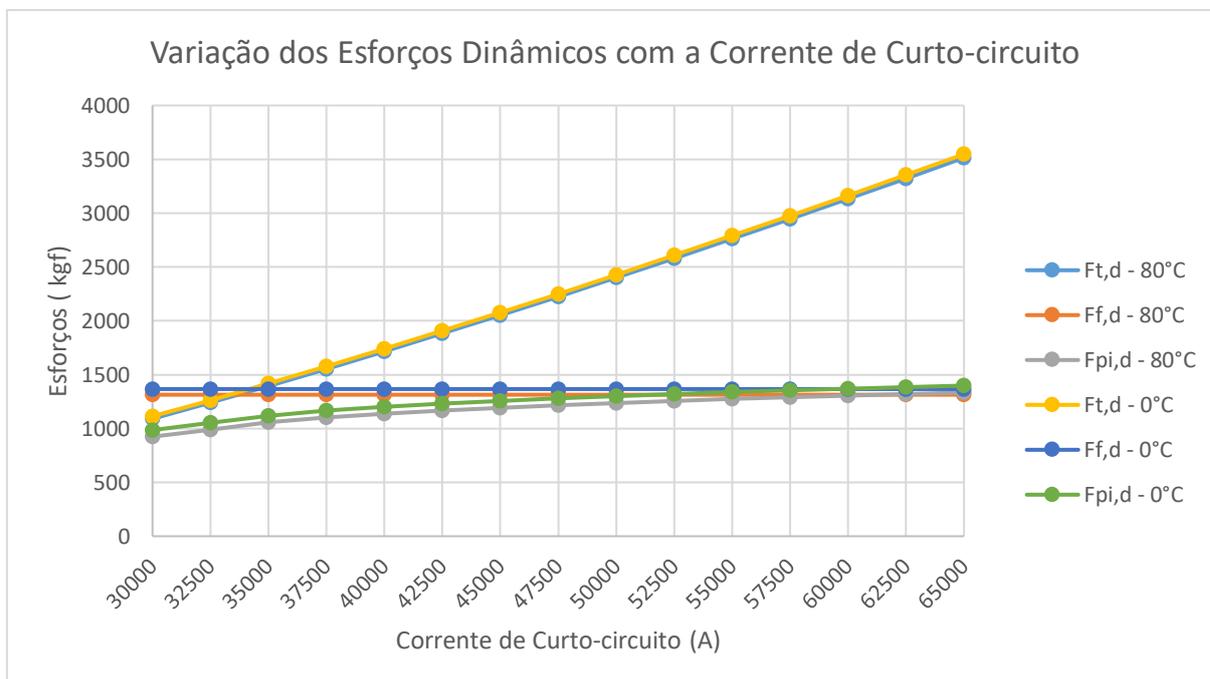
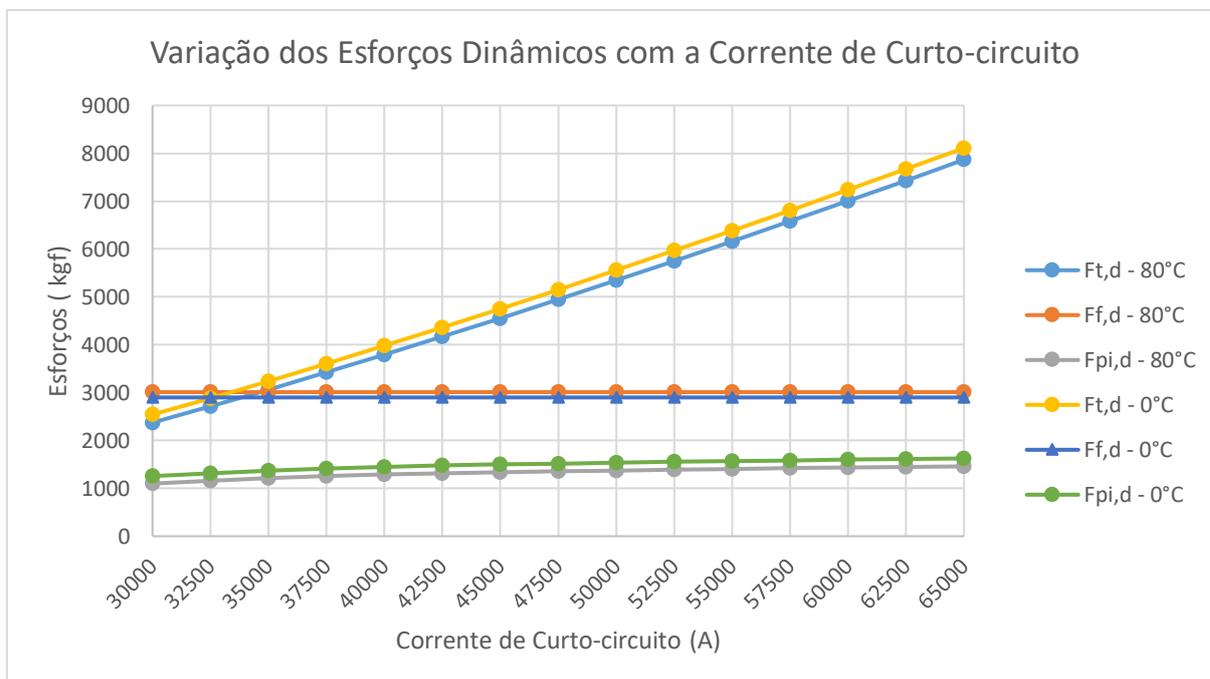


Tabela 4.41 - Esforços para variação da corrente de curto-circuito- 2 Condutores Oriole por fase -Vão 90 metros.

Corrente [A]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
30000	2x Oriole	533	669	998	2374	3010	1101	2543	2900	1256
32500	2x Oriole	533	669	998	2712	3010	1159	2887	2900	1316
35000	2x Oriole	533	669	998	3062	3010	1216	3242	2900	1375
37500	2x Oriole	533	669	998	3422	3010	1258	3607	2900	1417
40000	2x Oriole	533	669	998	3791	3010	1289	3981	2900	1449
42500	2x Oriole	533	669	998	4168	3010	1315	4364	2900	1476
45000	2x Oriole	533	669	998	4553	3010	1337	4754	2900	1499
47500	2x Oriole	533	669	998	4946	3010	1357	5152	2900	1519
50000	2x Oriole	533	669	998	5345	3010	1375	5556	2900	1538
52500	2x Oriole	533	669	998	5751	3010	1391	5967	2900	1555
55000	2x Oriole	533	669	998	6163	3010	1407	6384	2900	1570
57500	2x Oriole	533	669	998	6580	3010	1421	6807	2900	1585
60000	2x Oriole	533	669	998	7004	3010	1435	7236	2900	1599
62500	2x Oriole	533	669	998	7434	3010	1447	7670	2900	1612
65000	2x Oriole	533	669	998	7868	3010	1460	8110	2900	1625

Figura 4.51 - Variação dos esforços dinâmicos com a corrente de curto-circuito - 2 Condutores Oriole por fase - Vão 90 metros.



