

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Lucas de Oliveira Just

**ANÁLISE DINÂMICA DE TORRES METÁLICAS TRELIÇADAS
ESTAIADAS E AUTOPORTANTES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
SUBMETIDAS À RUPTURA DE CABOS**

Santa Maria, RS

2021

Lucas de Oliveira Just

**ANÁLISE DINÂMICA DE TORRES METÁLICAS TRELIÇADAS
ESTAIADAS E AUTOPORTANTES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
SUBMETIDAS À RUPTURA DE CABOS**

Dissertação apresentada apresenta ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. João Kaminski Jr.

Santa Maria, RS
2021

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Finance Code 001

Just, Lucas

ANÁLISE DINÂMICA DE TORRES METÁLICAS TRELIÇADAS
ESTAIADAS E AUTOPORTANTES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
SUBMETIDAS À RUPTURA DE CABOS / Lucas Just.- 2021.

155 p.; 30 cm

Orientador: João Kaminski Jr.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2021

1. Análise Dinâmica 2. Torre Trelaçadas 3. Linha de
Transmissão 4. Ruptura de Cabos I. Kaminski Jr., João
II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

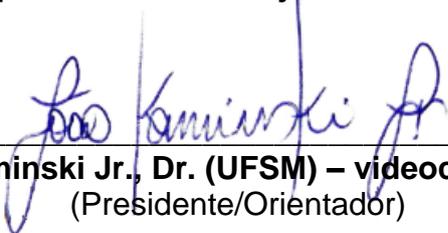
Declaro, LUCAS JUST, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Lucas de Oliveira Just

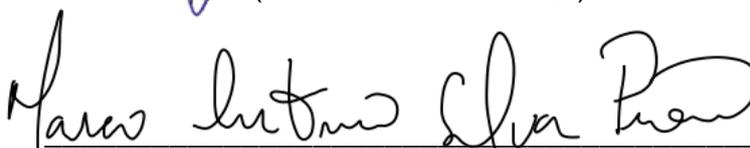
**ANÁLISE DINÂMICA DE TORRES METÁLICAS TRELIÇADAS ESTAIADAS E
AUTOPORTANTES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO SUBMETIDAS À RUPTURA
DE CABOS**

Dissertação apresentada apresenta ao
Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Civil da Universidade Federal de Santa
Maria, como requisito parcial para a
obtenção do título de **Mestre em
Engenharia Civil**.

Aprovado em 25 de junho de 2021:



João Kaminski Jr., Dr. (UFSM) – videoconferência
(Presidente/Orientador)



Marco Antônio Silva Pinheiro, Dr. (UFSM) – videoconferência



Prof. Gerson Moacyr Sisniegas Alva, Dr. (UFU) - videoconferência

DEDICATÓRIA

A meus pais, que foram meu exemplo, e à minha irmã, a quem um dia também servir de exemplo seria meu maior orgulho. À minha namorada, que foi minha grande apoiadora na reta final dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

A finalização desse trabalho foi uma realização de todos que me auxiliaram, orientaram, ajudaram e incentivaram a essa empreitada, tanto diretamente quanto indiretamente. Esse trabalho se mostrou muito mais desgastante do que o esperado, por fatores que muitas dessas pessoas não conhecem, mas mesmo assim puderam ser compreensivas a ponto de oferecer sua dedicação sem que eu possa oferecer retorno proporcional ao que me foi oferecido. Dessa forma, agradeço:

Aos meus pais, Mauro e Silvia, que sempre me incentivaram a buscar me aperfeiçoar e me dedicar aos estudos, mesmo quando essa não era minha primeira prioridade.

À minha namorada, Geisieli, que sempre me apoiou e compreendeu as minhas faltas e ausências quando a demanda de trabalho, não só acadêmico, consumia todo o meu tempo e energia.

Ao meu orientador, Prof. João Kaminski Jr., que apesar de todas as dificuldades que tive para me dedicar ao mestrado, não me deixou desistir, me apoiou, relevou, e foi flexível no que poderíamos alcançar com esse trabalho.

Aos Coordenadores do Curso de Pós Graduação, atual e passado, Prof. Luciano e Prof. Rinaldo, que me apoiaram, incentivaram e orientaram em formas de fazer com que esse trabalho fosse finalizado.

À secretária do PPGEC, Luciane, que me ajudou imensamente, sempre que precisei, sem se furtar de ir além do esperado para fazer que tudo acontecesse.

Ao prof. André Lubeck, que me ajudou, orientando e revisando o trabalho, sendo de grande importância com ideias e visões em relação ao tema.

Ao PPGEC como um todo, que possibilita que tenhamos acesso à tantas fontes de conhecimento e excelência em Santa Maria, e à CAPES, pelo auxílio financeiro em uma jornada anterior pela pós-graduação, mas que acabou se tornando esse trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

...a mente se adapta e converte qualquer obstáculo para sua ação em uma forma de alcançá-la. Aquilo que impede a ação incentiva a ação. O obstáculo se torna o caminho.

Marco Aurélio

RESUMO

ANÁLISE DINÂMICA DE TORRES METÁLICAS TRELIÇADAS ESTAIADAS E AUTOPORTANTES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO SUBMETIDAS À RUPTURA DE CABOS

AUTOR: Lucas de Oliveira Just
ORIENTADOR: João Kaminski Jr.

A confiabilidade dos sistemas de transmissão de energia elétrica é fruto, além de outros fatores, da estabilidade estrutural dos suportes que sustentam os cabos condutores e para-raios ao longo das linhas de transmissão. As estruturas de suporte, geralmente torres metálicas treliçadas, além das solicitações usuais em outras estruturas, como peso-próprio e vento, estão sujeitas a uma solicitação específica, causada pela ruptura de um ou mais cabos. Essa solicitação é de natureza dinâmica e para uma análise precisa desse evento, o método da integração direta com diferenças finitas centrais é utilizado. Neste trabalho são analisados modelos de linhas de transmissão com 5 torres, autoportantes e estaiadas, de modo a simular a interação entre suportes e cabos. Esse procedimento visa investigar a possibilidade de colapso progressivo de estruturas de suporte em uma mesma linha, fenômeno comumente chamado de efeito cascata. As solicitações obtidas com o método da integração direta são comparadas com as obtidas em uma análise estática, usual em projetos correntes. A diferença entre os resultados é avaliada do ponto de vista da segurança estrutural e da influência no dimensionamento das torres. As diferenças entre as abordagens e entre os comportamentos das duas tipologias de torre mostram que a análise estática pode não ser suficiente para uma boa representação do fenômeno da ruptura de cabo.

Palavras Chave: Linhas de Transmissão; Torres metálicas treliçadas; Análise Dinâmica.

ABSTRACT

DYNAMIC ANALYSIS OF GUYED AND SELF-SUPPORTING LATTICED STEEL TRANSMISSION LINE TOWERS SUBJECTED TO CABLE RUPTURE

AUTHOR: Lucas de Oliveira Just

ADVISOR: João Kaminski Jr.

The reliability of the electric power transmission systems is due, in addition to other factors, to the structural stability of the supports that hold the conductive cables and lightning rods along the transmission lines. The support structures, usually latticed metal towers, in addition to the usual demands on other structures, such as self-weight and wind, are subject to a specific request, caused by the rupture of one or more cables. This request is of a dynamic nature and for a precise analysis of this event, the method of direct integration with central finite differences is used. In this work, models of transmission lines with 5 towers, self-supporting and cable-stayed, are analyzed in order to simulate the interaction between supports and cables. This procedure aims to investigate the influence of dynamic analysis on the design and structural safety of the towers. The results obtained with the direct integration method are compared with those obtained in a static analysis, usual in current projects. The difference between the results is evaluated from the perspective of structural safety and the influence on the design of the towers. The differences between the approaches and between the behaviors of the two types of tower show that the static analysis may not be sufficient for a good structural representation of the cable rupture phenom.

Keywords: Transmission Lines; Latticed Steel Towers, Dynamic Analysis

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Torres colapsadas após tempestade de gelo no Canadá, em 1998	16
Figura 2.1 – Principais elementos de uma linha de transmissão	19
Figura 2.2 – Estrutura de um cabo de aço próprio para utilização como estai	22
Figura 2.3 – Carregamento típico de torres de LT de suspensão	26
Figura 2.4 – Sequência inicial de eventos pós-ruptura de cabo	30
Figura 2.5 – Tipos de colapso progressivo exemplificados em estrutura de pórtico	33
Figura 2.6 – Trecho de LT analisado	37
Figura 2.7 – Esforços normais nas barras das torres	38
Figura 2.8 – Esquema de instrumentação das torres analisadas por Clarck <i>et al.</i> (2006)	39
Figura 2.9 – Cargas nas pernas das torres ao longo do tempo	40
Figura 2.10 – Modelo de trecho de LT analisado.....	41
Figura 2.11 – Deslocamentos resultantes da análise não linear estática	42
Figura 2.12 – ISDR da Torre central do modelo	43
Figura 2.13 – Sensibilidade do modelo a variações nos parâmetros físicos e geométricos	44
Figura 2.14 – Probabilidade de falha das diagonais principais	45
Figura 3.1 – Coeficientes de Flambagem	53
Figura 3.2 – Obtenção do parâmetro w / t	55
Figura 3.3 – Dimensões das abas de um perfil cantoneira segundo a NBR 8850 (ABNT, 1985)	57
Figura 3.4 – Utilização das equações de flambagem da NBR 8850.....	59
Figura 3.5 – Dimensionamento comparado de um perfil	60
Figura 4.1 – Trecho de torre estaiada com treliçamento defasado	62
Figura 4.2 – Trecho de torre estaiada com treliçamento contínuo	63
Figura 4.3 – Vista Isométrica da torre autoportante SS	65
Figura 4.4 – Nomenclatura de barras da torre autoportante SS	66
Figura 4.5 – Vibração livre da torre autoportante.....	69
Figura 4.6 – Vista em perspectiva da torre estaiada S1E2	71
Figura 4.7 – Nomenclatura de barras da torre estaiada S1E2.....	71
Figura 4.8 – Deslocamentos em vibração livre da torre S1E2	75
Figura 4.9 – Planta esquemática do trecho de LT com cinco torres autoportantes SS.	82
Figura 4.10 – Modelo de LT com cinco torres autoportantes SS	82
Figura 4.11 – Trecho de LT composto por cinco torres estaiadas S1E2	83
Figura 4.12 – Modelo de LT com cinco torres estaiadas S1E2.....	84
Figura 5.1 – Nós de controle para observação dos deslocamentos	85
Figura 5.2 – Deslocamentos do nó 03 na direção Z - Torres autoportantes SS - Ruptura do cabo condutor superior	86
Figura 5.3 – Deslocamentos do nó 18 na direção Z - Torres autoportantes SS - Ruptura do cabo condutor superior	87
Figura 5.4 – Deslocamentos do nó 03 na direção X - Torres autoportantes SS - Ruptura cabo condutor superior.....	87
Figura 5.5 – Deslocamentos do nó 03 na direção X - Torres autoportantes SS - Ruptura cabo condutor superior	88
Figura 5.6 – Parâmetro para medida do deslocamento angular	88

Figura 5.7 – Deslocamentos angulares - Torres autoportantes SS - Ruptura cabo condutor superior	89
Figura 5.8 – Esforço axial x tempo barra 558 – Ruptura Cabo Condutor.....	90
Figura 5.9 – Esforço axial x tempo barra 605 – Ruptura Cabo Condutor.....	91
Figura 5.10 – Esforço axial x tempo barra 617 – Ruptura Cabo Condutor.....	91
Figura 5.11 – Dimensionamento das torres conforme esforços da análise dinâmica	92
Figura 5.12 – Deslocamentos do nó 03 na direção Z – Torres autoportantes SS – Ruptura de cabo para-raios	93
Figura 5.13 – Deslocamentos do nó 18 na direção Z – Torres autoportantes SS – Ruptura cabo para-raios	93
Figura 5.14 – Deslocamentos do nó 3 na direção X – Torres autoportantes SS – Ruptura Para-raios.....	94
Figura 5.15 – Deslocamentos do nó 18 na direção X – Torres autoportantes SS – Ruptura do cabo para-raios	95
Figura 5.16 – Deslocamento Angular - Torre SS – Ruptura Para-raios	96
Figura 5.17 – Esforço Axial - Barra 822 - Torre SS – Ruptura Cabo Para-raios	97
Figura 5.18 – Esforço Axial – Barra 1371 - Torre SS – Ruptura Cabo Para-raios	98
Figura 5.19 – Esforço Axial – Barra 1152 - Torre SS – Ruptura Cabo Para-raios	98
Figura 5.20 – Esforço Axial – Barra 605 - Torre SS – Ruptura Cabo Para-raios.....	99
Figura 5.21 – Dimensionamento das torres - análise dinâmica da ruptura de cabo para-raios	99
Figura 5.22 – Nós de controle para observação dos deslocamentos	101
Figura 5.23 – Deslocamentos do nó 126 na direção Z – Torres estaiadas S1E2 – Ruptura cabo condutor superior	102
Figura 5.24 – Deslocamentos do nó 129 na direção Z – Torres estaiadas S1E2 – Ruptura cabo condutor superior	102
Figura 5.25 – Deslocamentos do nó 126 na direção X – Torres estaiadas S1E2 – Ruptura cabo condutor superior	103
Figura 5.26 – Deslocamentos do nó 129 na direção X – Torres estaiadas S1E2 – Ruptura do cabo condutor superior.....	103
Figura 5.27 – Deslocamento Angular – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Condutor.....	104
Figura 5.28 – Esforço Axial – Barra 1187 – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Condutor	105
Figura 5.29 – Esforço Axial – Barra 651 – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Condutor ...	106
Figura 5.30 – Esforço Axial – Barra 1022 – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Condutor	106
Figura 5.31 – Esforço Axial – Barra 1563 – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Condutor.....	107
Figura 5.32 – Esforço Axial – Barra 1606 – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Condutor	107
Figura 5.33 – Dimensionamento das torres S1E2 – análise dinâmica da ruptura de cabo condutor	108
Figura 5.34 – Deslocamentos do nó 126 na direção Z – Torres Estaiadas S1E2 – Ruptura de cabo para-raios	109
Figura 5.35 – Deslocamentos do nó 129 na direção Z – Torres estaiadas S1E2 – Ruptura de cabo para-raios	110
Figura 5.36 – Deslocamentos do nó 126 na direção X – Torres estaiadas S1E2 – Ruptura de cabo para-raios	111

Figura 5.37 – Deslocamentos do nó 129 na direção X – Torres estaiadas S1E2 – Ruptura de cabo para-raios	111
Figura 5.38 – Deslocamentos Angulares – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Condutor	112
Figura 5.39 – Esforço Axial – Barra 1187 – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Para-raios	113
Figura 5.40 – Esforço Axial – Barra 651 – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Para-raios.....	114
Figura 5.41 – Esforço Axial – Barra 1049 – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Para-raios	114
Figura 5.42 – Esforço Axial – Barra 1432 – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Para-raios	115
Figura 5.43 – Dimensionamento das torres S1E2 – análise dinâmica da ruptura de cabo para-raios	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação de esforços oriundos da análise dinâmica e estática da torre de LT submetida à ruptura de cabo condutor	36
Tabela 3.1 – Obtenção da esbeltez efetiva segundo ASCE 10-15	56
Tabela 3.2 – Obtenção da esbeltez efetiva segundo NBR 8850	58
Tabela 3.3 – Resumo do dimensionamento das torres	60
Tabela 4.1 – Perfis estruturais da torre autoportante SS	64
Tabela 4.2 – Propriedades físicas e mecânicas do cabo condutor do tipo IBIS	64
Tabela 4.3 – Características do cabo para-raios (cordoalha de aço galvanizada)....	65
Tabela 4.4 – Cargas aplicadas no modelo estático linear da Torre SS	67
Tabela 4.5 – Dimensionamento de barras da torre SS	68
Tabela 4.6 – Picos de vibração para obtenção das frequências – Torre SS.....	69
Tabela 4.7 – Perfis estruturais das torres estaiada S1E2	70
Tabela 4.8 – Propriedades dos cabos de estai do tipo cordoalha EHS (37 fios) 13/16”	72
Tabela 4.9 – Características dos cabos condutores	72
Tabela 4.10 – Características dos cabos para-raios tipo Dotterel.....	72
Tabela 4.11 – Cargas aplicadas no modelo estático linear da torre S1E2.....	73
Tabela 4.12 – Dimensionamento da Torre Estaiada S1E2	74
Tabela 4.13 – Picos de vibração para obtenção das frequências naturais na torre S1E2.....	75
Tabela 5.1 – Barras que excedem a resistência no caso da ruptura de cabo condutor.....	90
Tabela 5.2 – Barras mais solicitadas em relação à capacidade no caso de ruptura do para-raios.....	97
Tabela 5.3 – Barras que rompem – Torre S1E2 – Ruptura Condutor	105
Tabela 5.4 – Barras que rompem – Torres S1E2 – Ruptura Cabo Para-raios	113

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	GENERALIDADES	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	17
1.3	JUSTIFICATIVA.....	17
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2	LINHAS DE TRANSMISSÃO	19
2.1	GENERALIDADES	19
2.2	COMPONENTES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO	19
2.2.1	Torres de linhas de transmissão	19
2.2.2	Cabos de estais	20
2.2.3	Cabos condutores	22
2.2.4	Cabos para-raios	24
2.3	AÇÕES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	24
2.3.1	Peso próprio	26
2.3.2	Vento	27
2.3.3	Ruptura de cabo	27
2.4	EFEITO CASCATA	30
2.4.1	Dispositivos de prevenção contra o efeito cascata	31
2.4.1.1	<i>Grampos deslizantes</i>	32
2.4.1.2	<i>Torres de ancoragem intermediária</i>	32
2.4.1.3	<i>Grampos fusíveis</i>	33
2.5	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
3	ANÁLISE ESTRUTURAL DE TORRES DE LT	46
3.1	ANÁLISE ESTÁTICA	46
3.2	ANÁLISE MODAL	46
3.3	MÉTODO DA INTEGRAÇÃO DIRETA	47
3.4	DIMENSIONAMENTO DE PERFIS DE TORRES	50
3.4.1	Dimensionamento das cantoneiras segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008)	51
3.4.2	Dimensionamento pela ASCE 10-15	52
3.4.3	Dimensionamento pela NBR 8850 (ABNT, 1985)	55
3.4.4	Estudo comparativo do dimensionamento.	58
4	METODOLOGIA	61
4.1	TORRE AUTOPORTANTE	63
4.2	DIMENSIONAMENTO DA TORRE AUTOPORTANTE SS.	65
4.3	TORRE ESTAIADA	69
4.4	DIMENSIONAMENTO DA TORRE ESTAIADA S1E2.	72
4.5	ROTINA COMPUTACIONAL GERADORA DE MODELOS	75
4.6	CATENÁRIA DE CABOS.....	77
4.7	TRECHO DE LT COM TORRES AUTOPORTANTES	80
4.8	TRECHO DE LT COM TORRES ESTAIADAS	82
5	RESULTADOS	83
5.1	ANÁLISE DO MODELO DE 5 TORRES SS COM RUPTURA DE CABO CONDUCTOR	83
5.1.1	Análise dos Deslocamentos	83

5.1.2	Deslocamentos no eixo Z	84
5.1.3	Deslocamentos no eixo X	85
5.1.4	Deslocamento Angular das Torres do Modelo de 5 Torres com Ruptura do Cabo Condutor	86
5.1.5	Barras que Rompem no Modelo de 5 Torres SS com Ruptura do Cabo Condutor	87
5.1.6	Esforço axial nas barras de torre do modelo de 5 torres SS com Ruptura do Cabo Condutor	88
5.1.7	Dimensionamento das torres SS conforme esforços da análise dinâmica da ruptura de cabo condutor	90
5.2	ANÁLISE DO MODELO DE 5 TORRES SS COM RUPTURA DO CABO PARA-RAIOS.....	90
5.2.1	Análise dos deslocamentos	90
5.2.2	Deslocamentos no Eixo Z	91
5.2.3	Deslocamentos no Eixo X	92
5.2.4	Deslocamento Angular	93
5.2.5	Barras que rompem no modelo de LT 5 torres autoportantes com ruptura do cabo para-raios	94
5.2.6	Esforço Axial nas barras do modelo de LT 5 torres autoportantes com ruptura do cabo para-raios.	95
5.2.7	Dimensionamento das torres SS conforme esforços da análise dinâmica da ruptura de cabo para-raios	97
5.3	ANÁLISE DO MODELO DE 5 TORRES S1E2 COM RUPTURA DO CABO CONDUTOR	98
5.3.1	Análise dos Deslocamentos	98
5.3.2	Deslocamentos no Eixo Z	98
5.3.3	Deslocamentos no eixo X	100
5.3.4	Deslocamentos angulares	101
5.3.5	Barras que Rompem Modelo 5 Torres S1E2 Ruptura do Cabo Condutor	102
5.3.6	Esforços nas barras de torre do modelo de 5 torres S1E2.	102
5.3.7	Dimensionamento das torres S1E2 conforme esforços da análise dinâmica da ruptura de cabo condutor	105
5.4	ANÁLISE DO MODELO DE 5 TORRES S1E2 COM RUPTURA DO CABO	106
5.4.1	Análise dos Deslocamentos	106
5.4.2	Deslocamentos no Eixo Z	106
5.4.3	Deslocamentos no eixo X	107
5.4.4	Deslocamentos angulares	108
5.4.5	Barras que rompem no modelo de torres S1E2 com ruptura do cabo para-raios	109
5.4.6	Análise dos esforços nas barras de torre S1E2 com ruptura do cabo para-raios	109
5.4.7	Dimensionamento das torres conforme esforços da análise dinâmica na hipótese de ruptura de cabo para-raios.	112
6	CONCLUSÕES	113
6.1	MEDIDAS MITIGADORAS POSSÍVEIS	114
6.2	SUGESTÃO PARA ESTUDOS POSTERIORES	114
	REFERÊNCIAS	118
	APÊNDICES	120

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

Linhas de transmissão de energia são sistemas de grande porte que conectam as fontes geradoras até as subestações de distribuição, através de cabos condutores, os quais transmitem a energia elétrica, normalmente em um sistema trifásico em corrente alternada, em alta tensão (69 kV até 138 kV) e extra alta tensão (de 230 kV até 765 kV). Após as subestações, as redes de distribuição levam a energia em tensões mais baixas (13,8 kV) até os consumidores finais. No Brasil existem também sistemas que operam em corrente contínua, como por exemplo o sistema de Itaipu, com nível de tensão de 600 kV_{DC}.

A matriz energética brasileira privilegia historicamente a geração hídrica, porém recentemente têm ocorrido grandes investimentos em geração eólica e outras fontes renováveis. Essas fontes geradoras dependem majoritariamente de condições naturais favoráveis: clima, relevo, pluviosidade, entre outras, fazendo com que seja raramente possível a instalação de usinas de geração próximas aos grandes centros consumidores. Associando esse fato à grande extensão do território brasileiro, fica clara a necessidade de percorrer distâncias consideráveis na transmissão da energia elétrica.

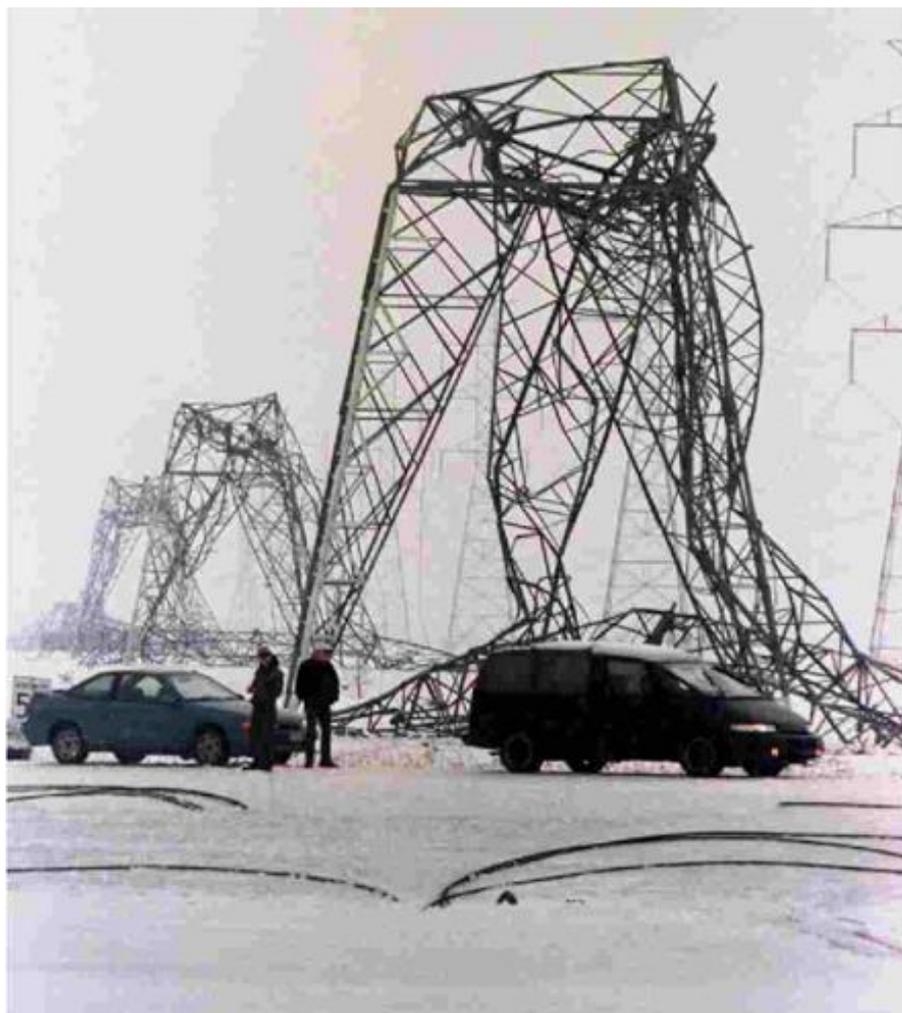
A qualidade do serviço de transmissão tem como um dos principais fatores negativos de avaliação a frequência e a duração de interrupções no fornecimento de energia. As torres ou suportes, são elementos primordiais para a confiabilidade da linha de transmissão, já que o colapso parcial ou total de um deles é sinônimo de interrupções, geralmente de grande duração, na transmissão da energia elétrica.

O efeito cascata pode ser definido como o colapso progressivo de várias torres de uma linha de transmissão, onde a ruptura de um suporte causa sucessivos colapsos de suportes vizinhos. As torres de linhas de transmissão são dimensionadas para resistir a diversas ações com um determinado nível de segurança, porém, se alguma das torres da linha ultrapassar o seu estado limite, uma nova ação, geralmente não prevista, é aplicada sobre as torres vizinhas remanescentes. A Figura 1.1 mostra um evento onde diversas torres colapsaram progressivamente após uma tempestade de gelo no Canadá.

Segundo o grupo de estudos do Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos – CIGRÉ (2012), o efeito cascata começou a acontecer assim que as primeiras linhas de transmissão foram construídas, no início do século XX. Os

recentes avanços trazidos pela análise estrutural com auxílio de computadores ainda não solucionaram completamente esse problema. Apesar dos avanços na precisão dos modelos computacionais de estruturas, a consideração das propriedades dinâmicas e das não-linearidades físicas e geométricas ainda não é usualmente realizada em projetos correntes.

Figura 1.1 – Torres colapsadas após tempestade de gelo no Canadá, em 1998



Fonte: Kordi,B apud Enviroment Canada (2016).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O principal objetivo do trabalho consiste em avaliar o efeito da ruptura de cabo em torres metálicas treliçadas de linha de transmissão (LT), estaiadas e

autoportantes, através de simulações numéricas considerando as não-linearidades geométricas, bem como comportamento dinâmico dessas estruturas, e assim comparar com os resultados da análise estática tradicional, usualmente utilizada em projeto.

1.2.2 Objetivos específicos

- Descrever os fenômenos relacionados à ruptura de cabo em torres metálicas e suas implicações nas linhas de transmissão.
- Desenvolver modelos computacionais pertinentes que representem o comportamento das torres de LT perante as ações de ruptura de cabo.
- Avaliar as solicitações decorrentes da ruptura de cabo nesses modelos comparativamente em relação às resistências dimensionadas por métodos estáticos tradicionais.
- Avaliar a implicação da consideração das solicitações dinâmicas no dimensionamento estrutural dos perfis das torres.
- Sugerir parâmetros de projeto para proteger as linhas de transmissão da ruptura decorrente dessas solicitações.

1.3 JUSTIFICATIVA

A ruptura de cabos é uma das diversas solicitações a que uma torre de LT pode estar sujeita ao longo de sua vida útil. Essa solicitação tem a peculiaridade de ter uma natureza dinâmica. A sua manifestação ocorre bruscamente, em um curto espaço de tempo em relação à vida útil da torre, e logo se dissipa, restando somente ações residuais decorrentes do desequilíbrio das cargas de peso próprio dos cabos. Apesar do curto espaço de tempo em que se manifesta, pode causar efeitos graves como ruptura de barras e até colapso de torres.

Além disso, por ser uma solicitação com direção predominantemente longitudinal em relação à LT, não afeta somente as torres que suportam o vão de cabo que rompe, mas também as torres adjacentes. Essa característica, associada à possibilidade de colapso das torres, pode vir a causar um colapso progressivo de mais

suportes, que inicialmente não seriam afetados pela ruptura do cabo. Esse colapso progressivo, no caso de torres de LT, geralmente é chamado de efeito cascata.

O efeito cascata é um fenômeno que, apesar de avanços significativos na análise estrutural de estruturas de suporte de linhas de transmissão, ainda ocorre com alguma frequência. Essas ocorrências causam grandes danos financeiros às empresas responsáveis pela transmissão energia e à sociedade em geral, pois geralmente significam um número grande de torres colapsadas e uma interrupção duradoura do fornecimento de energia elétrica.

Esse fenômeno é bastante complexo, pois o comportamento estrutural das linhas de transmissão modelada com todos os seus componentes não é usual, e não é bem representado em análises estruturais estáticas, que são as mais empregadas nos projetos de torres de LT.

Estudos mais aprofundados são necessários, no intuito de descrever esse fenômeno e facilitar a sua consideração, mesmo que simplificada, na prática usual de projeto de linhas de transmissão. A consideração desse efeito pode dar mais precisão ao projeto estrutural, fornecendo mais segurança e confiabilidade às linhas de transmissão.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho é organizado em seis capítulos. O primeiro é a introdução, no qual são declarados os objetivos e a justificativa do trabalho. O segundo capítulo, chamado linhas de transmissão, traz uma revisão bibliográfica sobre as estruturas das linhas, bem como procedimentos e parâmetros usuais de projeto. O terceiro capítulo versa sobre os métodos de análise estrutural empregados no trabalho com o intuito de alcançar os objetivos previamente definidos. O quarto capítulo descreve os modelos de torres metálicas treliçadas e as análises realizadas, e o quinto capítulo apresenta os resultados das análises e os comentários sobre cada resultado apresentado. Por fim, o sexto capítulo apresenta a conclusão do trabalho, bem como sugestões para trabalhos posteriores.

2 LINHAS DE TRANSMISSÃO

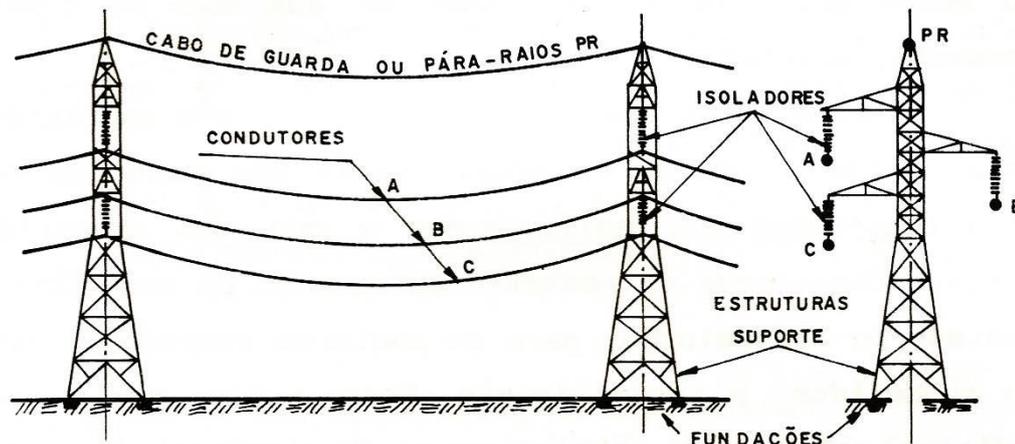
2.1 GENERALIDADES

As linhas de transmissão (LT) são estruturas de grande porte, que percorrem grandes extensões, com o objetivo de transmitir a energia elétrica das fontes geradoras até as subestações de distribuição. Os projetos de LT têm diversas particularidades, variando bastante conforme legislação local, relevo, capacidade de transmissão de energia elétrica, entre outros. Os parâmetros variáveis que mais afetam o comportamento estrutural da linha estão relacionados com o tamanho dos vãos, altura mínima útil abaixo dos cabos, o tipo e quantidade de cabos empregados e as características do vento na região de implantação da LT.

2.2 COMPONENTES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Uma linha de transmissão é composta das partes principais mostradas na Figura 2.1, as quais serão brevemente analisadas a seguir.

Figura 2.1 – Principais elementos de uma linha de transmissão



Fonte: (LABEGALINI *et al.*, 2005)

2.2.1 Torres de linhas de transmissão

As torres de linhas de transmissão são elementos de apoio para os cabos condutores e para-raios. Garantem distâncias seguras entre condutores energizados, entre esses condutores e outros elementos onde possa haver fuga de corrente, como

a própria estrutura da torre e o solo. Para garantir a segurança e a confiabilidade da LT, o seu dimensionamento deve atender para dois fatores principais, o elétrico e o mecânico (LABEGALINI *et al.*, 2005). O dimensionamento elétrico das torres visa atender as distâncias mínimas de segurança e, portanto, as dimensões básicas do suporte. Através do dimensionamento mecânico, ou estrutural, chega-se aos elementos estruturais adequados para a manutenção das características definidas pelo dimensionamento elétrico com a segurança estrutural necessária para o alcance de um nível de confiabilidade adequado para a linha.

O dimensionamento elétrico segue as definições da NBR 5422 (ABNT, 1985), sendo as dimensões mínimas de segurança dependentes basicamente da tensão elétrica a que os condutores estão sujeitos. O posicionamento dos cabos para-raios no topo das torres obedece a um ângulo de cobertura, o que define a altura mínima a que os mesmos devem ser colocados. A altura mínima livre do solo é função da tensão elétrica nos condutores e do tipo de ocupação do terreno onde a linha está localizada.

O dimensionamento estrutural das torres metálicas de LT segue os parâmetros básicos da segurança estrutural. Na prática usual de projeto deste tipo de torre é empregada a análise estática, normalmente elástica-linear, para calcular deslocamentos, esforços e tensões nas barras. A carga última é determinada baseando-se na ideia do “elo mais fraco”, ou seja, é a carga que aplicada na torre supera um determinado Estado Limite Último (ELU) de uma barra ou de uma ligação, que pode estar associado à tração ou à flambagem de barras, ao corte nos parafusos, ao rasgamento ou ao esmagamento das seções dos perfis e das chapas de ligação.