A corrente de curto-circuito para os dois primeiros casos (considerados aqui em uma subestação de 500 kV com tempo de duração de curto-circuito de 100 ms) influencia pouco a força $F_{t,d}$. A força de *pinch*, por se tratar de uma força praticamente instantânea, é mais influenciada pelo valor da corrente. Observa-se que os esforços devidos ao *pinch* aumentam com o aumento da corrente. Para os casos com condutores Oriole, a corrente influencia muito a força $F_{t,d}$, para a qual observa-se um aumento considerável com o aumento da corrente. A força de *pinch* neste caso é pouco afetada devido à distância menor entre os subcondutores das fases - 0,200 metros. Para distâncias maiores, ter-se-ia o mesmo comportamento observado para os casos com condutor Rail. É importante ressaltar que os esforços de *pinch* são afetados por uma combinação de diversos fatores, como comentado no item anterior: intensidade da corrente de curto-circuito adotada, espaçamento entre os subcondutores da fase, número de espaçadores distribuídos ao longo do vão.

4.3.7 Variação do valor da constante de *Spring* dos suportes

Para análise dos esforços considerando a variação da constante de *Spring* considerou-se um vão menor (40 metros) e um maior (90 metros) para os dois condutores analisados no item anterior: Rail e Oriole. Os demais dados considerados permanecem constantes para as análises que seguem.

Ressalta-se que a constante de *Spring* adotada não influencia os resultados obtidos para os valores estáticos e, portanto, os gráficos referentes a estes esforços não serão apresentados neste item.

Tabela 4.42 - Dados utilizados para os cálculos - Variação da constante de *Spring*.

		Condutor Rail	Condutor Oriole
Cadeia de isoladores	Peso (P_i)	300 [kg]	65 [kg]
	Número	2	1
	Comprimento (S_i)	6 [m]	2,75 [m]
Vão	Comprimento (V)	40/90 [m]	40/90 [m]
	Flecha (%)	3,5	3,5
Vento	Fator S_1	1,0	1,0
	Fator S_2	1,0058	1,0058
	Fator S_3	1,1	1,1
	V_0	25 [m/s]	25 [m/s]
Curto-Circuito	Corrente de curto-circuito (I)	63 [kA]	31,5 [kA]
	Distância entre os subcondutores (as)	0,457 [m]	0,20 [m]
	Distância entre fases (a)	8 [m]	3 [m]
	Fator de assimetria (k)	1,81	1,81
	Tempo para eliminação do curto-circuito (T_k)	0,1 [s]	0,75 [s]
	Espaçadores	3	3

As tabelas e gráficos abaixo apresentam os resultados obtidos para diversos valores da constante de *Spring* para os vãos em estudo considerando quatro condutores Rail por fase ou dois condutores Oriole por fase para vão de 40 metros e 90 metros de comprimento.

Tabela 4.43 - Esforços para variação da constante de *Spring* - 4 Condutores Rail por fase - Vão 40 metros.

Constante de Spring [N/m]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
300000	4x Rail	1628	1981	2337	1661	0	8465	2123	0	8929
380000	4x Rail	1628	1981	2337	1664	0	9341	2138	0	9829
460000	4x Rail	1628	1981	2337	1666	0	10093	2150	0	10605
540000	4x Rail	1628	1981	2337	1668	0	10750	2159	0	11285
620000	4x Rail	1628	1981	2337	1669	0	11330	2167	0	11888
700000	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	11848	2173	0	12428
780000	4x Rail	1628	1981	2337	1671	0	12314	2179	0	12916
860000	4x Rail	1628	1981	2337	1672	0	12736	2183	0	13359
940000	4x Rail	1628	1981	2337	1672	0	13121	2188	0	13763
1020000	4x Rail	1628	1981	2337	1673	0	13473	2191	0	14134
1100000	4x Rail	1628	1981	2337	1673	0	13796	2194	0	14475
1180000	4x Rail	1628	1981	2337	1674	0	14094	2197	0	14791
1260000	4x Rail	1628	1981	2337	1674	0	14371	2200	0	15085
1340000	4x Rail	1628	1981	2337	1674	0	14628	2202	0	15358
1500000	4x Rail	1628	1981	2337	1675	0	15090	2206	0	15851

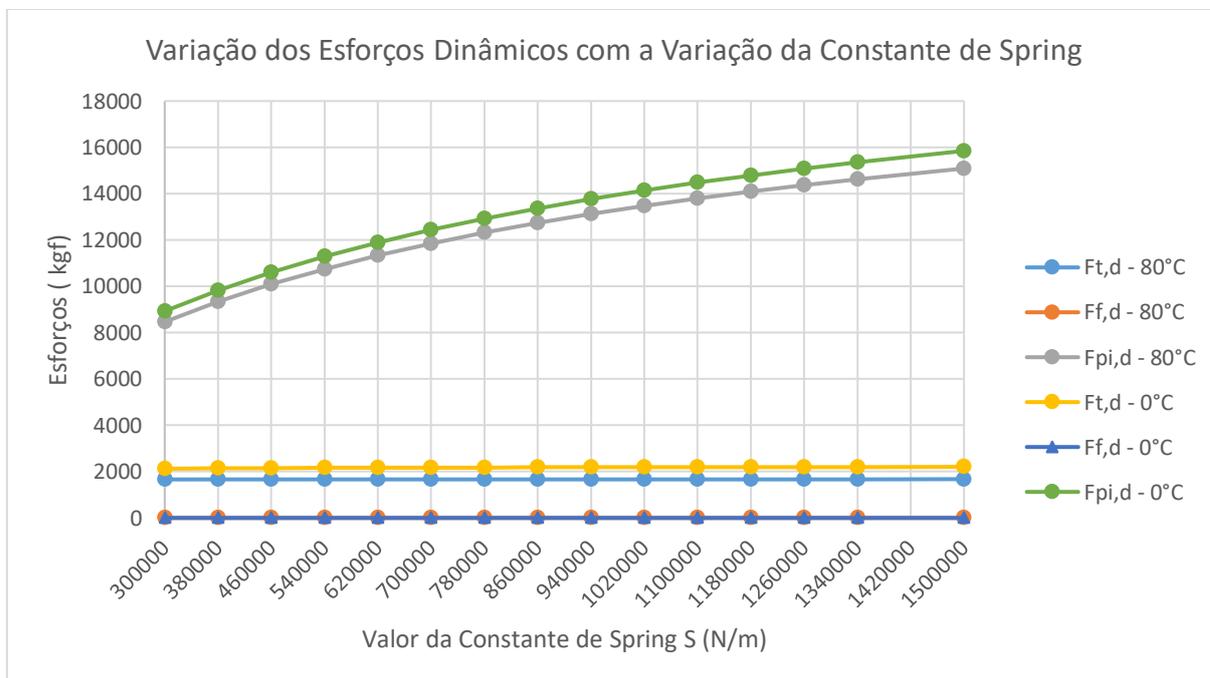
Figura 4.52 - Variação dos esforços dinâmicos com a constante de *Spring* - 4 Condutores Rail por fase - Vão 40 metros.

Tabela 4.44 - Esforços para variação da constante de *Spring*- 4 Condutores Rail por fase -Vão 90 metros.