A resistência das barras e das ligações é verificada aplicando a metodologia dos estados limites, de acordo com a norma brasileira NBR 8850 (ABNT, 2003), NBR 8800 (ABNT, 2008) ou a norma americana ASCE Standard 10-15 (ASCE, 2015), nas quais, dependendo do modelo estrutural adotado, as barras são verificadas nos ELU apenas para os esforços normais de tração e compressão.

2.2.2 Cabos de estais

Os cabos de estais, presentes em torres estaiadas, são componentes estruturais de grande esbeltez, funcionando como tirantes ancorados no solo. As suas propriedades e dimensões fazem com que possuam apenas rigidez axial à tração.

Na montagem das torres, os cabos são protendidos, ou seja, são previamente tracionados, com o intuito de enrijecer a estrutura. Valores de pré-tensionamento são recomendados pela norma canadense CSA S37-01 (2011), onde são sugeridos valores da ordem de 10% da capacidade resistente nominal à tração do cabo, sendo aceitos valores entre 8 e 15%.

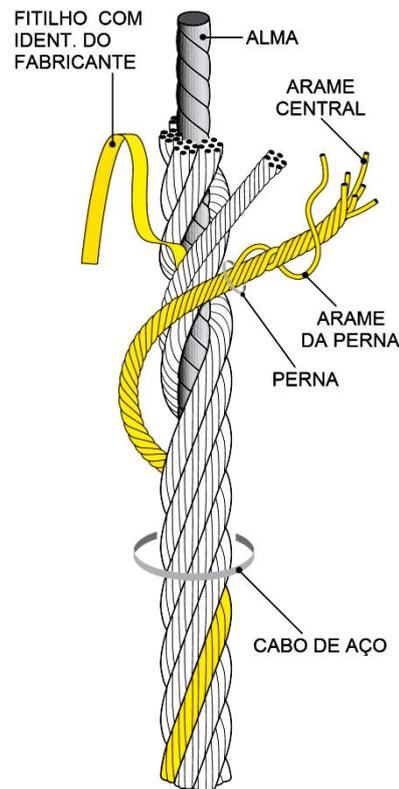
Ao serem tracionados, os cabos sofrem uma deformação estrutural permanente considerável, ocasionada pelo ajustamento dos fios em relação à sua alma. Portanto, é recomendável, para evitar parcial ou totalmente essa deformação, aplicar uma operação na fase de fabricação, denominada pré-estiramento, onde esforços de tração são aplicados no cabo. A norma americana ASCE 19-96 (1997) recomenda que todos os cabos estruturais, na sua fabricação, sejam submetidos a forças de pré-estiramento superiores a 50% da sua capacidade resistente nominal à tração. (CARLOS, 2014).

O objetivo dos estais é absorver uma parcela significativa dos esforços horizontais gerados na estrutura da torre, a fim de manter a estabilidade da mesma. Os esforços absorvidos pelos estais são transmitidos para o solo por meio de suas respectivas fundações (ancoragens), que devem resistir a um esforço de arrancamento inclinado na direção do estai equilibrando as componentes das resultantes de esforços verticais e horizontais da estrutura. O mastro central da torre absorve a outra parcela de esforços de forma axial, e os transmite à sua fundação na base.

Os cabos de estais são compostos por cordoalhas de aço galvanizado com um número específico de fios, podendo ser ainda fabricados com ligas aço-alumínio e aço-cobre melhorando suas propriedades a ambientes que possuem agressividade ao zinco. A

Figura 2.2 representa uma seção transversal usual de cabo de aço para estai. Suas características são variáveis conforme o material utilizado, área da seção transversal e número de fios. Do ponto de vista estrutural, são características fundamentais o módulo de elasticidade, a massa linear e a ação de ruptura características de cada cabo.

Figura 2.2 – Estrutura de um cabo de aço próprio para utilização como estai



Fonte: (CIMAF, 2009).

2.2.3 Cabos condutores

Os cabos condutores são os componentes que desempenham a função principal em uma LT. Seu dimensionamento é feito em vista da tensão (em Volts) e da potência (em kVA) a serem transmitidas, visando diminuir as perdas de energia que ocorrem naturalmente em materiais condutores. Apesar da função primordial dos cabos ser a de conduzir eletricidade, suas propriedades mecânicas também são muito importantes, pois os cabos estão permanentemente sujeitos a um esforço de tração decorrente da sua suspensão, assim como esforços adicionais causados pela ação do vento e variação de temperatura. Raramente cabos condutores rompem por excesso de tração, pois sua tensão de projeto é muito menor do que a de ruptura, com a finalidade de proteger os cabos da ruptura por fadiga. As falhas por fadiga ocorrem

geralmente perto da ligação dos cabos com os isoladores e são causadas pela vibração eólica a que os condutores estão sujeitos. Os materiais mais comumente utilizados na fabricação de cabos condutores são o alumínio e o cobre, este último caindo em desuso em virtude de seu alto valor comercial. Além disso, apesar do alumínio apresentar uma condutividade equivalente à 61% da do cobre, devido ao seu baixo peso específico, a relação de condutividade por massa de condutor é o dobro da do cobre. Para melhorar as propriedades mecânicas dos cabos, é comum a adoção de alma de aço envolta em fios de alumínio. Os cabos condutores mais utilizados são os descritos a seguir:

- Cabos de Alumínio (A): São confeccionados com fios de pureza 99,45%, e têmpera dura;
- Cabos de Alumínio com alma de aço (CAA): São fios ou cabos de aço envoltos por camadas concêntricas de fios de alumínio. A quantidade e a relação entre número de fios de aço e de alumínio é bastante variável conforme o fabricante;
- Ligas de Alumínio (C): Com objetivo de aumentar a resistência mecânica e a estabilidade química do alumínio, se utilizam várias misturas com diversos metais, geralmente objeto de patentes do respectivo fabricante;
- Cabos de Ligas de Alumínio (CAL): Empregam fios de liga de alumínio encordoados de forma convencional;
- Cabos de Alumínio reforçados com fios de Liga de Alumínio (CALA): Semelhantes aos CAA, porém com alma de liga de alumínio.

O problema da fadiga causada pelo efeito do vento nos cabos motivou o desenvolvimento de cabos especiais, com um comportamento mais adequado nesse quesito. São eles:

- Condutores de Alumínio suportados pelo Aço (SSAC): Semelhante ao CAA, porém com fios de alumínio de têmpera mole que não absorvem qualquer esforço mecânico. O atrito entre os fios frouxos sobre a alma dissipa energia das vibrações.
- Cabos Auto-amortecidos (CAA-SD): São construídos com fios trapezoidais e uma folga entre as camadas. O movimento entre as camadas também dissipa energia das vibrações.

- Par Trançado (Twisted Pair): Dois cabos convencionais enrolados um sobre o outro em uma espiral de passo longo (maior que dois metros), criando uma superfície irregular exposta ao vento.

2.2.4 Cabos para-raios

Os cabos para-raios têm como função principal proteger os cabos condutores de descargas atmosféricas. Eles exercem sua função conduzindo essas eventuais descargas até a torre metálica, que posteriormente as transfere ao solo através de suas fundações, funcionando como aterramento do sistema. Um ou mais cabos são colocados na parte mais alta da estrutura de suporte, respeitando o ângulo de cobertura que os mesmos devem formar em relação ao solo e aos cabos condutores que protegem.

Os tipos de cabos mais utilizados no Brasil são a cordoalha de fios de aço zincado, os cabos de alumínio com alma de aço (CAA) e os cabos aço-alumínio, que são fios de aço revestidos por espessa camada de alumínio.

2.3 AÇÕES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

As ações consideradas para análise de torres metálicas de linhas de transmissão diferem em alguns aspectos daquelas consideradas em edificações usuais. Mesmo que em alguns casos a natureza da ação seja a mesma, o procedimento de análise difere devido à resposta da estrutura a essas ações.

As ações podem ser classificadas conforme sua variabilidade no tempo em três grandes categorias, conforme a NBR 8681 (ABNT, 2003).

- Ações permanentes
- Ações variáveis
- Ações excepcionais

As ações permanentes são aquelas que não apresentam variação relevante ao longo do tempo, como o peso-próprio da estrutura da torre, dos cabos, das ligações, das ferragens e demais equipamentos.

As ações variáveis são aquelas que apresentam variação ao longo do tempo, como exemplo em torres de LT, pode ser citado o vento.

As ações excepcionais são aquelas que são aplicadas em um intervalo muito pequeno da vida útil da estrutura. Uma ação excepcional bastante característica das torres metálicas de LT é a ruptura de um ou mais cabos.

Um exemplo de ação específica em torres de LT é a de lançamento dos cabos, condutores e para-raios, durante a construção da linha.

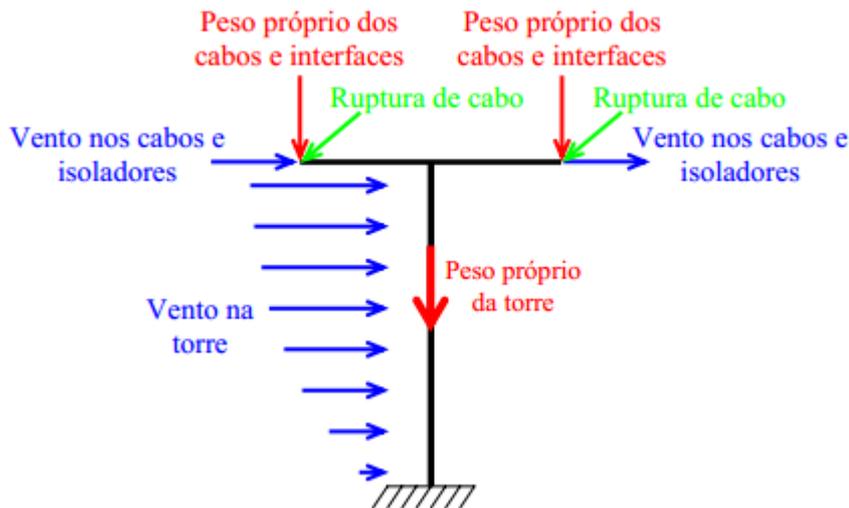
O vento é a ação preponderante no dimensionamento das torres, pois mais de 80% das barras são dimensionadas por hipóteses de ação com vento (KAMINSKI, 2007). Entretanto, nenhuma das outras ações pode ser descartada para a análise correta da estrutura.

São descritas a seguir as principais ações a serem consideradas na análise estrutural de torres metálicas de LT, as quais podem ser diferentes, dependendo da função das torres na LT.

As torres são classificadas conforme as ações principais atuantes em (LABEGALINI *et al.*, 2005):

Torres de suspensão: são dimensionadas principalmente para resistir às ações verticais, oriundas do peso próprio dos seus elementos e das cargas permanentes, e às ações horizontais, devidas ao vento e à ruptura de um dos cabos suspensos. A Figura 2.3 ilustra o carregamento típico de uma torre de suspensão. Outras ações podem ser consideradas em casos excepcionais, como acúmulo de gelo nos condutores, variação térmica, entre outras, as quais não serão abordadas nesse trabalho.

Figura 2.3 – Carregamento típico de torres de LT de suspensão.



Fonte: (KAMINSKI, 2007)

Ancoragem total: também chamadas de “terminais” são dimensionadas para resistir a ações longitudinais, paralelas à LT. Constituem o início ou o final das linhas e têm a responsabilidade de manter os cabos tracionados. Os esforços são oriundos da tensão de tração nos cabos, bem como os demais esforços atuantes na torre de suspensão. A hipótese da ruptura conjunta de todos os cabos condutores e para-raios é considerada no dimensionamento dessas torres. Nas torres de suspensão também é considerada a ruptura de todos os cabos, porém cada um em um caso de carga, não conjuntamente.

Ancoragem intermediária: são semelhantes ao tipo anterior, porém utilizadas em partes centrais das linhas, com as trações equilibradas à frente e atrás, exceto em situações de tensionamento dos cabos durante a montagem, retensionamento ou ruptura de cabos. São utilizadas geralmente em pontos de alteração de ângulo de direção da linha, ou em intervalos regulares dentro da linha.

Torres de “ângulos”: são torres dimensionadas especificamente para suportar esforços decorrentes da tração dos cabos em alinhamentos que se cruzam em ângulos bastante agudos. Seu topo geralmente é diferente das demais torres, de modo a manter a distância de segurança entre os cabos.

Também são utilizadas nomenclaturas diferenciadas para as torres de transposição e torres de derivação. As primeiras servem para alternar a posição das fases da linha de transmissão, assegurando que a queda de tensão seja uniforme ao longo da linha, enquanto as últimas são utilizadas para alimentação de algum ramal, sem necessidade de um pátio de seccionamento. Apesar de terem geometrias diferentes, as cargas atuantes são semelhantes às demais já apresentadas.

2.3.1 Peso próprio

O peso próprio é uma ação natural a ser considerada em qualquer tipo de estrutura, já que é inerente à massa dos seus elementos.

Nas torres metálicas de suspensão de uma LT, o peso dos perfis cantoneira laminados que compõem a torre representa grande parte do peso próprio a ser considerado. O peso das ligações, incluindo as chapas de ligação e os parafusos, geralmente é considerado através de um acréscimo de 10% a 18% no peso das barras, uma vez que a obtenção do valor exato é trabalhosa e não representa uma parte significativa do total de ações permanentes. A galvanização dos perfis é normalmente considerada através de um acréscimo de cerca de 2% no seu peso. Ainda deve ser considerado o peso das barras de contraventamento, ou barras redundantes, as quais existem na torre, mas não são inseridas no modelo.

O peso próprio dos cabos pode ser obtido pela multiplicação do peso linear dos mesmos pelo vão gravante (ou vão de peso), que é diferente da distância entre torres. Como a forma geométrica assumida por um cabo suspenso entre dois pontos é de uma catenária, o comprimento de cabo necessário para cobrir esse vão é maior do que a projeção do vão no plano horizontal, porém, como essa diferença é muito pequena, a multiplicação do peso linear do cabo pelo vão gravante é uma boa aproximação. O vão gravante é a distância horizontal entre os pontos que têm tangente horizontal com as catenárias dos vãos adjacentes à torre em questão.

2.3.2 Vento

A ação do vento nas linhas de transmissão, por ser a ação preponderante, requer uma consideração mais precisa do que a empregada em edificações usuais, onde em alguns casos são consideradas como secundárias.

As características mais importantes do vento para a análise estrutural das linhas de transmissão são a velocidade e a direção preponderante de vento na região onde será implantada a linha. A principal recomendação utilizada para a consideração do vento em LT é a IEC 60826 (2003), a qual é uma recomendação internacional que visa unificar os procedimentos de projeto de LT. No Brasil, as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 6123 (ABNT, 1988) - Forças devido ao vento em edificações e NBR 5422 (ABNT, 1985) - Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, são aplicáveis ao assunto.

2.3.3 Ruptura de cabo

Os cabos condutores e para-raios de LT estão sujeitos a uma tensão de tração durante toda sua vida útil, chamada tensão EDS (*Every Day Stress*).

Para os cabos condutores usuais, recomenda-se que essa tensão seja limitada em cerca de 20% da tensão chamada de UTS (*Ultimate Tension Stress*), que é a tensão última ou tensão de ruptura do cabo à tração. Ainda assim, devido a condições específicas, como a fadiga causada pelo efeito do vento, impacto de objetos, queimadas e outros eventos, a ruptura de cabos eventualmente acontece. Segundo a NBR 5422 (ABNT, 1985), o carregamento devido à ruptura de um cabo condutor é equivalente à tensão estática residual após o rompimento. Considerando o alívio causado pelo movimento da cadeia de isoladores, a ação equivalente a ser utilizada é de cerca de 16% da UTS (KAMINSKI, 2007). Já para os cabos para-raios, a tensão EDS deve ser tal que produza uma flecha máxima igual a 90% da flecha máxima dos cabos condutores que eles protegem.