Constante de Spring [N/m]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
300000	4x Rail	2372	3080	3741	2480	0	7830	3258	0	8737
380000	4x Rail	2372	3080	3741	2483	0	8400	3268	0	9348
460000	4x Rail	2372	3080	3741	2485	0	8866	3275	0	9853
540000	4x Rail	2372	3080	3741	2487	0	9256	3280	0	10278
620000	4x Rail	2372	3080	3741	2488	0	9587	3284	0	10642
700000	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	9873	3287	0	10958
780000	4x Rail	2372	3080	3741	2490	0	10122	3290	0	11235
860000	4x Rail	2372	3080	3741	2491	0	10342	3292	0	11480
940000	4x Rail	2372	3080	3741	2491	0	10536	3294	0	11698
1020000	4x Rail	2372	3080	3741	2492	0	10710	3296	0	11894
1100000	4x Rail	2372	3080	3741	2492	0	10867	3297	0	12071
1180000	4x Rail	2372	3080	3741	2493	0	11008	3299	0	12231
1260000	4x Rail	2372	3080	3741	2493	0	11137	3300	0	12377
1340000	4x Rail	2372	3080	3741	2493	0	11255	3301	0	12511
1500000	4x Rail	2372	3080	3741	2494	0	11462	3302	0	12748

Figura 4.53 - Variação dos esforços dinâmicos com a constante de *Spring* - 4 Condutores Rail por fase - Vão 90 metros.

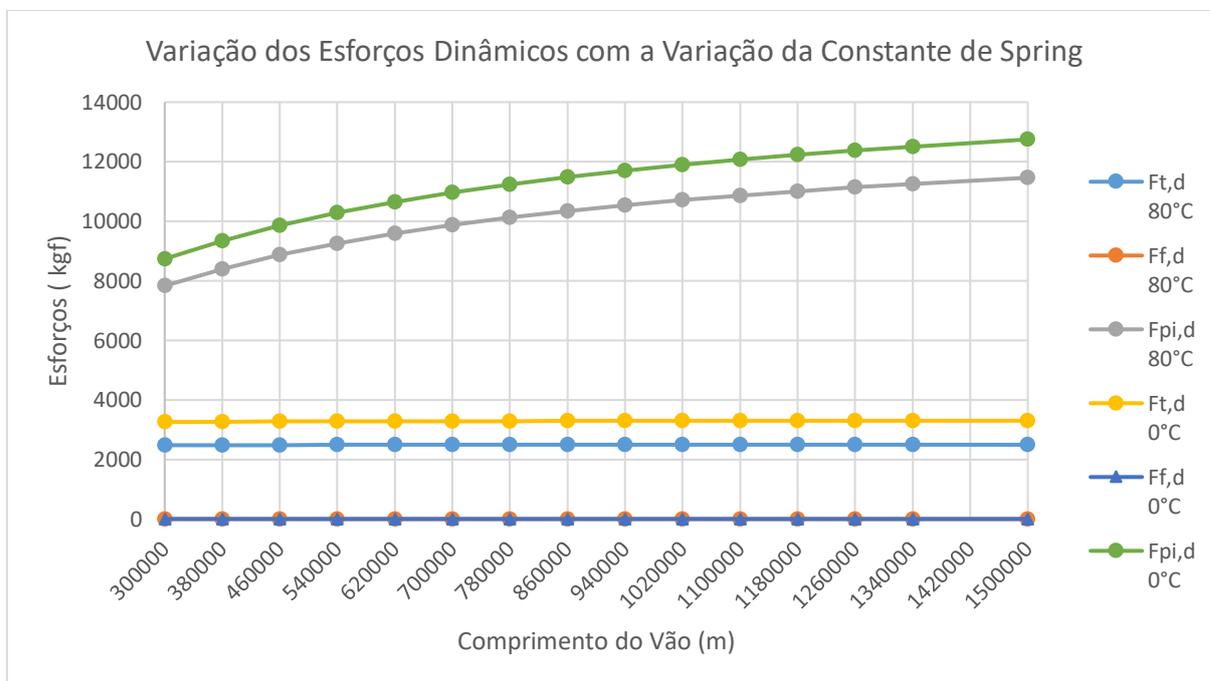


Tabela 4.45 - Esforços para variação da constante de *Spring*- 2 Condutores Oriole por fase -Vão 40 metros.

Constante de Spring [N/m]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
75000	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	962	1203	1367	1024
115000	2x Oriole	290	342	480	1268	1534	1120	1295	1594	1185
155000	2x Oriole	290	342	480	1325	1694	1239	1355	1761	1308
195000	2x Oriole	290	342	480	1365	1819	1333	1397	1891	1405
235000	2x Oriole	290	342	480	1395	1918	1410	1429	1996	1486
275000	2x Oriole	290	342	480	1418	2000	1475	1453	2083	1553
315000	2x Oriole	290	342	480	1437	2069	1529	1473	2156	1610
355000	2x Oriole	290	342	480	1452	2128	1577	1490	2219	1660
395000	2x Oriole	290	342	480	1465	2179	1618	1504	2273	1703
435000	2x Oriole	290	342	480	1476	2224	1654	1515	2320	1741
475000	2x Oriole	290	342	480	1485	2263	1686	1525	2362	1775
515000	2x Oriole	290	342	480	1493	2298	1714	1534	2400	1805
555000	2x Oriole	290	342	480	1500	2329	1740	1542	2433	1832
595000	2x Oriole	290	342	480	1506	2357	1763	1549	2463	1857
635000	2x Oriole	290	342	480	1512	2382	1784	1555	2491	1879

Figura 4.54 - Variação dos esforços dinâmicos com a constante de *Spring* - 2 Condutores Oriole por fase - Vão 40 metros.

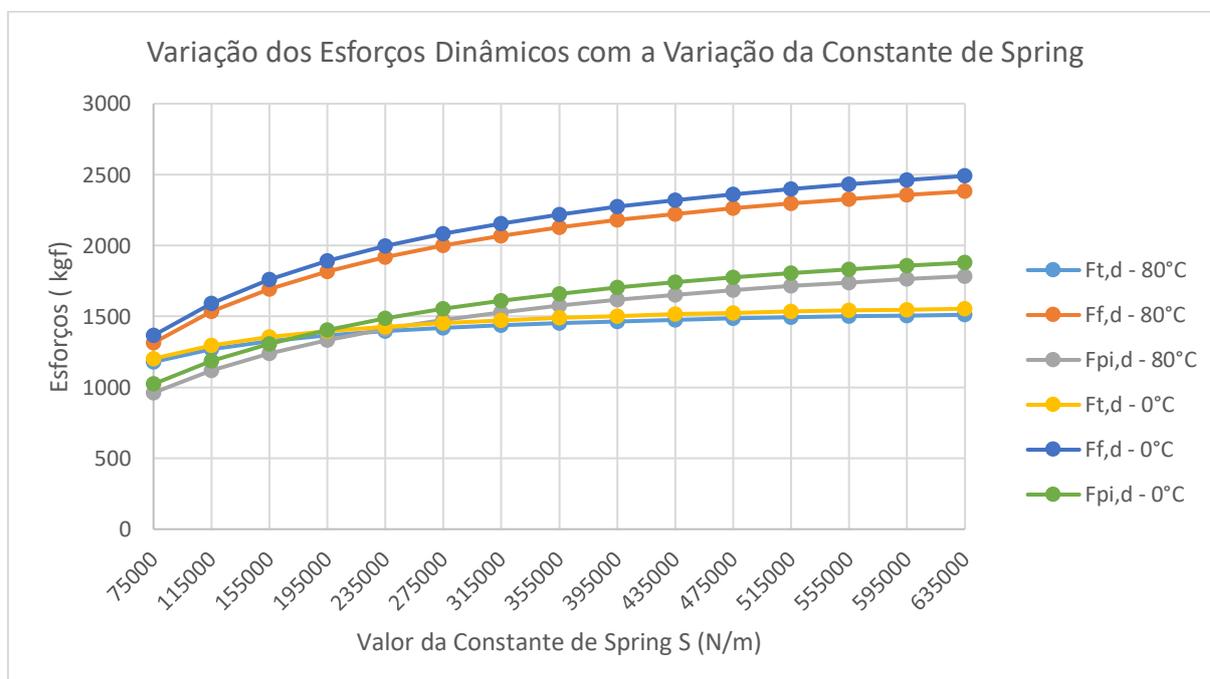
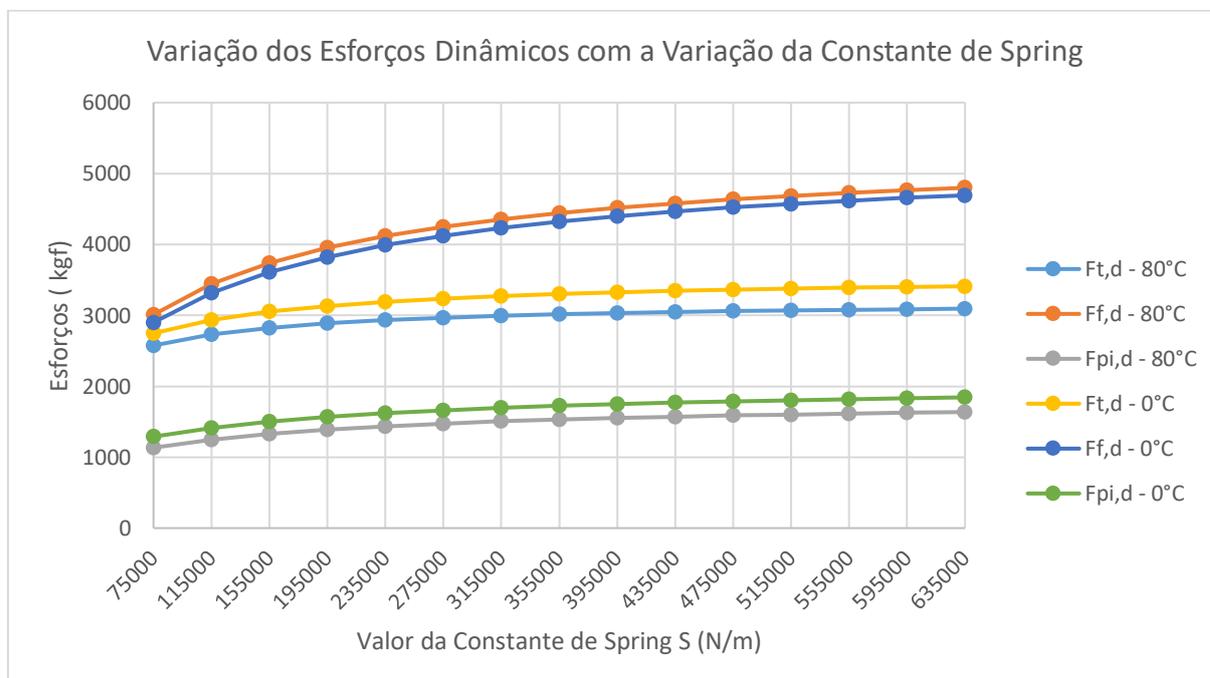


Tabela 4.46 - Esforços para variação da constante de *Spring*- 2 Condutores Oriole por fase -Vão 90 metros.

Constante de Spring [N/m]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
75000	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1134	2748	2900	1290
115000	2x Oriole	533	669	998	2730	3442	1249	2935	3319	1413
155000	2x Oriole	533	669	998	2823	3736	1330	3052	3609	1501
195000	2x Oriole	533	669	998	2886	3952	1390	3132	3823	1567
235000	2x Oriole	533	669	998	2931	4117	1437	3190	3990	1619
275000	2x Oriole	533	669	998	2965	4248	1475	3235	4122	1660
315000	2x Oriole	533	669	998	2992	4354	1505	3271	4231	1695
355000	2x Oriole	533	669	998	3014	4443	1531	3300	4322	1724
395000	2x Oriole	533	669	998	3032	4517	1553	3324	4399	1748
435000	2x Oriole	533	669	998	3047	4581	1572	3344	4465	1770
475000	2x Oriole	533	669	998	3059	4637	1588	3361	4522	1788
515000	2x Oriole	533	669	998	3070	4685	1602	3376	4573	1805
555000	2x Oriole	533	669	998	3080	4728	1615	3389	4617	1819
595000	2x Oriole	533	669	998	3088	4766	1626	3400	4657	1832
635000	2x Oriole	533	669	998	3095	4800	1636	3410	4692	1844

Figura 4.55 - Variação dos esforços dinâmicos com a constante de *Spring* - 2 Condutores Oriole por fase - Vão 90 metros.



A constante de *Spring* resultante dos suportes afeta fortemente os esforços de *pinch* no caso dos condutores Rail. Como não é considerada a força $F_{f,d}$, uma vez que as condições para que ela fosse calculada não foram satisfeitas, não é possível avaliar o efeito nesta força. A força $F_{f,d}$ varia muito pouco para alterações na constante de *Spring*. Para os condutores Oriole é possível observar o efeito desta variação nas forças de *pinch* e de *drop-back*. Principalmente para o vão menor (40 metros) há um aumento considerável nestas duas forças com o aumento do valor da constante de *Spring* resultante nos suportes considerada.

Nas pesquisas realizadas, não existem muitas informações acerca de considerações sobre essa constante. O que existe são exemplos da própria norma [23], pequenas menções em bibliografia e alguns poucos resultados de ensaios em estruturas.

Observou-se das memórias de cálculo recebidas durante o estágio e durante a atuação como engenheiro que, em muitos casos, utilizou-se o valor de 100000 N/m, que é sugerido pela norma para cabos sem tracionamento, e que seria incorreto para os cabos tracionados. Em outros casos observou-se que os valores utilizados estavam fora das faixas de tensão apresentadas e sem nenhum tipo de justificativa para este fato.

Devido às dúvidas geradas com relação a este parâmetro e da falta de informação constatada, consultou-se o professor alemão, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Meyer da *Hochschule Augsburg - University of Applied Sciences*, que possui alguns trabalhos publicados na área e que cita a questão da constante de *Spring*, sobre como considerar o valor desta constante na fase de projeto da subestação. A resposta do professor foi de que valores típicos, de acordo com as tabelas apresentadas na norma, deveriam ser utilizados e os resultados avaliados para que, posteriormente, o projeto das estruturas fosse realizado. Não há uma forma de estimar a constante de *Spring* de forma mais precisa, considerando que não há informações sobre o projeto das estruturas, que representa a situação mais comum durante a fase de projeto da subestação. Desta forma, pode-se procurar informações sobre estruturas semelhantes ou avaliar os esforços para toda a faixa proposta pela norma e considerar o pior resultado, mantendo-se, desta forma, uma postura conservadora, uma vez que os esforços podem variar consideravelmente, dependendo das características da instalação, conforme pode ser observado dos resultados obtidos nos exemplos apresentados acima.

4.3.8 Variação do valor do tempo para eliminação do curto-circuito

Para análise dos esforços considerando a variação do tempo para eliminação do curto-circuito considerou-se um vão pequeno (40 metros) e um grande (90 metros) para os dois condutores analisados no item anterior: Rail e Oriole. Os demais dados considerados permanecem constantes para as análises que seguem.

Ressalta-se que o tempo para eliminação do curto-circuito adotado não influencia os resultados obtidos para os valores estáticos e, portanto, os gráficos referentes a estes esforços não serão apresentados neste item.