Apesar de ser obviamente uma ação dinâmica, já que apresenta grande variação de intensidade em um curto período de tempo, a ruptura de cabos vem sendo tratada na prática usual de projeto como uma ação estática equivalente, aplicada na

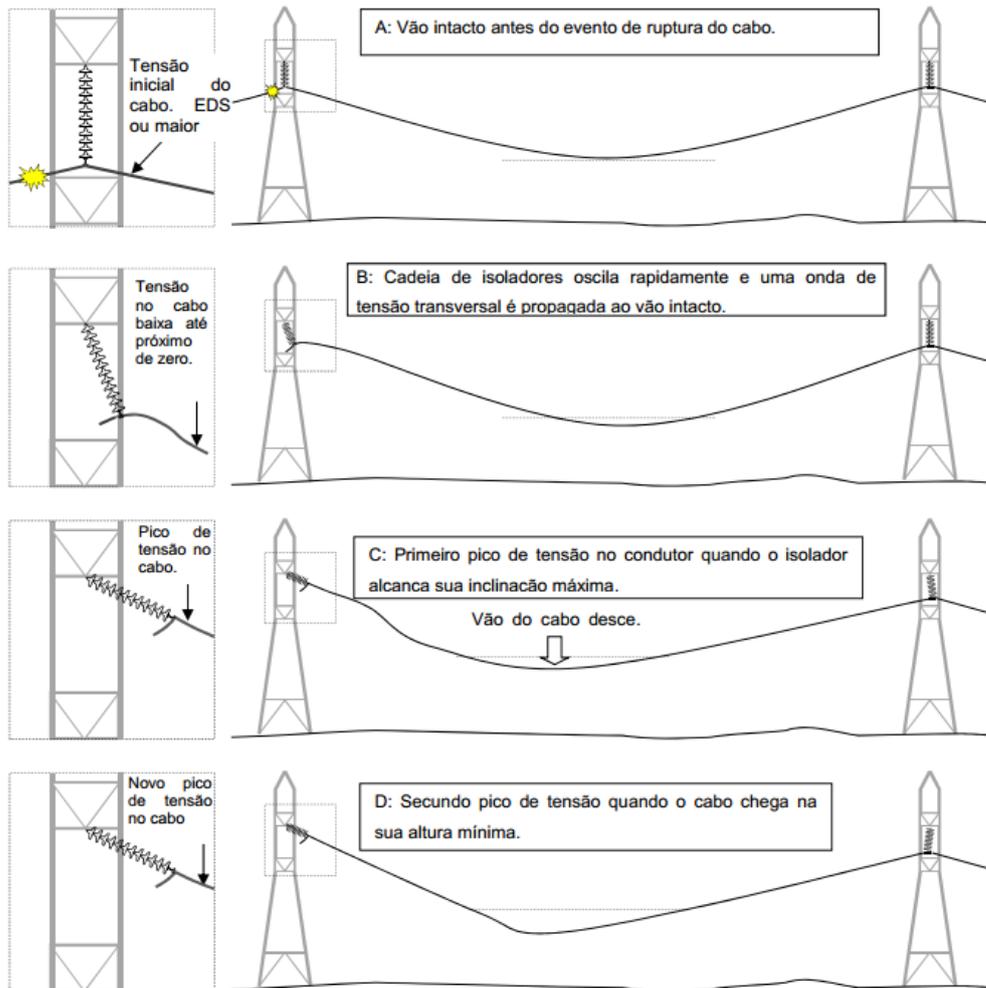
torre isolada. Diversos trabalhos vêm questionando esse tratamento e aprofundando o estudo da resposta dinâmica das torres de LT à ação da ruptura de cabos, entre eles Carlos (2014), Bentes (2013), Menezes *et al.* (2007), Clarck *et al.* (2006) entre outros.

O Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos (CIGRÉ), organização sem fins lucrativos que visa a produção e compartilhamento de estudos e práticas relacionados à produção e transmissão de energia, abordou o tema em um dos seus grupos de trabalho, dedicado a LTs. O documento *Containing Cascading Failures and Mitigating Their Effects* (CIGRÉ, 2012) descreve com detalhes os acontecimentos esperados imediatamente após a ruptura de um cabo condutor, conforme representado na

Figura 2.4.

No estágio A, a força na cadeia de isoladores é o peso de um vão de cabos, enquanto a tensão no cabo é a EDS ou superior, dependendo das circunstâncias climáticas do momento. Após a falha do condutor, a tensão no cabo cai até próximo de zero e uma rápida onda de tensão axial se propaga pelos vãos adjacentes, parte da energia é absorvida por pontos de maior resistência e parte se reflete na região da falha. Esse repentino desequilíbrio de forças faz com que o isolador oscile rapidamente em direção ao vão intacto (estágio B). O efeito dessa movimentação do isolador é duplo, primeiro uma onda transversal de tensão que se propaga mais lentamente e com menor intensidade do que a onda de tensão axial do estágio A. Além disso, parte da energia será dissipada. Quando o isolador estiver alinhado com a onda transversal que se propaga no cabo, a tensão no cabo sofrerá o seu primeiro pico (estágio C). Nessa fase a inclinação do isolador pode chegar até a 90°. A tensão então pode diminuir quando a onda refletida volta do segundo suporte. O segundo impacto do isolador é o resultado de um rápido acréscimo no comprimento de cabo do vão, igual ao comprimento da cadeia de isoladores, resultando em uma queda livre do cabo (estágio D). Quando o vão chega ao nível mais baixo, outro pico de tensão acontece, podendo ser ainda maior que o primeiro, dependendo do comprimento da cadeia de isoladores (PEABODY & MCCLURE, 2002, *apud* CIGRÉ, 2012).

Figura 2.4 – Sequência inicial de eventos pós-ruptura de cabo.



Fonte: (CIGRÉ, 2012)

2.4 EFEITO CASCATA

O efeito cascata em linhas de transmissão é um exemplo de colapso progressivo de estruturas. No documento IEC 60826 (2003) o efeito cascata é definido como “progressão não controlada de falhas, que podem se estender bastante além do ponto de falha, qualquer que seja a extensão da falha inicial”. Starossek (2009) caracteriza colapso progressivo como aquele onde há uma grande

desproporcionalidade de intensidade entre o evento desencadeador e a falha resultante.

O fenômeno do colapso progressivo ainda pode ser classificado em tipos, seguindo a nomenclatura de Starossek (2007) e exemplificando com o fenômeno análogo em linhas de transmissão:

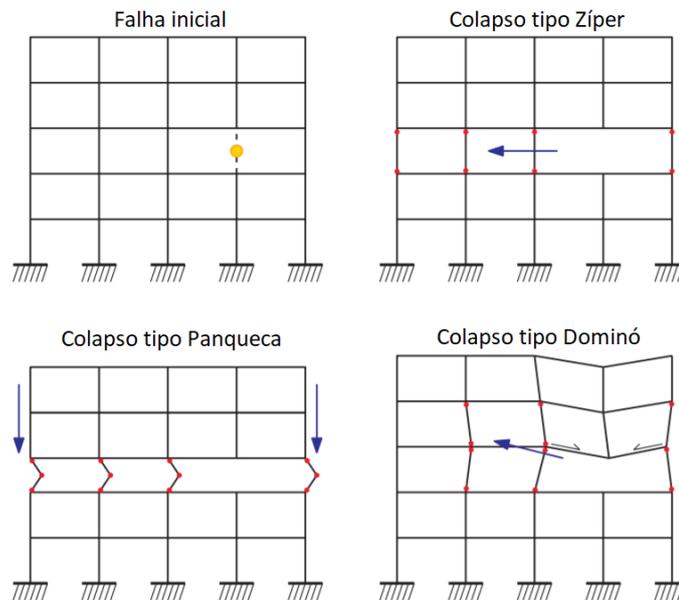
Colapso tipo “panqueca”, ou colapso vertical, é aquele onde a falha de um elemento de sustentação vertical causa o deslocamento livre dos elementos acima dele. O acúmulo de energia cinética nesse movimento é transferido para os elementos inferiores, que podem ou não falhar. Se houver mais uma falha, o processo reinicia, solicitando novamente os elementos, agora mais abaixo. Esse tipo de falha tem um exemplo célebre, o colapso das Torres Gêmeas, em Nova Iorque, onde o impacto dos aviões causou uma falha localizada em alguns dos pilares dos pavimentos atingidos. A falha desses pilares atingidos sobrecarregou os demais pilares dos mesmos pavimentos, que também falharam. Após o colapso dos pilares de todo um pavimento, os pavimentos superiores, com a aceleração gravitacional, chocaram-se com os pavimentos inferiores, causando seu colapso. Isso se repetiu até o colapso total da estrutura.

O colapso progressivo vertical de torres é análogo ao exemplo anterior, podendo ser causado pela flambagem de alguma barra dos pés das torres, causando o aumento de solicitação e posterior falha das demais até o colapso. Apesar de ser um tipo de colapso progressivo, esse exemplo não se caracteriza como efeito cascata, já que se limita a apenas um dos suportes. Se houver a propagação desse colapso para outros suportes sem que eles tenham sofrido a mesma ação que o ocasionou, então se caracteriza o efeito cascata.

O colapso tipo zíper é caracterizado pela falha de um ou mais elementos, a qual sobrecarrega os adjacentes, causando também sua falha. Ao buscar caminhos alternativos para a distribuição das cargas, a estrutura acaba concentrando forças em determinados elementos, que em seguida rompem, causando uma nova redistribuição. Um exemplo no caso de torres de transmissão é a ruptura de um isolador que, ao aumentar o vão entre os isoladores remanescentes, aumenta a carga a que estão sujeitos, podendo ocasionar a sua ruptura. No caso de colapsos tipo zíper, a orientação da ação que desencadeia o colapso não é paralela à direção de propagação do mesmo, sendo geralmente essas direções ortogonais.

No colapso tipo dominó, o tombamento de um elemento ocasiona a transformação de energia potencial em energia cinética. O movimento de corpo rígido desse elemento sofre uma desaceleração, através do choque com outro corpo similar ou através de elementos ligados entre eles. Essa energia, ao ser absorvida pelo segundo corpo, pode causar o seu colapso, e assim sucessivamente. As principais diferenças desse tipo de colapso para os anteriores são a necessidade de haver o tombamento global, com movimento de corpo rígido, de um dos elementos para desencadear o colapso progressivo e de que a direção de propagação é ortogonal à direção da maior quantidade de cargas resistidas pela estrutura. Isso significa que a falha ocorre se valendo de vulnerabilidades do sistema em relação a outras forças além das principais esperadas para a estrutura. O exemplo clássico dado por Starossek (2007) é justamente o efeito cascata em torres de LT. Os cabos funcionam como mediadores do movimento de corpo rígido das torres, transmitindo as forças advindas do colapso de uma torre para as adjacentes. O efeito cascata desse tipo pode ser tanto longitudinal quanto transversal à direção principal da linha de transmissão, considerando que as forças preponderantes nas estruturas de suporte são verticais, na direção da gravidade. Kiakojouri et. al. (2020) resumiram o estado da arte da análise e simulação de colapso progressivo de estruturas. A Figura 2.5 demonstra os tipos de colapso, previamente descritos por Starossek (2007), porém aplicados a estruturas de pórtico.

Figura 2.5 - Tipos de colapso progressivo exemplificados em estruturas de pórtico.



Fonte: Kiakoouri et. al. (2020), adaptado.

Starossek (2007) ainda descreve os tipos de colapso por instabilidade e colapso de seção, que não são característicos do efeito cascata em torres de LT abordado no presente trabalho. Ainda assim, existe a possibilidade da ocorrência de colapsos progressivos que não sejam facilmente enquadrados em apenas uma das categorias descritas acima, e sim um misto de duas ou mais delas.

2.4.1 Dispositivos de prevenção contra o efeito cascata.

A prevenção do efeito cascata em linhas de transmissão é um aspecto decisivo no projeto dessas estruturas. Diversos métodos foram desenvolvidos e testados nos últimos anos, porém a continuidade dos eventos de falha das torres evidencia que essas estratégias não alcançaram níveis de eficiência satisfatórios (CIGRÉ,2012). Tais dispositivos são brevemente descritos a seguir.

2.4.1.1 Grampos deslizantes

Uma das alternativas utilizadas para a prevenção do efeito cascata em linhas de transmissão é a inserção de grampos deslizantes nos cabos condutores. Essas

estruturas ligam o cabo condutor às cadeias de isoladores e seu objetivo é proteger as torres de solicitações estáticas residuais longitudinais à torre.

“As forças dinâmicas causadas pela falha de condutores não são eliminadas com esse dispositivo: esses picos de solicitação são muito rápidos para permitir o deslizamento dos grampos e serão transmitidos aos suportes e propagados através dos vãos.” (CIGRÉ, 2012, p.38)

O princípio desse tipo de dispositivo é de que ao superar certa magnitude de força axial, o cabo deve deslizar entre o grampo e a cadeia de isoladores, porém existem incertezas na carga crítica onde o movimento deve ocorrer, devido à dificuldade de controlar precisamente o coeficiente de atrito entre os elementos que fazem essa função, além disso, esses coeficientes podem ser alterados durante a vida útil da estrutura (CIGRÉ, 2012).

2.4.1.2 Torres de ancoragem intermediária

Nos Estados Unidos, a BPA (*Bonneville Power Administration*) utiliza uma filosofia de dimensionamento baseada no trabalho de Kempner (1997), onde é demonstrado que, sob uma situação de falha por efeito cascata, a carga longitudinal nas torres remanescentes diminui conforme aumenta o número de torres adjacentes colapsadas. As torres são dimensionadas com diferentes níveis de rigidez longitudinal, sendo posicionadas de forma a conter o dano a poucas torres em uma linha de transmissão típica. Um caso de carga baseado nas condições prováveis do rompimento de cabo, em regime EDS (*Every Day Stress*), sem vento, sem gelo, temperatura e catenária usuais, é utilizado para dimensionamento dessas torres à ruptura de cabo. São aplicados coeficientes de impacto de 1,33 nas torres maiores, que geralmente são posicionadas em locais onde há desvios na direção da linha, e 0,67 nas torres mais leves, posicionadas nos trechos retos das linhas. Dessa forma, as torres leves devem resistir somente metade da carga, colapsando em um evento extremo. Ao falhar, absorvem aproximadamente metade da energia mecânica do sistema, mantendo a falha restrita ao trecho de torres leves. Apesar das torres mais robustas serem usadas geralmente em desvios de direção, nesse caso existem limites

de distância, onde é necessária a colocação dessas torres, de modo delimitar os trechos mais sujeitos à falha.

2.4.1.3 Grampos fusíveis

No início dos anos 80 foi desenvolvido na Polônia um sistema de grampos que liberaria o cabo no caso de um acréscimo de tensão exagerado. Os primeiros testes dos protótipos não foram bem-sucedidos, e os estudos não foram continuados, pois a força de deslizamento necessária para a liberação do cabo se mostrou bastante irregular, de modo que tanto os limites superiores quanto os inferiores não foram atingidos. Segundo o comitê de estudos do CIGRÉ (2012) “alguns projetistas expressaram reservas quanto a esse sistema, citando certo grau de incerteza e um risco de que o condutor pode ser liberado em um momento inoportuno”.

2.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O comportamento mecânico das torres de linhas de transmissão é objeto de diversos estudos recentes, sendo grande parte deles dedicados à investigação das características dinâmicas dessas estruturas. Entre esses estudos, podem ser destacados os trabalhos de Kaminski *et al.* (2005), Clark *et al.* (2006), Kaminski (2007), Menezes *et al.* (2007), Bentes (2013) e Carlos (2014).

Carlos (2014) investigou o comportamento dinâmico de torres metálicas estaiadas frente à ruptura de cabos. Os modelos de torre estaiada denominadas S1E2, semelhantes aos utilizados nesse trabalho, foram submetidos à análise estática no software ANSYS e análise dinâmica através do Método da Integração Direta (MID). Ao serem comparados os esforços obtidos nas duas análises, verificou-se que a análise estática, apesar de representar com considerável precisão os esforços residuais nas barras, omite a amplificação dinâmica desses esforços. Na tabela abaixo são reproduzidos, de forma sintética, os resultados obtidos por Carlos (2014) na análise da ruptura do cabo condutor.

Tabela 2.1 – Comparação de esforços oriundos da análise dinâmica e estática da torre de LT submetida à ruptura de cabo condutor.

	Barras	Esforços em Análise Estática (kN)	Esforços em Análise Dinâmica (kN)		Amplificação Dinâmica
			Esforço Final	Pico Dinâmico	
Montantes	5	-47,49	-47,20	-51,09	7,6%
	29	-51,92	-51,26	-58,19	12,1%
	57	-53,92	-56,79	-61,63	16,2%
	93	-57,91	-56,05	-65,44	13,0%
	129	-60,75	-58,36	-69,10	13,7%
	157	-61,86	-59,25	-71,04	14,8%
	173	-62,23	-59,50	-72,31	16,2%
	181	-53,69	-50,70	-64,05	19,3%
	185	-54,02	-50,97	-64,48	19,4%
	189	-47,57	-39,88	-66,79	40,4%
	205	-29,92	-25,42	-42,66	42,6%
	213	-25,96	-22,04	-37,53	44,6%
Barras Diagonais	471	-12,68	-11,34	-15,17	19,6%
	473	-15,84	-13,78	-19,46	22,8%
	483	-17,60	-14,87	-22,18	26,0%
	491	14,06	11,43	18,80	33,7%
	492	-14,00	-11,37	-18,74	33,9%
	493	-13,69	-11,25	-18,37	34,2%
	511	10,25	8,62	14,77	44,1%
	512	-9,72	-7,89	-14,27	46,8%
	527	10,48	8,74	15,29	45,9%
	528	-9,46	-7,75	-13,75	45,3%
	535	9,12	7,45	13,36	46,5%
536	-10,82	-9,04	-15,93	47,2%	
Braços	601	-6,00	-4,46	-9,92	65,3%
	609	15,52	14,49	28,23	81,9%
Suportes Estais	559	51,02	51,61	54,85	7,5%
	564	72,89	68,90	80,51	10,4%

Fonte: (Carlos, 2014)

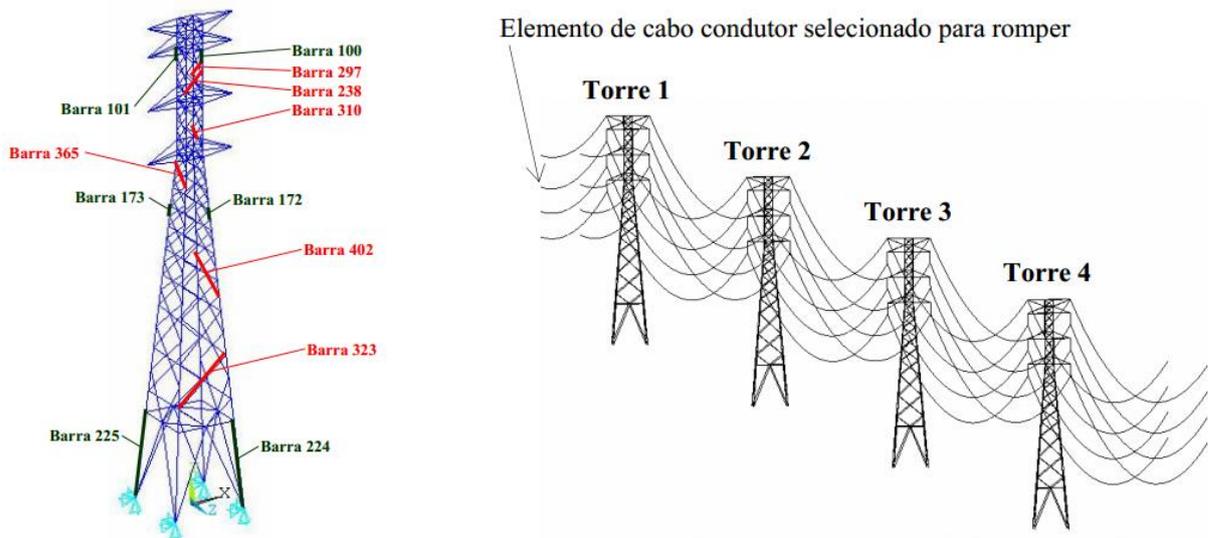
Os resultados obtidos por Carlos (2014) evidenciam que a análise dinâmica é imprescindível para a obtenção dos esforços máximos em um evento de ruptura de cabo.