Tabela 4.47 - Dados utilizados para os cálculos - Variação do tempo para eliminação do curto-circuito.

		Condutor Rail	Condutor Oriole
Cadeia de isoladores	Peso (P_i)	300 [kg]	65 [kg]
	Número	2	1
	Comprimento (S_i)	6 [m]	2,75 [m]
Vão	Comprimento (V)	40/90 [m]	40/90 [m]
	Flecha (%)	3,5	3,5
Vento	Fator S_1	1,0	1,0
	Fator S_2	1,0058	1,0058
	Fator S_3	1,1	1,1
	V_0	25 [m/s]	25 [m/s]
Curto-Circuito	Constante de Spring (S)	650000 [N/m]	75000 [N/m]
	Corrente de curto-circuito (I)	63 [kA]	31,5 [kA]
	Distância entre os subcondutores (as)	0,457 [m]	0,20 [m]
	Distância entre fases (a)	8 [m]	3 [m]
	Fator de assimetria (k)	1,81	1,81
	Espaçadores	3	3

As tabelas e gráficos a seguir apresentam os resultados obtidos para os esforços dinâmicos para diversos valores de tempo de eliminação do curto-circuito para os vãos em estudo considerando quatro condutores Rail por fase ou dois condutores Oriole por fase, para vãos de 40 metros e 90 metros de comprimento.

Tabela 4.48 - Esforços para variação do tempo para eliminação do curto-circuito - 4 Condutores Rail por fase - Vão 40 metros.

Duração do Curto-circuito [s]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
0,10	4x Rail	1628	1981	2337	1670	0	11531	2169	0	12098
0,15	4x Rail	1628	1981	2337	1719	0	11531	2360	0	12098
0,20	4x Rail	1628	1981	2337	1785	0	11531	2561	0	12098
0,25	4x Rail	1628	1981	2337	1864	0	11531	2729	0	12098
0,30	4x Rail	1628	1981	2337	1951	0	11531	2830	0	12098
0,35	4x Rail	1628	1981	2337	2044	0	11531	2850	4235	12098
0,40	4x Rail	1628	1981	2337	2137	0	11531	2850	4343	12098
0,45	4x Rail	1628	1981	2337	2227	0	11531	2850	4422	12098
0,50	4x Rail	1628	1981	2337	2311	0	11531	2850	4475	12098
0,55	4x Rail	1628	1981	2337	2384	0	11531	2850	4507	12098
0,60	4x Rail	1628	1981	2337	2444	0	11531	2850	4520	12098
0,70	4x Rail	1628	1981	2337	2517	0	11531	2850	4520	12098
0,80	4x Rail	1628	1981	2337	2527	4236	11531	2850	4520	12098
0,90	4x Rail	1628	1981	2337	2527	4344	11531	2850	4520	12098
1,00	4x Rail	1628	1981	2337	2527	4424	11531	2850	4520	12098

Figura 4.56 - Variação dos esforços dinâmicos com o tempo para eliminação do curto-circuito - 4 Condutores Rail por fase - Vão 40 metros.

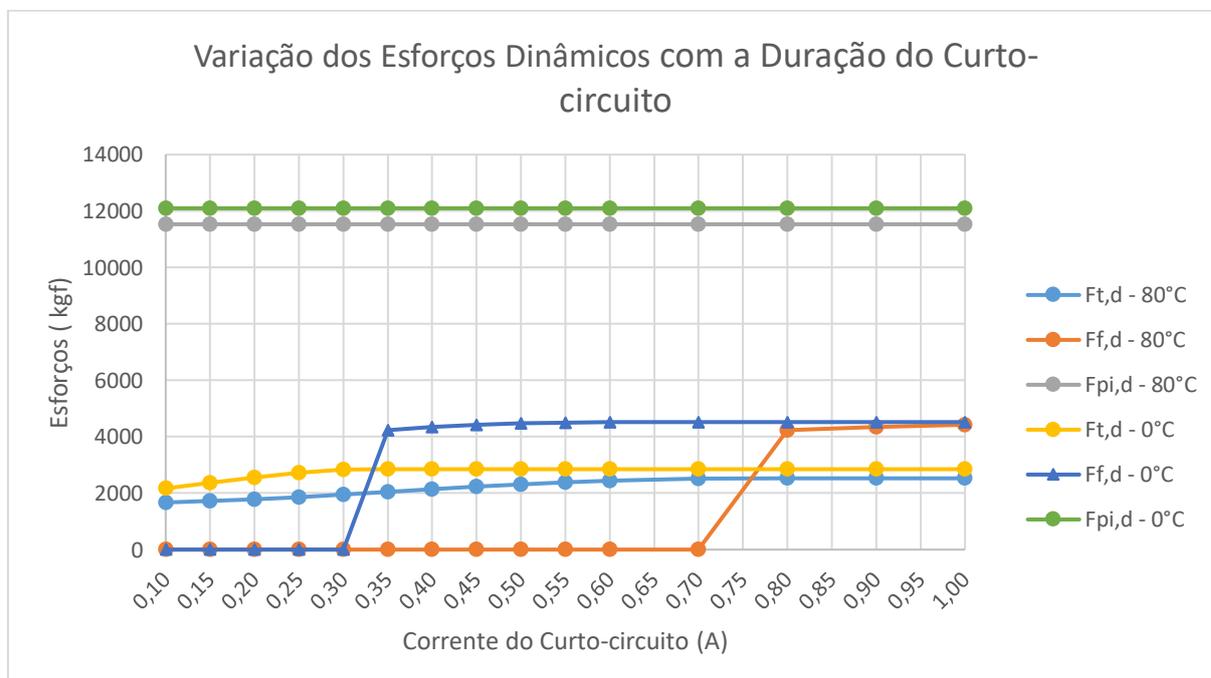


Tabela 4.49 - Esforços para variação do tempo para eliminação do curto-circuito- 4 Condutores Rail por fase -Vão 90 metros.

Duração do Curto-circuito [s]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
0,10	4x Rail	2372	3080	3741	2489	0	9699	3285	0	10766
0,15	4x Rail	2372	3080	3741	2628	0	9699	3523	0	10766
0,20	4x Rail	2372	3080	3741	2813	0	9699	3824	0	10766
0,25	4x Rail	2372	3080	3741	3032	0	9699	4163	0	10766
0,30	4x Rail	2372	3080	3741	3275	0	9699	4513	0	10766
0,35	4x Rail	2372	3080	3741	3530	0	9699	4849	0	10766
0,40	4x Rail	2372	3080	3741	3786	0	9699	5147	0	10766
0,45	4x Rail	2372	3080	3741	4030	0	9699	5388	8959	10766
0,50	4x Rail	2372	3080	3741	4251	0	9699	5555	9251	10766
0,55	4x Rail	2372	3080	3741	4440	0	9699	5638	9509	10766
0,60	4x Rail	2372	3080	3741	4589	9579	9699	5646	9732	10766
0,70	4x Rail	2372	3080	3741	4742	10061	9699	5646	10070	10766
0,80	4x Rail	2372	3080	3741	4748	10441	9699	5646	10273	10766
0,90	4x Rail	2372	3080	3741	4748	10717	9699	5646	10368	10766
1,00	4x Rail	2372	3080	3741	4748	10897	9699	5646	10397	10766

Figura 4.57 - Variação dos esforços dinâmicos com o tempo para eliminação do curto-circuito - 4 Condutores Rail por fase -Vão 90 metros.