Bentes (2013) realizou análises semelhantes em torres estaiadas e autoportantes. As análises foram feitas no software ANSYS, com discretização através do método dos elementos finitos, sendo utilizado o Método de Newmark para a resolução do problema dinâmico. Foram analisados modelos de linha de transmissão com dois e cinco vãos de cabos, de torres autoportantes e estaiadas. Os resultados foram semelhantes aos obtidos por Carlos (2014), sendo considerado que a análise estática, utilizando como carga longitudinal 70% da EDS do cabo condutor, apresentou bons resultados. As solicitações residuais nas barras dos modelos analisados pelo Método de Newmark com desligamento do elemento de cabo foram equivalentes às solicitações nas barras da torre isolada analisada estaticamente.

Menezes *et al.* (2007) analisaram o comportamento dinâmico de uma linha de transmissão considerando os efeitos da não-linearidade física e geométrica, além do comportamento pós-flambagem das barras das torres. Foi analisado um tramo de LT com oito torres e nove vãos de cabos. A

Figura 2.6 ilustra a torre de suspensão e o trecho de LT analisados.

Figura 2.6 – Trecho de LT analisado

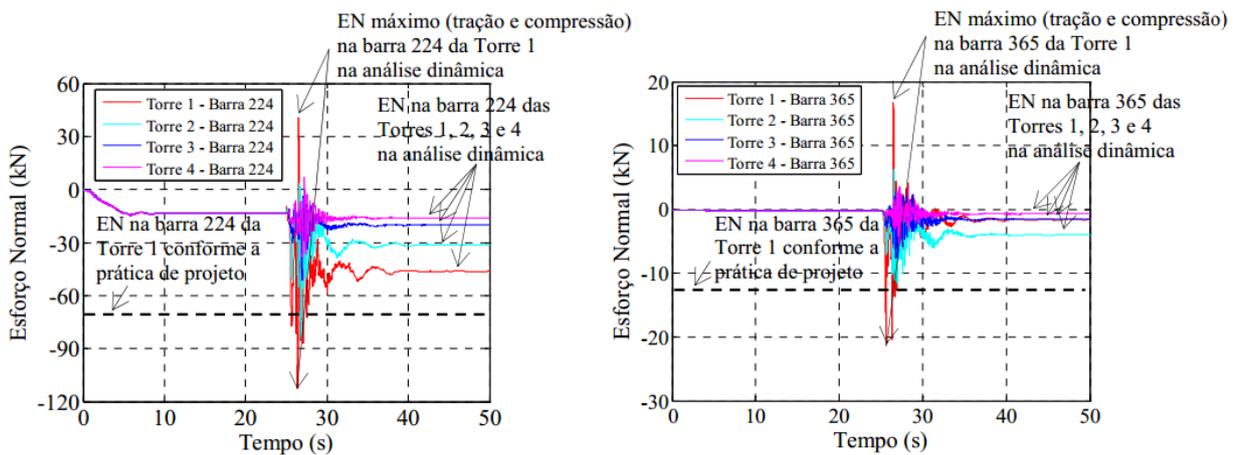


Fonte: (Menezes *et al.*, 2007).

Os picos de esforços máximos obtidos nas análises dinâmicas são da ordem de 67% maiores que os obtidos pela análise estática com as cargas equivalentes,

conforme indicado na Figura 2.7. No tramo de LT analisado, dezoito barras da torre 1 atingiram a carga de flambagem, porém com a redistribuição de esforços não houve colapso da torre. Apesar de não ocorrer o efeito cascata no modelo analisado, a resposta dinâmica das torres frente à flambagem das barras fornece boas indicações do comportamento das torres na LT frente a esse fenômeno.

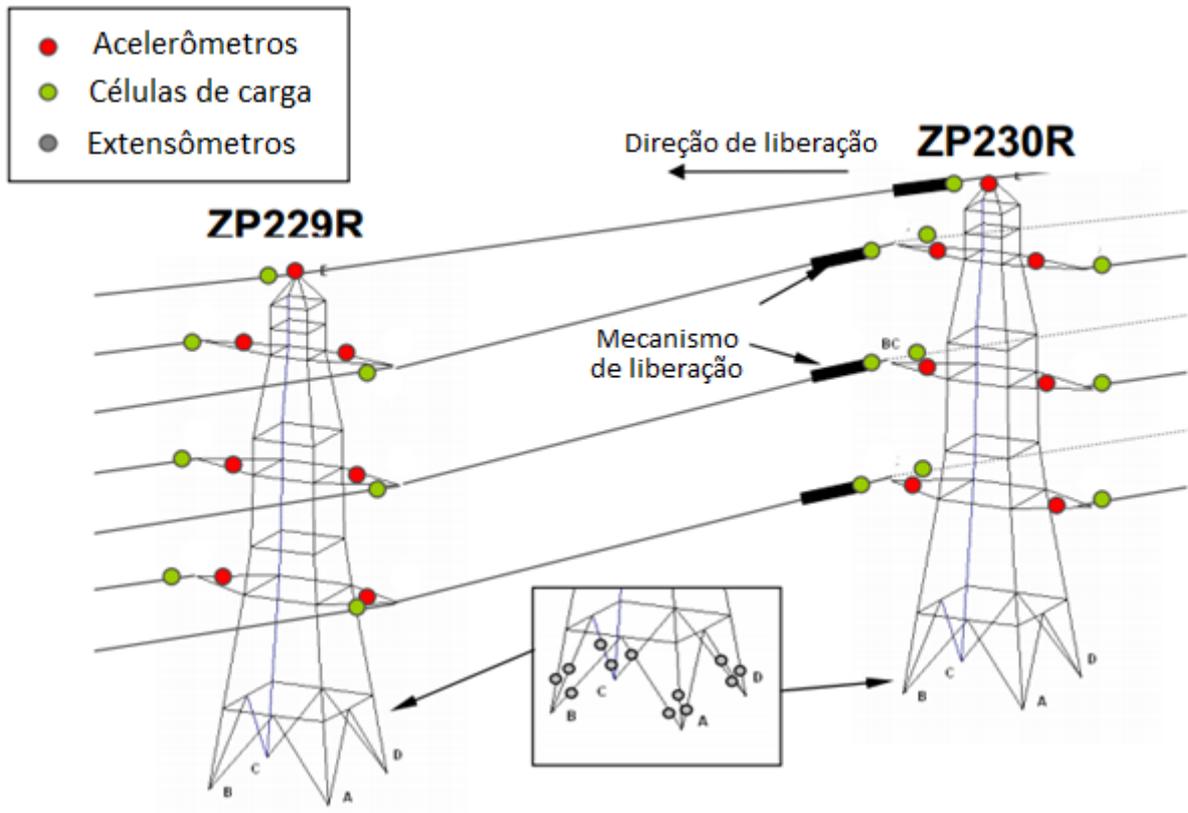
Figura 2.7 – Esforços normais nas barras das torres



Fonte: (Menezes *et al.*, 2007).

Clark *et al.* (2006) analisaram experimentalmente um segmento de linha de transmissão construído em 1958 que estava sendo desmontado em 2001 devido a novas exigências de transmissão do sistema. Quatro torres foram poupadas e utilizadas para o experimento. Elas foram monitoradas com acelerômetros nos braços e no topo da torre, células de carga nos cabos condutores e para-raios, bem como extensômetros (*strain gauges*) nas bases, como mostrado na Figura 2.8. Foi desenvolvido um sistema de liberação de carga – *Load Release Mechanism* (LRM), para possibilitar o estudo não destrutivo da resposta mecânica das torres através da simulação de eventos de ruptura de cabo.

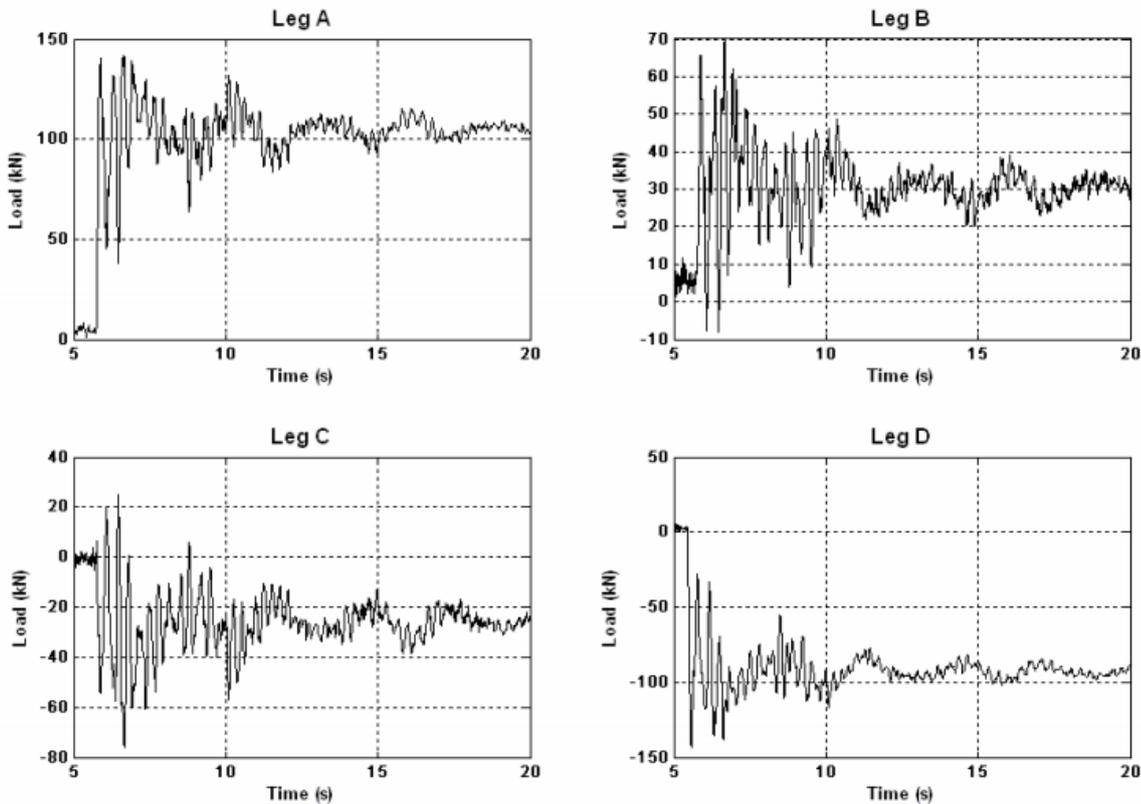
Figura 2.8 – Esquema de instrumentação das torres analisadas por Clarck *et al.* (2006)



Fonte: (Clarck *et al.*, 2006). Adaptado.

A Figura 2.9 mostra o desenvolvimento típico das cargas nas bases das torres após o evento da ruptura de cabo. As pernas A e B, mais próximas do condutor que rompe, passam imediatamente a serem tracionadas após serem puxadas pelos cabos do vão intacto em direção às demais torres. As pernas C e D, em posição oposta, correspondentemente, são comprimidas. Assim fica caracterizada uma direção de deslocamento longitudinal à linha, porém, além dessa componente, a diferença entre as tensões de tração nas pernas A e B e das tensões de compressão das pernas C e D mostram uma torção em relação ao eixo vertical da torre. A resposta longitudinal é superior em intensidade à resposta torcional e tem frequência de 3 Hz. A diferença de intensidade entre os dois modos de resposta das torres varia conforme a posição do cabo que rompe. Nos cabos mais próximos à base, como os braços têm maior abertura, a resposta torcional é mais acentuada. Na ruptura dos cabos mais elevados, devido ao maior braço de alavanca em relação ao eixo longitudinal da linha de transmissão, a componente longitudinal fica ainda mais preponderante.

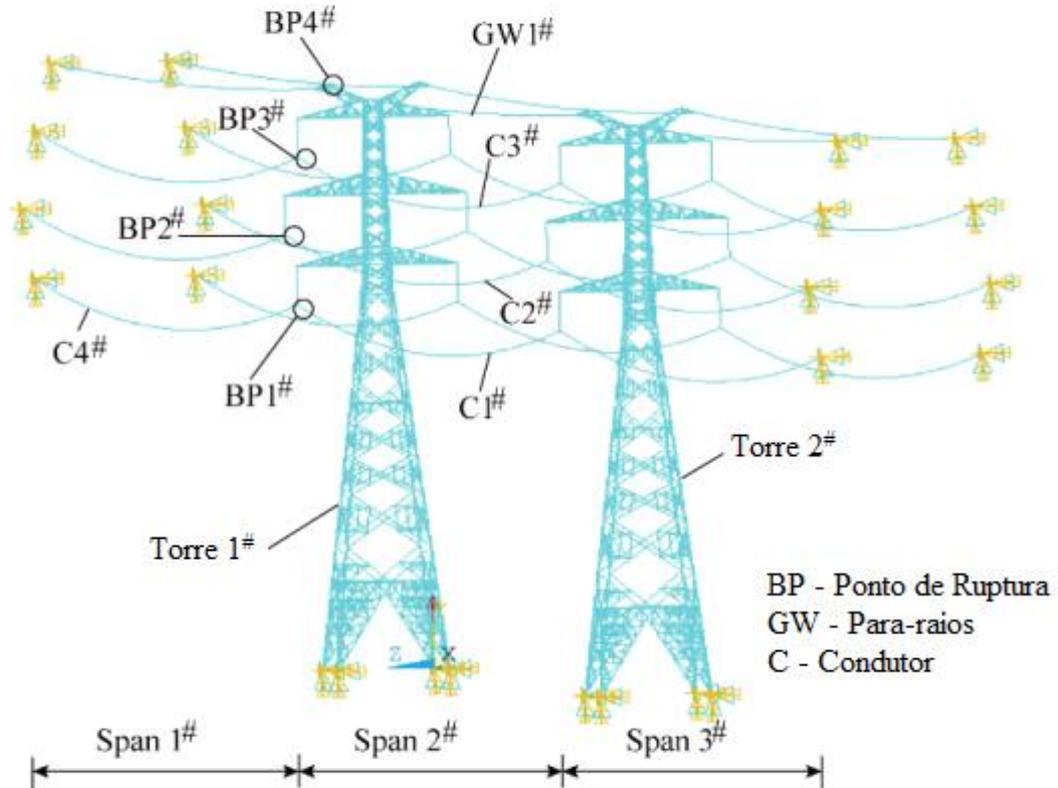
Figura 2.9 – Cargas nas pernas das torres ao longo do tempo.



Fonte: (Clarck *et al.*, 2006).

Os efeitos dinâmicos da ruptura de cabo foram avaliados em conjunto com as não-linearidades físicas por Li et. al. (2017), onde foram simuladas as rupturas de cabos de um trecho de linha de transmissão com 2 torres e 3 vãos com auxílio do programa Ansys/LS-Dyna. As torres avaliadas possuíam 99,1 metros de altura total e suportavam 6 cabos condutores e 2 cabos para-raios. Os vãos considerados foram de 300m para as análises iniciais. A configuração geral do modelo pode ser observada na Figura 2.10. Foi considerado o carregamento ocasionado pelo acúmulo de gelo sobre os cabos, situação comum em regiões da China durante tempestades de neve. Tal fenômeno já ocasionou graves danos ao sistema de transmissão de energia chinês, como em 2008, onde foram registrados danos em 2686 torres de transmissão de linhas com tensão elétrica superior a 110kV e 2576 casos de ruptura de cabo, afetando o abastecimento de energia em 90 cidades (Shao apud. Li et al., 2008).