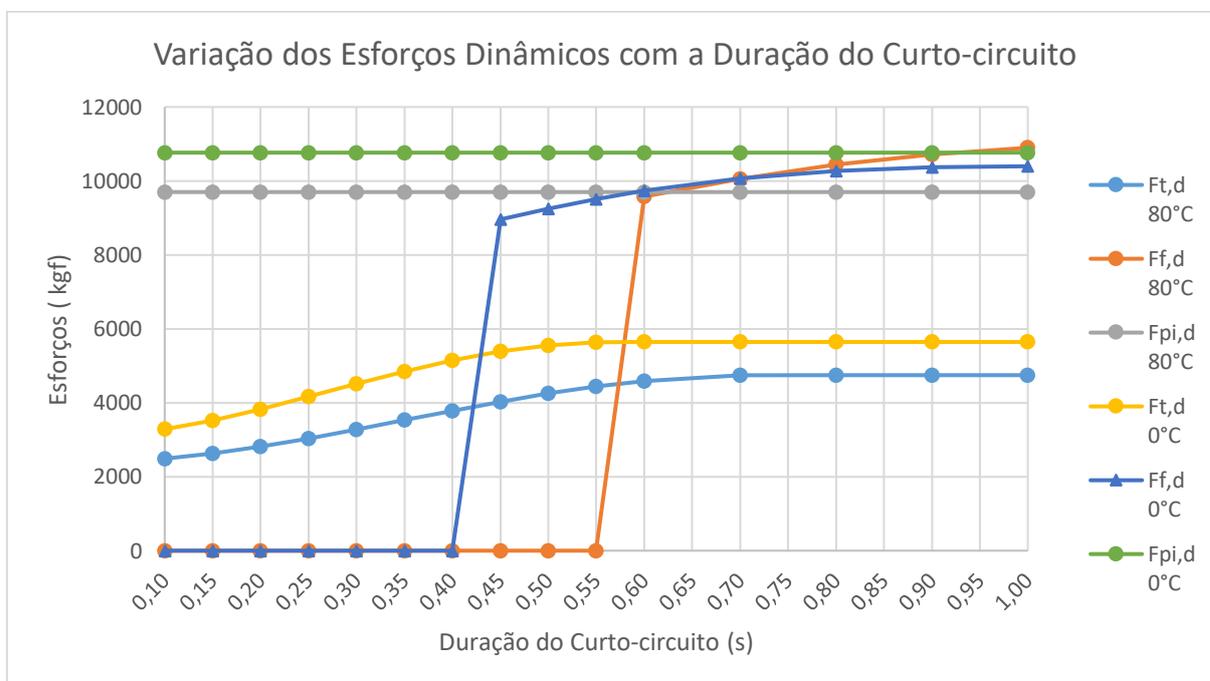


Tabela 4.50 - Esforços para variação do tempo para eliminação do curto-circuito- 2 Condutores Oriole por fase -Vão 40 metros.

Duração do Curto-circuito [s]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
0,10	2x Oriole	290	342	480	382	0	962	584	0	1024
0,15	2x Oriole	290	342	480	481	0	962	798	1013	1024
0,20	2x Oriole	290	342	480	599	887	962	1001	1151	1024
0,25	2x Oriole	290	342	480	726	972	962	1146	1317	1024
0,30	2x Oriole	290	342	480	851	1058	962	1202	1367	1024
0,35	2x Oriole	290	342	480	966	1148	962	1203	1367	1024
0,40	2x Oriole	290	342	480	1062	1263	962	1203	1367	1024
0,45	2x Oriole	290	342	480	1132	1314	962	1203	1367	1024
0,50	2x Oriole	290	342	480	1172	1314	962	1203	1367	1024
0,55	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	962	1203	1367	1024
0,60	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	962	1203	1367	1024
0,70	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	962	1203	1367	1024
0,80	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	962	1203	1367	1024
0,90	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	962	1203	1367	1024
1,00	2x Oriole	290	342	480	1180	1314	962	1203	1367	1024

Figura 4.58 - Variação dos esforços dinâmicos com o tempo para eliminação do curto-circuito - 2 Condutores Oriole por fase -Vão 40 metros.

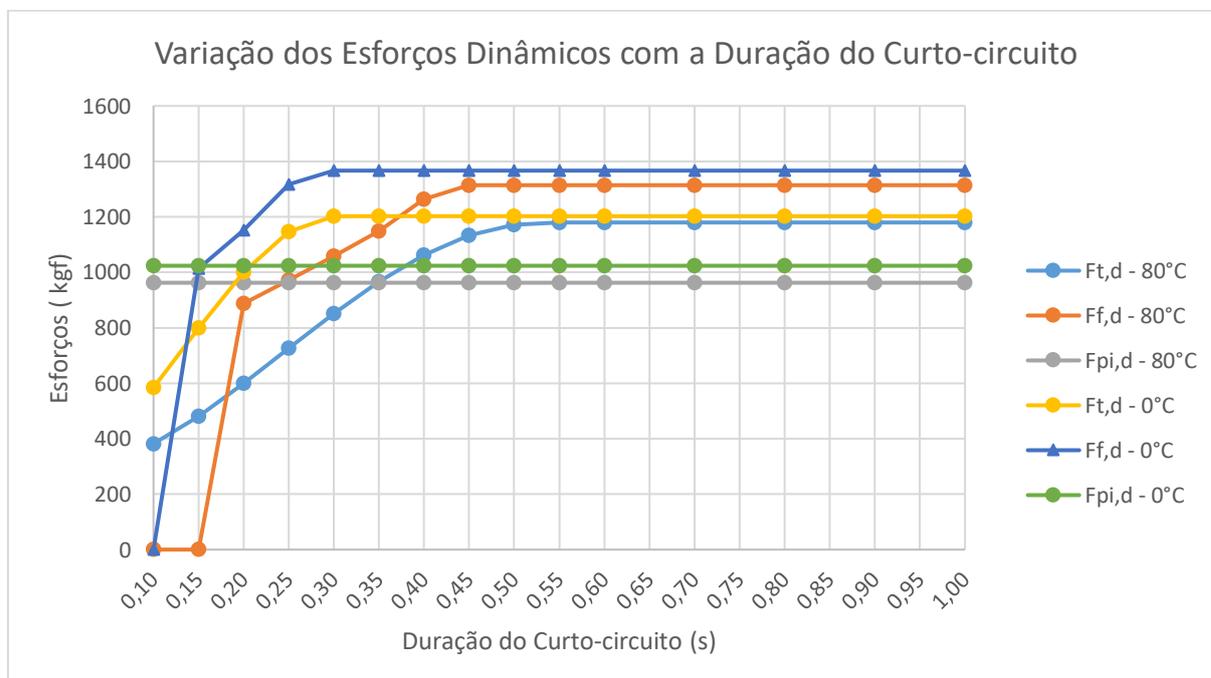
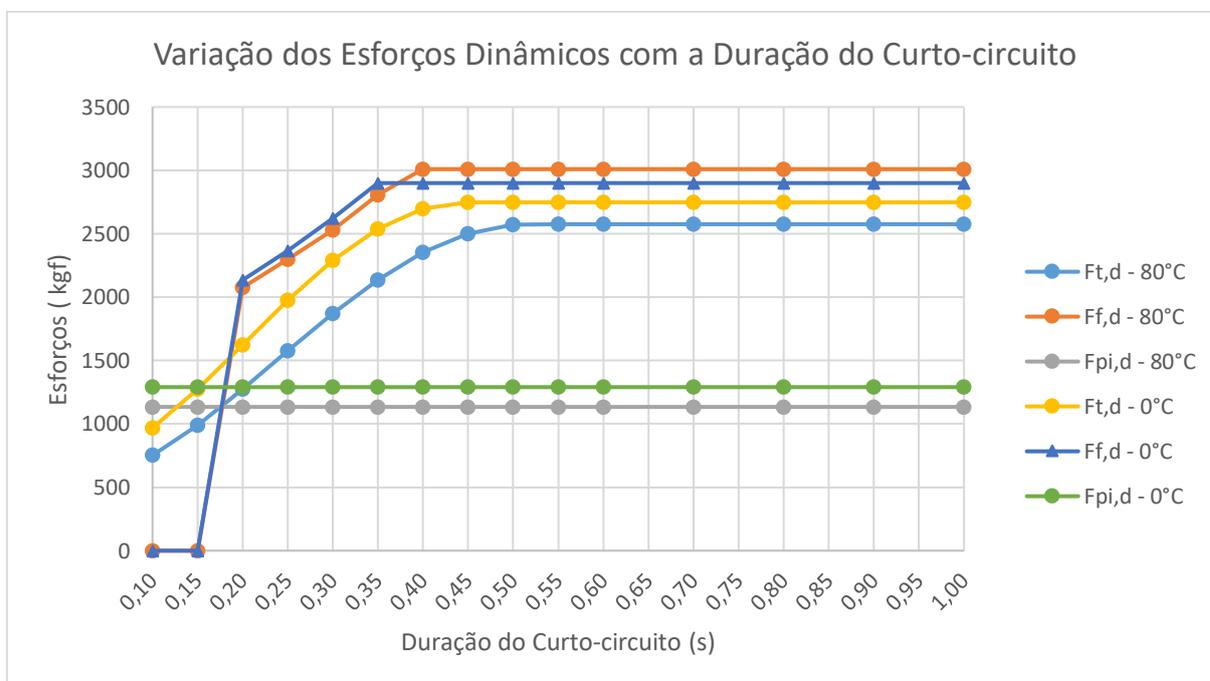