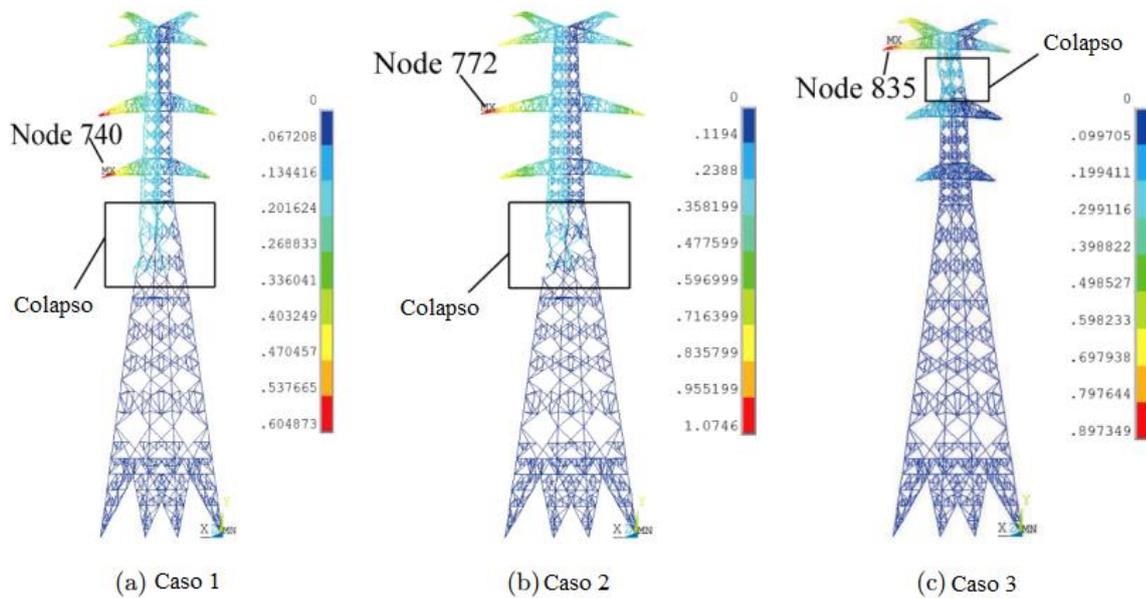
Figura 2.10 – Modelo de trecho de LT analisado.



Fonte: Li et. Al (2017) adaptado.

Foram simulados os casos isolados de ruptura de um cabo condutor em cada altura, além da ruptura de um dos cabos para-raios. A análise estática não-linear inicial, feita em modelos estruturais de torre isolada no programa Ansys, utilizando cargas estáticas equivalentes à tensão residual dos cabos rompidos, demonstrou que a ruptura do cabo para-raios não ocasionaria esforços suficientes para alcançar o regime não linear dos perfis da torre. No entanto, os 3 casos de ruptura de cabo condutor levaram à ruptura de perfis da torre. Os casos 1, 2 e 3 correspondem à ruptura do condutor mais baixo, intermediário e superior, respectivamente. Em todos os casos houve colapso da torre, sendo os dois casos de ruptura dos cabos inferiores bastante similares, na região da ligação do tronco da torre com os braços. No caso do cabo superior, o modo de ruptura é diferente, no topo da torre, conforme ilustrado na Figura 2.11.

Figura 2.11 – Deslocamentos resultantes da análise não linear estática.



Fonte: Li et al (2017). Adaptado.

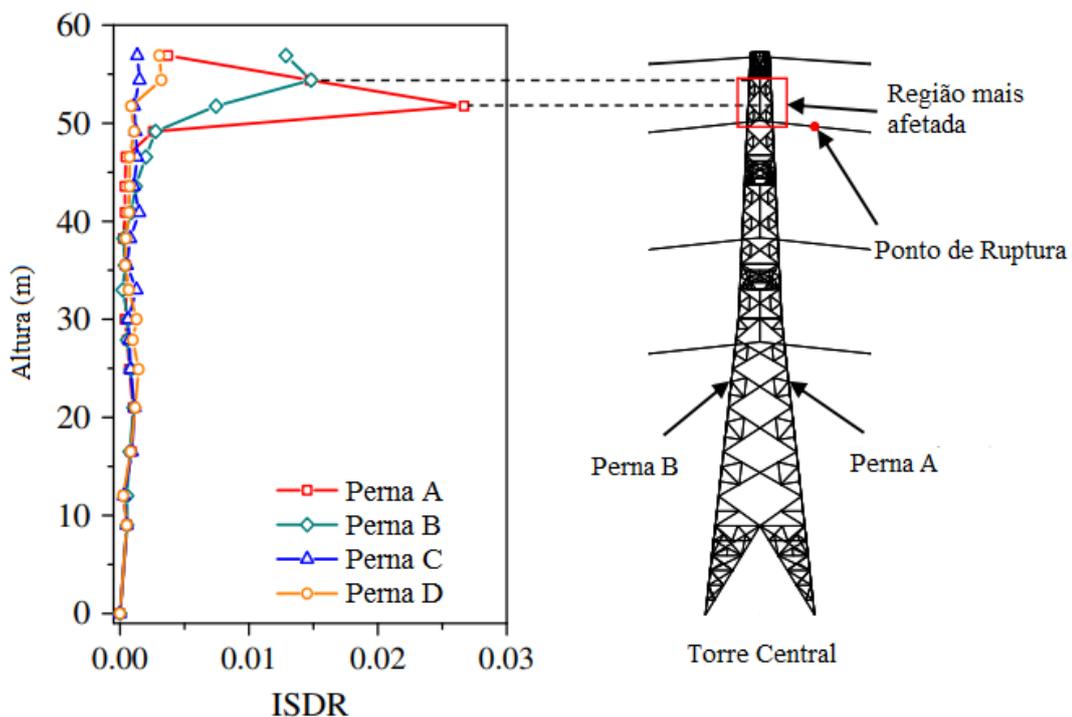
A análise dinâmica foi feita utilizando o mesmo modelo de torre, com as adaptações necessárias para utilização do módulo LS-Dyna. Foi modelado então o trecho de linha de transmissão, com cabos e isoladores, analisado estaticamente através do programa Ansys. Os resultados dessa análise foram utilizados como condição inicial para a análise dinâmica, na qual foi removido o elemento selecionado para romper e analisado o comportamento do modelo ao longo do tempo. A simulação apontou que na ruptura dos cabos inferiores há a ocorrência de colapso de ambas as torres, enquanto que na ruptura do cabo condutor superior, houve colapso somente da Torre 1, mais próxima do elemento rompido. Os autores analisaram a influência do comprimento de vãos de cabos e do comprimento da cadeia de isoladores no comportamento dinâmico do modelo de linha de transmissão, comparando diferentes modelos de linha de transmissão, porém utilizando as mesmas torres.

As conclusões do artigo apontam que o colapso da Torre 1 ocorreu devido ao desbalanceamento da tensão dos cabos após o rompimento, enquanto que a Torre 2 rompe devido ao efeito de arrasto da primeira torre que rompe. Concluiu-se também que a ruptura de cabo associada à carga de gelo pode levar ao colapso progressivo. Foi apontado que quanto maior o vão entre torres, maior o risco em relação à ruptura de cabo.

Uma análise das incertezas inerentes à análise dinâmica de torres submetidas à ruptura de cabo foi feita por Tian e Liu (2021). Os autores simularam a ruptura de cabo em um modelo de linha de transmissão composto por 5 torres de 56,9m de altura e 6 vãos de 388m, desenvolvido no programa de elementos finitos Abaqus. Os perfis da torre foram considerados como do tipo pórtico espacial, com momentos nas ligações, e o aço foi considerado com comportamento elasto-plástico perfeito. Os demais perfis, de cabos e isoladores, foram considerados como treliças espaciais, sendo os isoladores capazes de resistir tração e compressão, e os cabos somente tração. Os materiais dos cabos e isoladores foram considerados como elásticos lineares. A partir desse modelo foram realizadas análises determinísticas, de sensibilidade e probabilísticas.

A avaliação determinística do modelo consistiu na simulação da ruptura do cabo condutor superior através da remoção de um elemento em uma análise dinâmica transiente. Foram avaliados os deslocamentos através do parâmetro de razão de deslocamento intersegmento, abreviado em inglês como ISDR, que considera os deslocamentos relativos entre os nós de cada segmento da torre. Conforme ilustrado na Figura 2.12, a região mais afetada da torre é o topo, logo abaixo dos braços que sustentam o cabo que rompe.

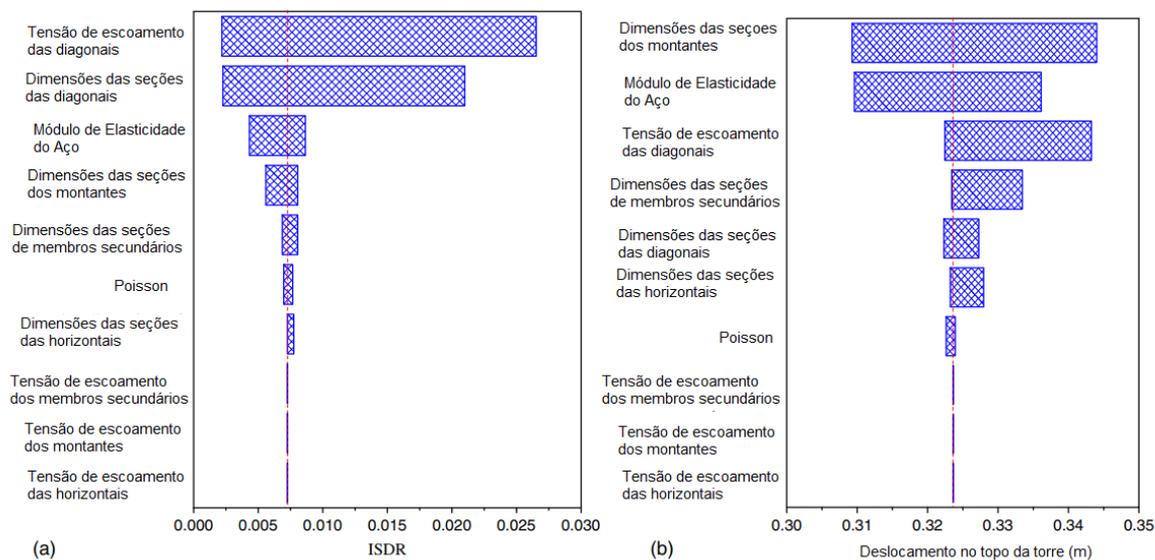
Figura 2.12 – ISDR da Torre central do modelo.



Fonte: Tian e Liu (2021) adaptado.

A análise de sensibilidade foi feita a partir da geração de diversos modelos estruturais em elementos finitos com variação do valor de parâmetros que naturalmente apresentam incertezas, apesar do uso de valores característicos prescritos por normas no dimensionamento. Os parâmetros considerados como sujeitos à variação são relacionados com a qualidade do material e as variações geométricas das peças da torre, sendo eles: tensão de escoamento, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson do aço, largura e espessura das abas das cantoneiras. Foram gerados modelos com os valores dos limites inferiores e superiores de cada parâmetro variável. Em cada modelo somente um dos parâmetros varia, sendo os demais considerados em seu valor médio. O resultado foi apresentado em função da ISDR da perna A, que havia apresentado a maior razão de deslocamentos na análise determinística previamente apresentada e do deslocamento total no topo da torre. Os resultados foram apresentados em gráficos do tipo tornado, que apresenta em ordem decrescente a influência da variação de cada parâmetro no aspecto avaliado, conforme pode ser observado na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Sensibilidade do modelo a variações nos parâmetros físicos e geométricos

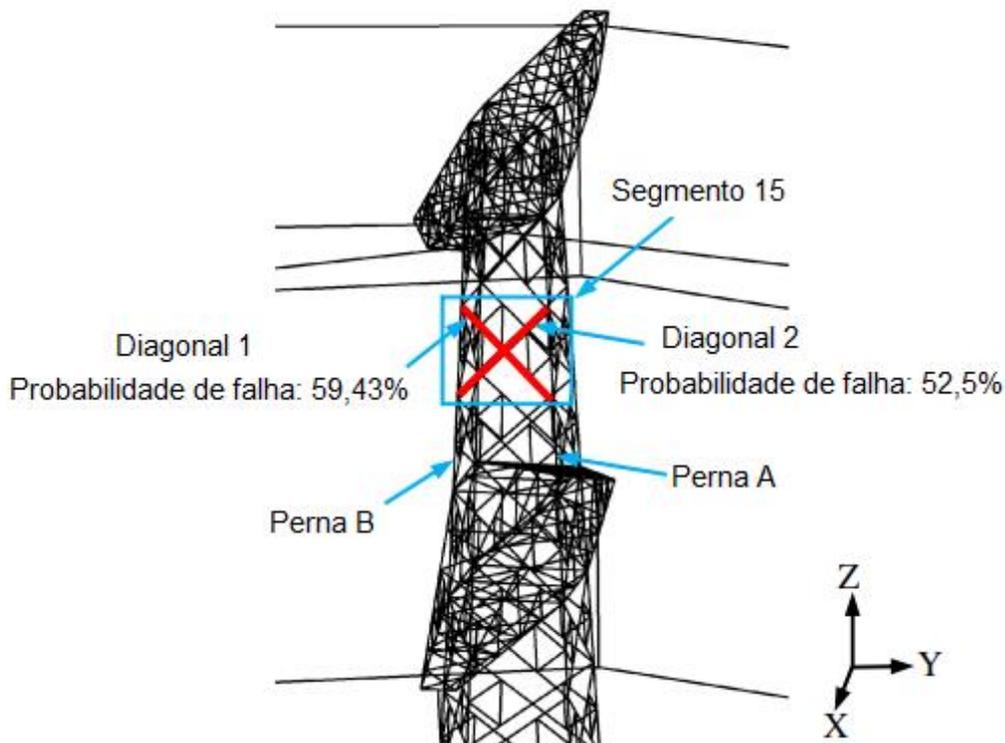


Fonte: Tian e Liu (2021) adaptado.

A análise probabilística consistiu na criação de 50 modelos diferentes de forma aleatória baseados na média, variância e distribuição de probabilidade dos parâmetros variáveis. Nesse caso, foram consideradas as propriedades físicas e geométricas como variáveis. O resultado de tal análise apontou a probabilidade de falha maior do

que 50% nas diagonais de suporte dos braços superiores, conforme pode ser observado na Figura 2.14. Segundo Tian e Liu (2021), esses valores indicam que esses membros têm grande chance de falhar, o que poderia causar a falha subsequente de outros membros.

Figura 2.14 – Probabilidade de falha das diagonais principais.



Fonte: Tian e Liu (2021) adaptado.

Os autores concluíram que o efeito da ruptura de cabo representa um dano parcial, localizado principalmente entre os braços da torre e que as diagonais são os elementos que sofrem o maior dano e são mais vulneráveis, possivelmente causando a falha de outros elementos. Concluíram também que a tensão de escoamento e as seções transversais das barras são parâmetros que afetam significativamente o comportamento dinâmico da torre no evento de ruptura de cabo. A análise dinâmica determinística é viável, e tem uma confiabilidade de aproximadamente 95%, porém as cargas estáticas equivalentes à ruptura de cabo, que na norma Chinesa são consideradas como 50% da tração de ruptura do cabo, são insuficientes e deveriam ser revisadas (Tian e Liu, 2021).

3 ANÁLISE ESTRUTURAL DE TORRES DE LT

3.1 ANÁLISE ESTÁTICA

Os modelos de torre autoportante e estaiada selecionados foram redimensionados para uma única hipótese de carga, a qual inclui a ruptura de cabo e o peso próprio. Os esforços nas barras foram obtidos através de uma análise estática linear, conforme a prática usual de projeto neste tipo de estrutura, utilizando as cargas estáticas equivalentes à ruptura de cabo e o peso próprio de todos os elementos da torre, dos isoladores e dos cabos. Esses esforços foram comparados com os obtidos na análise dinâmica no domínio do tempo. As análises estáticas foram feitas com o auxílio do software ANSYS, onde os perfis da torre foram discretizados como elementos de pórtico espacial e de treliça espacial. Os materiais foram considerados com propriedades elásticas, sem a consideração de não-linearidades físicas.

As ações estáticas equivalentes utilizadas para representar a ruptura dos cabos são definidas pela aplicação de ações horizontais correspondentes ao esforço estático residual após a ruptura. Tal esforço é equivalente à tração em regime EDS (Every Day Stress), à qual o cabo está sujeito na situação cotidiana da linha de transmissão. No caso dos cabos condutores, é aplicada uma redução de 20% nessa carga, para consideração do alívio provocado pelo movimento da cadeia de isoladores. Resulta então uma carga horizontal equivalente igual a 20% da tração de ruptura dos cabos para-raios e 16% da tração de ruptura dos cabos condutores (KAMINSKI, 2007).

3.2 ANÁLISE MODAL

A análise modal é utilizada para a obtenção dos primeiros modos e frequências de vibração das torres. Nessa análise, os modelos das torres autoportante e estaiada foram exatamente os mesmos empregados na análise estática. A análise modal foi feita com o auxílio do programa ANSYS.

As primeiras frequências naturais obtidas, na direção transversal e longitudinal da linha, foram comparadas com aquelas obtidas através do método da integração direta, para validação dos modelos desenvolvidos, os quais devem ser discretizados somente com elementos de treliça espacial.

3.3 MÉTODO DA INTEGRAÇÃO DIRETA

O método de integração direta das equações do movimento, de forma explícita e utilizando diferenças finitas centrais, foi utilizado para avaliar o comportamento das torres isoladas e das torres inseridas em um trecho de linha de transmissão submetida à ruptura de cabo, em um determinado intervalo de tempo. O método é chamado de discreto, pois analisa as coordenadas nodais da estrutura.

Nos métodos de integração numérica explícita, o vetor de coordenadas nodais da estrutura $\vec{q}(t_i)$, em um tempo discreto t_i , é determinado a partir de um conjunto de vetores $\vec{q}(t_{i-k})$, em tempos discretos anteriores t_{i-k} , com $k = 1, 2, 3, \dots, i$, sem necessidade de montar a matriz de rigidez global, nem resolver um sistema de equações lineares, em cada tempo discreto t_i .

Para resolver as equações de equilíbrio dinâmico em cada tempo t_i e obter as coordenadas nodais da estrutura $\vec{q}(t_i)$ nas direções x, y e z, é utilizado o método numérico das diferenças finitas centrais, da seguinte forma:

Partindo da equação do movimento de sistemas estruturais com múltiplos graus de liberdade:

$$M\ddot{\vec{q}}(t) + C\dot{\vec{q}}(t) + K\vec{q}(t) = \vec{F}(t) \quad (1)$$

A expressão das diferenças finitas centrais é dada por:

$$\left[\frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \right] \vec{q}_{(t+\Delta t)} = \vec{F}(t) - \left[K - \frac{2}{\Delta t^2} M \right] \vec{q}_{(t)} - \left[\frac{1}{\Delta t^2} M - \frac{1}{2\Delta t} C \right] \vec{q}_{(t-\Delta t)} \quad (2)$$

na qual:

t é o tempo;

Δt é o intervalo de tempo de integração.

Assim, conhecido o estado do sistema nos instantes (t) e $(t-\Delta t)$, é possível calcular o segundo membro da equação (2) e em seguida determinar o estado no

intervalo seguinte $\vec{q}_{(t+\Delta t)}$. Para iniciar o processo é necessário especificar as condições iniciais $\vec{q}_{(0)}$ e $\vec{\dot{q}}_{(0)}$, pois:

$$\vec{q}_{(0-\Delta t)} = \vec{q}_{(0)} - \Delta t \vec{\dot{q}}_{(0)} + \frac{\Delta t^2}{2} \vec{\ddot{q}}_{(0)} \quad (3)$$

onde o vetor $\vec{\ddot{q}}_{(0)}$, na expressão acima, pode ser calculado a partir da equação (2), escrita para $t = 0$:

$$\vec{\ddot{q}}_{(0)} = \mathbf{M}^{-1} \left(\vec{F}_{(0)} - \mathbf{C} \vec{\dot{q}}_{(0)} - \mathbf{K} \vec{q}_{(0)} \right) \quad (4)$$

A matriz de massa \mathbf{M} é diagonal e a matriz de amortecimento \mathbf{C} é considerada proporcional a \mathbf{M} , portanto, a matriz resultante que multiplica $\vec{q}_{(t+\Delta t)}$ na expressão (2) resultará também diagonal e, conseqüentemente, não haverá necessidade de se utilizar um processo de solução de sistemas de equações algébricas para determinar o vetor $\vec{q}_{(t+\Delta t)}$. Nesse caso, o método é considerado explícito, não sendo sequer necessário formar a matriz de rigidez global \mathbf{K} , pois a integração pode ser efetuada em nível de elemento, resultando numa significativa redução do esforço computacional. Assim, a expressão das diferenças finitas centrais fica:

$$q(t+\Delta t) = \frac{1}{c_1} \left[\frac{f(t) \cdot \Delta t^2}{m} + 2q(t) - c_2 \cdot q(t-\Delta t) \right] \quad (5)$$

na qual:

q é a coordenada nodal na direção x , y ou z , em metros;

f é a componente da força nodal resultante na direção correspondente, em N.

m é a massa nodal, em kg;

$$c_1 = 1 + \frac{c_m \Delta t}{2};$$

$$c_2 = 1 - \frac{c_m \Delta t}{2};$$

$c_m = \frac{c}{m}$, é uma constante;

c é o coeficiente de amortecimento viscoso proporcional à massa, em N.s/m.

A força nodal resultante $f_{(t)}$ é composta pelas forças gravitacionais $fg_{(t)}$ (peso próprio e forças nodais externas) e pelas forças axiais $fa_{(t)}$ nos elementos de treliça, devido às deformações axiais. Em cada passo de integração, ou seja, na avaliação da equação (5) para todos os nós em todas as direções, as coordenadas nodais atualizadas levam a deformações axiais dos elementos, os quais reagem com forças axiais que se opõem aos deslocamentos.

Em um elemento de treliça com rigidez axial “E.A” e comprimento “L”, a força axial em um instante de tempo t é dada por:

$$fa_{(t)} = E.A \left[\frac{L_{(t)} - L_{(0)}}{L_{(0)}} \right] \quad (6)$$

Portanto, para obter as componentes da força nodal resultante $f_{(t)}$, $fa_{(t)}$ deve ser multiplicada pelos cossenos diretores do eixo do elemento no estado deformado, e suas componentes somadas com as respectivas forças gravitacionais $fg_{(t)}$ nas direções x , y e z , atuantes no nó em consideração. É importante observar que a não linearidade geométrica é sempre considerada, uma vez que as coordenadas nodais são atualizadas em cada passo de integração.

A convergência e a exatidão da solução dependem basicamente do intervalo de tempo de integração Δt adotado. Portanto, o método é condicionalmente estável (BATHE, 1996), sendo necessário, para que a estabilidade seja assegurada, que:

$$\Delta t \leq \Delta t_{\text{crit}} = \frac{2}{\omega_n} = \frac{2}{2\pi f_n} = \frac{T_n}{\pi} \quad (7)$$

na qual:

ω_n é a maior frequência angular da estrutura com “n” graus de liberdade, em rad/s;

f_n é a correspondente frequência de vibração da estrutura, em Hz;

T_n é o menor período de vibração da estrutura, em s.

Na determinação de Δt pela expressão (7) a dificuldade consiste em calcular T_n , que corresponde ao modo de vibração associado ao maior autovalor da estrutura. Entretanto, para o caso de estruturas constituídas por elementos de treliça, o intervalo de tempo Δt pode ser determinado, de forma aproximada, por (GROEHS, 2005):

$$\Delta t \leq \Delta t_{\text{crit}} = \frac{L_{\text{min}}(0)}{\sqrt{E/\rho}} \quad (8)$$

na qual:

$L_{\text{min}}(0)$ é o comprimento inicial (em $t = 0$) da menor barra da treliça, em m;

E é o módulo de elasticidade longitudinal (Módulo de Young), em N/m^2 ;

ρ é a massa específica do material, em kg/m^3 .

Cabe salientar que o denominador em (8) é a expressão da velocidade do som no meio, representada por E e ρ .

No caso da análise de torres metálicas treliçadas, para que a estabilidade do método seja assegurada, o intervalo de tempo de integração (Δt) deve ser da ordem de 10^{-5} a 10^{-6} segundos, o que exige entre 100.000 e 1.000.000 de passos de integração para cada segundo de análise (KAMINSKI, 2007).

3.4 DIMENSIONAMENTO DOS PERFIS METÁLICOS DE TORRES

No presente trabalho foram utilizados modelos estruturais de torres treliçadas, formados por elementos de pórtico espacial e de treliça espacial. Para este tipo de estrutura, os esforços preponderantes são de tração e de compressão. Os demais esforços resultam muito pequenos e, para fins de dimensionamento, podem ser desprezados.

Nos modelos analisados estaticamente pelo programa ANSYS, os elementos utilizados são o LINK180, que é um elemento uniaxial de treliça espacial e o BEAM4,

que é um elemento uniaxial de pórtico espacial. Também foram elaborados modelos apenas com elementos de treliça espacial, a fim de comparar os resultados. Os modelos analisados pelo Método da Integração Direta apresentam apenas elementos de treliça espacial.

Assim, o dimensionamento será exclusivamente à tração e à compressão. A norma utilizada para o dimensionamento dos perfis é a NBR 8800 (ABNT, 2008) – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. No Brasil, também é muito utilizada no dimensionamento deste tipo de estrutura a norma americana ASCE 10-15 – Design of Latticed Steel Transmission Structures. Cabe salientar que a norma brasileira mais adequada para este dimensionamento, a NBR 8850 (ABNT, 2003) – Execução de Suportes Metálicos Treliçados para Linhas de Transmissão – Procedimento, foi cancelada, e que o dimensionamento segundo esta norma resultaria similar ao da norma americana.

A norma NBR 8800 (ABNT, 2008) é uma norma para dimensionamento de estruturas metálicas em geral, sendo utilizada desde dimensionamento de estruturas pesadas, como pontes e estruturas mistas, com utilização de perfis soldados ou laminados, quanto estruturas leves que utilizem perfis laminados, que é o caso das torres metálicas de linha de transmissão. Diferentemente da NBR 8800, a norma americana ASCE 10-15, bem como a norma brasileira NBR 8850 (cancelada), foram concebidas especificamente para o dimensionamento de estruturas metálicas treliçadas de linhas de transmissão. Essa diferença se reflete no dimensionamento das cantoneiras laminadas.

Além disso, as torres metálicas devem ser ensaiadas conforme a NBR 8842 (ABNT, 2010) para obtenção de sua resistência estrutural a carregamentos mecânicos.

3.4.1 Dimensionamento das cantoneiras segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008)

O dimensionamento pela NBR 8800 (ABNT, 2008) é feito com base no método dos Estados Limites. São obtidas as resistências minoradas das seções, e comparadas com a solicitação majorada.

O dimensionamento à compressão considera a redução de capacidade tanto pelos efeitos de segunda ordem local, associado à esbeltez do membro dimensionado quanto aos efeitos localizados, associados à esbeltez das abas do perfil, conforme equação (9).

$$N_{C,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (9)$$

na qual:

χ é o fator de redução associado à flambagem global (da barra como um todo);

Q é o fator de redução associado à flambagem local (das chapas que compõem o perfil);

A_g é a área bruta da seção.

O fator de redução referente à flambagem global é obtido com base nas equações (10) e (11), que consideram o índice de esbeltez reduzido λ_0 .

$$\text{para } \lambda_0 \leq 1,5, \quad \chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (10)$$

$$\text{para } \lambda_0 > 1,5, \quad \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (11)$$

O índice de esbeltez reduzido, por sua vez, é obtido com base na equação (12).

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (12)$$

na qual:

N_e é a força axial de flambagem elástica, obtida no Anexo E da NBR 8800 (ABNT, 2008), conforme as características do perfil e o eixo de inércia analisado.

O índice de esbeltez máximo para peças comprimidas é definido como $KL/r < 200$, sendo K o coeficiente de flambagem definido conforme Figura 3.1. Os valores do coeficiente variam conforme as vinculações dos nós da barra a ser dimensionada. Para peças tracionadas, o índice máximo recomendado é 300.

Figura 3.1 – Coeficientes de Flambagem

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio	Rotação e translação impedidas Rotação livre, translação impedida Rotação impedida, translação livre Rotação e translação livres					

Fonte: (ABNT, 2008)

3.4.2 Dimensionamento pela ASCE 10-15

O dimensionamento feito com base na norma americana ASCE 10-15 também parte das premissas de consideração dos efeitos da flambagem da barra e da flambagem das chapas que compõem o perfil, através da utilização de parâmetros de esbeltez do perfil e das abas. Apesar disso, a formulação adotada para obtenção dos valores de tensão admissível de compressão é diferente da NBR 8800 anteriormente apresentada.

$$F_a = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{KL/r}{C_c} \right)^2 \right] F_{cr} \text{ para } \frac{KL}{r} \leq C_c \quad (13)$$

$$F_a = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \text{ para } \frac{KL}{r} > C_c \quad (14)$$

$$C_c = \pi \sqrt{\frac{2E}{F_{cr}}} \quad (15)$$

nas quais:

F_a é a tensão admissível no perfil para cálculo da resistência à compressão;

E é o módulo de elasticidade do aço;

K é o coeficiente de flambagem;

L é o comprimento não contra ventado;

r é o raio de giração;

C_c é a razão de esbeltez para flambagem plástica;

F_{cr} é tensão de escoamento crítica.

A tensão de escoamento crítica é calculada com base no parâmetro w/t que avalia a esbeltez das abas do perfil. O valor de w/t é obtido conforme a Figura 3.2. O limite de esbeltez máximo pela ASCE 10-15 é de w/t menor ou igual a 25.

$$\text{para } \frac{w}{t} < \left(\frac{80\psi}{\sqrt{f_y}} = \frac{w}{t_{lim}} \right) \quad F_{cr} = f_y \quad (16)$$

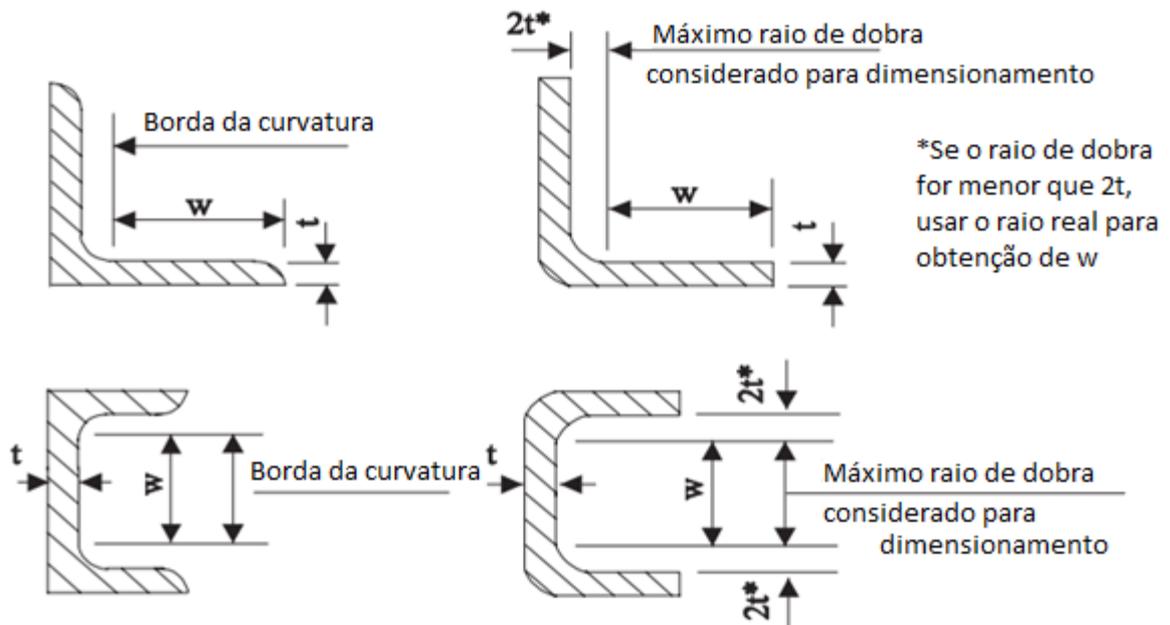
$$\text{para } \frac{80\psi}{\sqrt{f_y}} < \frac{w}{t} < \frac{144\psi}{\sqrt{f_y}} \quad F_{cr} = \left[1,677 - 0,677 \left(\frac{w/t}{w/t_{lim}} \right) \right] f_y \quad (17)$$

$$\text{para } \frac{144\psi}{\sqrt{f_y}} < \frac{w}{t} \leq 25 \quad F_{cr} = \frac{0,0332\pi^2 E}{(w/t)^2} \quad (18)$$

nas quais:

ψ é um coeficiente de ajuste de 2,62 para valores de f_y em MPa e 1,00 em ksi.

Figura 3.2 – Obtenção do parâmetro w/t .



Fonte: (ASCE, 2015)

Os limites de esbeltez KL/r são específicos para diferentes tipos de membros, conforme sua função na torre. Para montantes, a norma americana indica esbeltez limite de 150, para outros membros sujeitos à compressão, 200. Para barras redundantes, o limite é de 250 e para membros sujeitos somente à tração, a esbeltez deve ser maior do que 300 e menor do que 500. Tal limite inferior é utilizado com base na premissa de que elementos com esbeltez maior do que 300 naturalmente não resistem à esforços de compressão.

O cálculo do índice K varia conforme a vinculação aos nós e o tipo de membro. Um resumo das indicações está na Tabela 3.1.

Tais índices de esbeltez limite permitem o uso de perfis mais esbeltos e, portanto, mais leves no dimensionamento pela ASCE 10-15, em relação à NBR 8800.

Tabela 3.1 – Obtenção da esbelteza efetiva segundo ASCE 10-15.

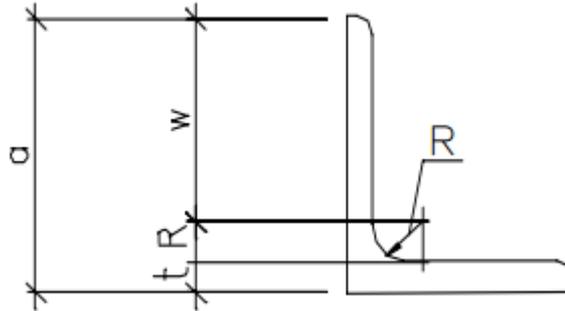
Para montantes parafusados em ambas as abas nas conexões	$KL/r = L/r;$ $0 \leq L/r \leq 150$
Para membros com cargas concêntricas em ambas extremidades.	$KL/r = L/r;$ $0 \leq L/r \leq 120$
Para membros com uma carga concêntrica uma extremidade e excentricidade normal em outra.	$KL/r = 30 + 0,75L/r;$ $0 \leq L/r \leq 120$
Para membros com excentricidade normal em ambas extremidades.	$KL/r = 60 + 0,5L/r;$ $0 \leq L/r \leq 120$
Para membros sem restrição à rotação nas duas extremidades	$KL/r = L/r;$ $120 \leq L/r \leq 200$
Para membros parcialmente restritos à rotação em uma extremidade	$KL/r = 28,6 + 0,762L/r;$ $120 \leq L/r \leq 225$
Para membros parcialmente restritos à rotação em ambas extremidades	$KL/r = 46,2 + 0,615L/r;$ $120 \leq L/r \leq 250$
Para barras redundantes sem restrição a rotação em ambas extremidades	$KL/r = L/r;$ $120 \leq L/r \leq 250$
Para barras redundantes com restrição parcial à rotação em uma das extremidades	$KL/r = 28,6 + 0,762L/r;$ $120 \leq L/r \leq 290$
Para barras redundantes com restrição parcial à rotação em ambas extremidades	$KL/r = 46,2 + 0,615L/r;$ $120 \leq L/r \leq 330$

Fonte: (ASCE 10-15)

3.4.3 Dimensionamento pela NBR 8850 (ABNT, 1985)

Embora já tenha sido cancelada, a seguir é apresentado o dimensionamento pela NBR 8850, a qual apresenta uma abordagem similar à ASCE 10-15, tanto em relação à formulação quanto aos limites de esbelteza. As equações (13), (14) e (15) são idênticas em ambas as normas. Para obtenção do parâmetro de esbelteza das abas também há uma abordagem análoga, conforme equações 19 a 21 e Figura 3.3.