Tabela 4.51 - Esforços para variação do tempo para eliminação do curto-circuito- 2 Condutores Oriole por fase -Vão 90 metros.

Duração do Curto-circuito [s]	Condutor	Tração Estática [kgf]			Tração Dinâmica 80°C [kgf]			Tração Dinâmica 0 °C [kgf]		
		Estático 80°C	Estático 0°C	Estático Vento	Ft,d 80°C	Ff,d 80°C	Fpi,d 80°C	Ft,d 0°C	Ff,d 0°C	Fpi,d 0°C
0,10	2x Oriole	533	669	998	752	0	1134	968	0	1290
0,15	2x Oriole	533	669	998	990	0	1134	1275	0	1290
0,20	2x Oriole	533	669	998	1273	2075	1134	1624	2135	1290
0,25	2x Oriole	533	669	998	1575	2299	1134	1974	2366	1290
0,30	2x Oriole	533	669	998	1871	2530	1134	2290	2622	1290
0,35	2x Oriole	533	669	998	2137	2807	1134	2540	2900	1290
0,40	2x Oriole	533	669	998	2353	3010	1134	2698	2900	1290
0,45	2x Oriole	533	669	998	2502	3010	1134	2748	2900	1290
0,50	2x Oriole	533	669	998	2571	3010	1134	2748	2900	1290
0,55	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1134	2748	2900	1290
0,60	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1134	2748	2900	1290
0,70	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1134	2748	2900	1290
0,80	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1134	2748	2900	1290
0,90	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1134	2748	2900	1290
1,00	2x Oriole	533	669	998	2575	3010	1134	2748	2900	1290

Figura 4.59 - Variação dos esforços dinâmicos com o tempo para eliminação do curto-circuito - 2 Condutores Oriole por fase -Vão 90 metros.



O tempo de duração do curto-circuito é fundamental para consideração ou não da força de *drop-back*. Comentou-se na seção de resultados, item 4.1.5, que o tempo de duração do curto-circuito tinha sido alterado para que a força $F_{t,d}$ pudesse ser calculada, ou seja, para que as condições para considerar esta força fossem satisfeitas. Para os casos analisados, observa-se que a duração do curto-circuito afeta também a força $F_{t,d}$, em alguns casos aumentando em mais de 100% seu valor para o tempo mínimo considerado. A força de *pinch* não é afetada pela duração do curto-circuito, uma vez que seu efeito é praticamente instantâneo, no início do curto-circuito.

5 CONCLUSÃO

O trabalho apresenta uma análise completa do processo para determinação de esforços estáticos e dinâmicos em estruturas de subestações isoladas a ar com condutores flexíveis. Um exemplo de cálculo completo, passo-a-passo, é apresentado no item 4.1 e permite que o leitor acompanhe todo o procedimento e a sequência para determinação dos esforços atuantes nas estruturas. No item 4.3 uma análise de sensibilidade com variação de diversos parâmetros é apresentada e fornece ao leitor uma noção da influência de cada um desses fatores no resultado, tanto dos esforços estáticos quanto dos dinâmicos.

Observou-se ao longo dos anos de trabalho em consultoria que, apesar do tema possuir diretrizes e normas para cálculo, estas não têm sido aplicadas de forma adequada pelas empresas no território nacional. Vários foram os memoriais de cálculo analisados ao longo dos anos cujo conteúdo apresentava erros na aplicação das equações e nas considerações e, em muitos dos casos, erros na aplicação dos conceitos envolvidos. Este fato poderia resultar em estruturas subdimensionadas que colocariam em risco a integridade da instalação e, conseqüentemente, do sistema da região ou poderia resultar em estruturas sobredimensionadas que aumentariam os custos envolvidos na construção da subestação

Com relação aos resultados obtidos para aplicação das duas normas para considerações acerca dos efeitos da ação dos ventos conclui-se que, para os exemplos utilizados neste trabalho, existe diferença no resultado final, mas esta diferença é muito pequena, de apenas alguns kgf's, podendo ser desprezadas. A diferença torna-se mais significativa quando o efeito da ação dos ventos e do curto-circuito é considerado simultaneamente, mas, ressalta-se que não há recomendação na norma de cálculo de esforços dinâmicos para considerações desse tipo.

O cálculo dos esforços estáticos apresentado foi totalmente baseado em uma referência utilizada em praticamente todas as memórias de cálculo analisadas ao longo dos anos - integralmente ou com simplificações. Uma metodologia consagrada entre os projetistas. Ressalta-se com relação ao cálculo dos esforços estáticos a importância de se considerar o efeito da cadeia de isoladores para os vãos de subestações, principalmente para os vãos curtos.

Os esforços dinâmicos são os que apresentam a maior quantidade de parâmetros e que ainda representam as maiores fontes de erros e problemas nos memoriais de cálculo obtidos e analisados. São aqueles que, dependendo das considerações da empresa projetista, definirão os

esforços adotados no projeto. De acordo com as brochuras do CIGRÉ 105 [17] e 214 [19], recomenda-se que as forças $F_{t,d}$ e $F_{f,d}$ sejam consideradas como quase-estáticas e que a força $F_{pi,d}$ seja considerada como uma força impulsiva. Em contatos realizados ao longo do tempo de trabalho com fabricantes, projetistas e outras consultorias, não há consenso com relação à consideração dos esforços dinâmicos nas estruturas. Observou-se que, em alguns casos, consideram-se todas as forças como quase-estáticas, em outros os esforços dinâmicos sequer são considerados. Os valores desses esforços variam muito com a configuração do vão podendo ser de seis a sete vezes o valor do esforço estático calculado. Durante a apresentação do trabalho no XXIV SNPTEE [22], pôde-se confirmar a falta de conhecimento acerca do tema e a necessidade de informações com relação à aplicação dos esforços dinâmicos para o dimensionamento das estruturas de suporte.

Este trabalho é um passo na disseminação das informações para o cálculo e determinação dos esforços para projetos de estruturas, principalmente a determinação dos esforços dinâmicos que ainda são fontes de muitas polêmicas na fase de projeto.

5.1 Publicações

O seguinte artigo, relacionado a este trabalho, foi publicado e defendido no XXIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), em Curitiba em outubro de 2017.

SILVA, R. F.; VIOLIN, A.; NETO, E. T. W.; CARDOSO, I. P.; GUIMARÃES, A. C.; SILVA, R. R. Comparação dos Resultados Obtidos para os Esforços Devidos ao Efeito da Passagem de Correntes de Curto-Circuito em Barramentos Flexíveis de Subestações Isoladas a Ar Simultaneamente à Ação dos Ventos, Segundo as Normas NBR 5422, NBR 6123 e da NBR 8681. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 24, 2017, Curitiba.

5.2 Sugestão para Trabalhos Futuros

Acredita-se que, em breve, uma nova edição da norma para o cálculo de efeitos das correntes de curto-circuito deva ser publicada, uma vez que todas as edições desta norma foram baseadas nas brochuras do CIGRÉ e há muita informação da brochura 214 [18] que ainda não foi incorporada à norma. Desta forma, com o refinamento dos cálculos e com as novas considerações introduzidas pela brochura 214 [18], um trabalho semelhante a este, porém mais abrangente, poderá ser realizado.

Além disto, é necessário efetuar simulações em *softwares* que realizam análises utilizando elementos finitos e ensaios em laboratórios para verificação dos valores e validação das simulações e da metodologia de cálculo exposta na norma. Alguns trabalhos neste sentido foram efetuados, mas uma pesquisa abrangente, envolvendo diferentes tipos de estrutura, comprimentos dos vãos, níveis de tensão, níveis de curto-circuito, número de espaçadores, distância entre subcondutores no *bundle*, tipo de cadeias de isoladores, tempo de eliminação de falta, flecha adotada, tipos de condutores, entre outras possíveis variáveis (ferragens, conectores, *droppers* ao longo do vão, etc), não foi realizada.

Deve-se buscar um consenso com relação ao modo de considerar os esforços dinâmicos para o projeto das estruturas. Uma vez que a norma não exige que coeficientes de segurança sejam adotados para os esforços dinâmicos, este é um fator que será valor final adotado para o projeto da estrutura. A consideração correta, portanto, evita sobredimensionamentos majorando os custos da instalação e, no pior caso, subdimensionamentos que podem causar danos às estruturas da subestação e à integridade do sistema ao qual se conecta.

6 Referências Bibliográficas

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5422: Projetos de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica - Procedimento. Rio de Janeiro, 1985.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações - Procedimento. Rio de Janeiro, 1988.
- [3] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60865-1: Short-circuit currents - Calculation of effects - Part1 - Definitions and calculation methods. 3 ed. Genebra, 2011.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações de segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- [5] ALMEIDA, M. T.; SANTOS, A. H. M. Efeito da Cadeia de Isoladores sobre as Tensões e Flechas em Vãos de Subestações. III Seminário Interno de Pesquisa EFEI, 1983. Anais.
- [6] KIESSLING, F. et al. *Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction*. 1. ed (em inglês). Berlin: Springer-Verlag, 2003. 759 p.
- [7] FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão. São Paulo: Edgar Blücher, 1981. 360 p.
- [8] MIRI, A. M.; STEIN, N. Calculated Short-Circuit Behavior and Effects of a Duplex Conductor Bus Variation of the Subconductor Spacing. In: 8th INT. CONF. OPTIMIZ ELECT. ELECTRON EQUIP., Brasov, Romênia, 2002.
- [9] MANUZIO, C. An Investigation of the Forces on Bundle Conductor Spacers under Fault Conditions. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-86, n. 2, p. 166-184, 1967.
- [10] HERRMANN, B.; STEIN, N.; KIEßLING, G. Short-Circuit Effects in HV Substations with Strained Conductors Systematic Full Scale tests and a Simple Calculation Method. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 4, n. 2, p. 1021-1028, 1989.
- [11] CRAIG, D. B.; FORD, G. L. The Response of Strain Bus to Short-Circuit Currents. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-99, n. 2, p. 434-442, 1980.
- [12] ADNANI, M.; LILIEN, J. L.; LAMCHICH, M. T. Short-Circuit Mechanical Effect on bundled Conductors IEC865 Recommendations: Confrontations with Tests and Numerical Computations. In: INTERNACIONAL SYMPOSIUM ON SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN POWER SYSTEMS, 6, Liège (Bélgica), 1994.
- [13] LIMA, A. G.; CASTRO, U. E. Consideração de Elevadas Correntes de Curto-Circuito no Dimensionamento de Estruturas para Barramentos Aéreos de Subestações. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (SNPTEE), 22, 2013, Brasília.
- [14] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA (ONS) - Procedimentos de Rede - Submódulo 2.3 - Requisitos mínimos para transformadores e para subestações e seus equipamentos (atualizado em 12/2016).

- [15] LIMA, A. G. et al. Considerações sobre as exigências da ANEEL/ONS na Definição das Correntes de Curto-circuito e de Regime Permanente para Dimensionamento de Equipamentos e Instalações em Subestações da Rede Básica, In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 23, 2015, Foz do Iguaçu.
- [16] SUETA, H. E. et al. Esforços Mecânicos Provenientes de Correntes de Curto-circuito em Barramentos de Subestações. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 20, 2009, Recife.
- [17] INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS (CIGRÉ) - Brochura 105 - The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Open Air Substations (Rigid and Flexible Bus-Bars) - CIGRÉ Study Committee 23 (Substations) - Working Group 23-11 (Substations and Environment) - ESCC Task Force (Effects of Short-Circuit Currents), 1996.
- [18] INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS (CIGRÉ) - Brochura 214 - The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Open Air Substations (part II) - Working Group 23-03, 2002.
- [19] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60826: Design criteria of overhead transmission lines. 4 ed. Genebra, 2017.
- [20] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60909-0: Short-circuit currents in three-phase a.a. systems - Part0: Calculation of currents. 2 ed. Genebra, 2016.
- [21] NEXANS – Catálogo Técnico – Cabos de Alumínio Nu com Alma de Aço (Série KCMIL) - Disponível em: <<https://www.nexans.com.br>>. Acesso em Janeiro de 2018.
- [22] SILVA, R. F.; et al. Comparação dos Resultados Obtidos para os Esforços Devidos ao Efeito da Passagem de Correntes de Curto-Circuito em Barramentos Flexíveis de Subestações Isoladas a Ar Simultaneamente à Ação dos Ventos, Segundo as Normas NBR 5422, NBR 6123 e da NBR 8681. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 24, 2017, Curitiba.
- [23] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60865-2: Short-circuit currents - Calculation of effects - Part2 – Examples of Calculation. 2 ed. Genebra, 2015.