Figura 3.3 – Dimensões das abas de um perfil cantoneira segundo a NBR 8850 (ABNT, 1985).



Fonte: NBR 8850 (ABNT, 1985)

As equações 19 a 21 são utilizadas para obtenção da tensão admissível no aço das cantoneiras F_{cr} , conforme os parâmetros de esbeltez das abas.

$$\text{para } \frac{w}{t} < \left(0,470 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \frac{w}{t_{lim}} \right) \quad F_{cr} = f_y \quad (19)$$

$$\text{para } 0,470 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{w}{t} < 0,846 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad F_{cr} = \left[1,677 - 0,677 \left(\frac{w/t}{w/t_{lim}} \right) \right] f_y \quad (20)$$

$$\text{para } 0,846 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{w}{t} \leq 25 \quad F_{cr} = \frac{0,3276E}{(w/t)^2} \quad (21)$$

nas quais:

F_{cr} é a tensão admissível do aço nas cantoneiras.

E é o módulo de elasticidade do aço.

f_y é a tensão de escoamento do aço das cantoneiras.

w é a largura da aba medida após a curvatura central.

t é a espessura da aba.

w/t_{lim} é o limite de esbeltez das abas das cantoneiras.

A esbeltez efetiva das barras deve ser obtida conforme as equações da Tabela 3.2, sendo os índices máximos recomendados como KL/r menor do que 150 para montantes e 200 para demais barras comprimidas. Para barras sempre tracionadas, a esbeltez limite é 375, enquanto que barras que podem sob certas condições de carregamento ficarem sem solicitação de tração, o limite é 250. Na Figura 3.4 são detalhadas as condições para utilização de cada equação.

Tabela 3.2 – Obtenção da esbeltez efetiva segundo NBR 8850

Montantes aparafusados em ambas as abas	$KL/r = L/r;$ Se $0 \leq L/r \leq 150$
Barras com cargas concêntricas em ambas as extremidades	$KL/r = L/r;$ $0 \leq L/r \leq 120$
Barras com carga concêntrica em uma extremidade e excêntrica na outra	$KL/r = 30 + 0,75L/r;$ $0 \leq L/r \leq 120$
Barras com cargas excêntricas em ambas as extremidades	$KL/r = 60 + 0,5L/r;$ $0 \leq L/r \leq 120$
Barras sem restrição parcial à rotação em ambas as extremidades	$KL/r = L/r;$ $120 \leq L/r \leq 200$
Barras com restrição parcial à rotação em uma das extremidades	$KL/r = 28,6 + 0,762L/r;$ $120 \leq L/r \leq 225$
Barras com restrição parcial à rotação em ambas as extremidades	$KL/r = 46,2 + 0,615L/r;$ $120 \leq L/r \leq 250$

Fonte: NBR 8850 (ABNT, 1985)

Figura 3.4 – Utilização das equações de flambagem da NBR 8850

1) Quando $L/r \leq 120$: a tensão depende da excentricidade (parafusos nas 2 abas ou em somente 1 aba, na ligação considerada).

Equação 1  $k L / r = L / r$

Equação 2  $k L / r = 30 + 0,75 L / r$

Equação 3  $k L / r = 60 + 0,50 L / r$

2) Quando $L/r > 120$: a tensão depende da restrição à articulação, ou seja, se o nó é rotulado ou engastado

Equação 4  $k L / r = L / r$

Equação 5  $k L / r = 28,6 + 0,762 L / r$

Equação 6  $k L / r = 46,2 + 0,615 L / r$

Fonte: NBR 8850 (ABNT,1985)

Como pode ser observado, o equacionamento e as limitações de esbeltez da NBR 8850 (ABNT, 1985) são bastante similares aos da ASCE 10-15, o que torna o dimensionamento praticamente equivalente entre as duas normas, para as torres selecionadas no presente trabalho. Uma comparação de dimensionamento pelas duas normas é apresentada no item a seguir.

3.4.4 Estudo comparativo do dimensionamento.

O dimensionamento das torres utilizadas no trabalho, por cada uma das normas, para o caso de carga da ruptura de cabo, está resumido na Tabela 3.3. É possível verificar o peso total de cada tipologia, dimensionada com base em cada uma das três normas mencionadas anteriormente.

Tabela 3.3 – Resumo do dimensionamento das torres.

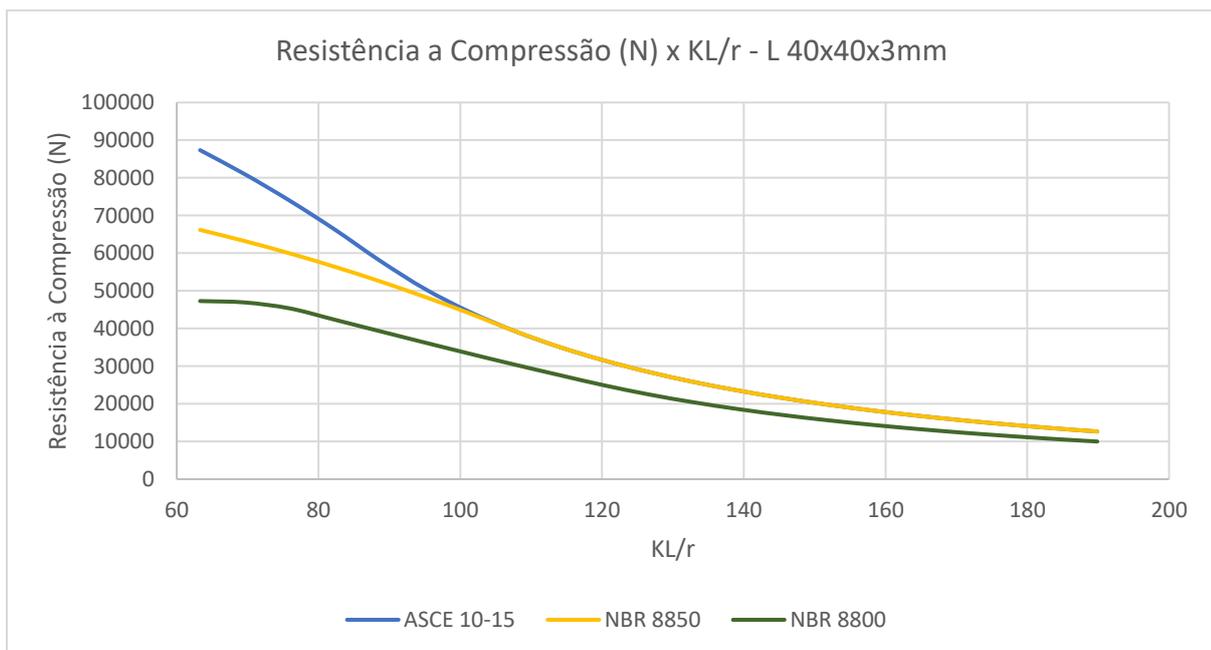
Peso total dos perfis da torre (kg)			
Norma Utilizada	NBR 8800	NBR 8850	ASCE 10-15
Torre Autoportante	2907	2510	2508
Torre Estaiada	1807	1623	1623

Fonte: Autor

É possível verificar que o peso total das torres dimensionadas pelas normas NBR 8850 e ASCE 10-15 resulta praticamente igual, porém as torres dimensionadas pela NBR 8800 resultaram cerca de 10% mais pesadas que as anteriores. Tal diferença é explicada pelas diferenças de formulação entre as normas, bem como a diferença de tratamento de esbeltez, principalmente no caso de barras tracionadas e barras redundantes.

Na Figura 3.5 é possível verificar a resistência a compressão de cálculo de um perfil L 40x40x3mm conforme a esbeltez. Os dimensionamentos das barras pouco esbeltas são bastante discrepantes, porém se aproximam conforme a esbeltez aumenta. A partir de certa esbeltez o dimensionamento da ASCE 10-15 e da NBR 8850 são exatamente iguais.

Figura 3.5 – Dimensionamento comparado de um perfil.



Fonte: Autor

No presente trabalho, para fins de dimensionamento, foi utilizada a NBR 8800 (ABNT, 2008), por ser essa a norma em vigor sobre o assunto no Brasil. Na falta de informações mais precisas sobre o tipo de ligação dos perfis da torre, foram utilizados em todos os elementos coeficiente de esbeltez igual a 1. Comercialmente, podem ser adotadas normas estrangeiras para o dimensionamento deste tipo de estrutura.

4 METODOLOGIA

No presente capítulo serão apresentados os procedimentos para a montagem dos modelos estruturais utilizados para a representação das torres estudadas, bem como os parâmetros e hipóteses utilizados na análise desses modelos.

Foram escolhidos para as análises dois modelos reais de torres metálicas treliçadas, uma autoportante e outra estaiada. As torres foram escolhidas por sua semelhança, ambas possuem altura similar, tendo 39,0 m a autoportante e 43,50 m a estaiada, e ambos os modelos suportam 3 cabos condutores e 2 cabos para-raios.

Nos projetos originais, as duas torres foram dimensionadas com a utilização de treliçamento defasado, principalmente na torre estaiada. A torre autoportante apresentava em sua geometria original quadros horizontais sem contraventamento, os quais se tornam instáveis se não forem utilizados modelos de pórtico espacial, com consideração dos esforços de flexão nas barras. Tais configurações inviabilizavam a resolução dessas estruturas com a utilização de modelos estruturais formados apenas por elementos de treliça espacial, onde não há a consideração dos esforços de flexão. As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam a diferença entre os dois tipos de reticulados.

Figura 4.1 – Trecho de torre estaiada com treliçamento defasado.

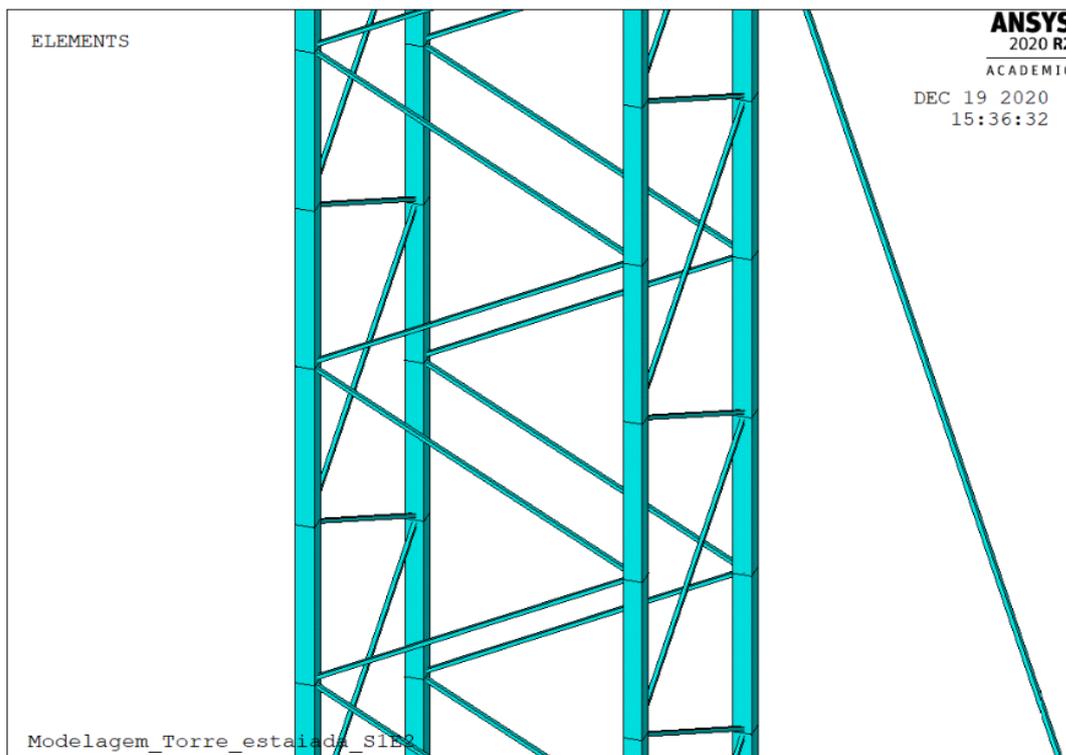
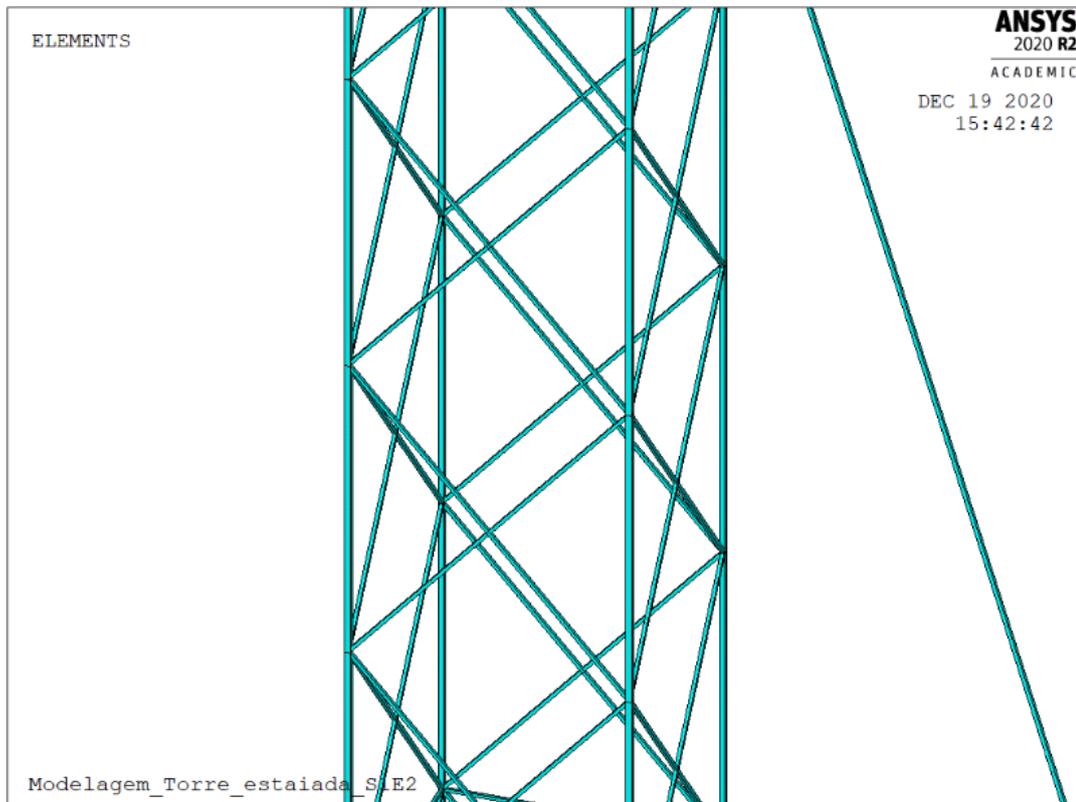


Figura 4.2 – Trecho de torre estaiada com treliçamento contínuo.



Fonte: Autor

A rotina em Fortran, adaptada e utilizada no presente trabalho, não permite a utilização de barras de pórtico espacial, onde cada nó possui 6 graus de liberdade (3 rotações e 3 translações), permite somente barras de treliça espacial, onde cada barra possui apenas os 3 graus de liberdade de translação.

Para possibilitar a utilização da rotina em Fortran, a geometria das torres foi alterada. O treliçamento defasado da torre estaiada foi alterado para treliçamento contínuo, bem como adicionadas barras fictícias nos braços, pés e quadros onde havia nós não contraventados em ambas as torres.

Para as análises dinâmicas de ruptura de cabo nas torres autoportantes e nas torres estaiadas, foram modelados trechos de linhas de transmissão com um determinado número de torres, espaçadas por vãos iguais e todas em um mesmo nível. Cada tipologia de torre faz parte de uma linha de transmissão específica, com vãos e cabos característicos.

4.1 TORRE AUTOPORTANTE

A torre metálica treliçada autoportante de linha de transmissão (LT) selecionada para este estudo é uma torre de suspensão, com formato (silhueta) tronco piramidal, com altura total de 39 metros e abertura de base de 3 metros, denominada SS e ilustrada na

Figura 4.3. Os perfis que compõem a torre estão descritos na Tabela 4.1.

A torre é composta por perfis cantoneira de aço galvanizado. As seções transversais dos perfis estão listadas na tabela a seguir, conforme o projeto original. Os cabos condutores são de alumínio com alma de aço, denominado Ibis, cujas características estão descritas na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 – Perfis estruturais da torre autoportante SS.

Nº do perfil	Dimensões (mm)	Área da seção transversal (m ²)	Mom. de Inércia $I_{xx}=I_{yy}$ (m ⁴)	r_z mín (cm)	Peso por metro (N/m)
1	L40 x 40 x 3	2,350 E-04	3,4406E-08	0,79	18,04
2	L45 x 45 x 3	2,660 E-04	4,9199E-08	0,89	20,42
3	L50 x 50 x 3	2,960 E-04	6,8388E-08	0,99	22,85
4	L50 x 50 x 4	3,890 E-04	8,9875E-08	0,99	29,86
5	2L x 45 x 45 x 3	5,320 E-04	9,8399E-08	1,41	40,84
6	L60 x 60 x 5	5,820 E-04	1,9278E-07	1,17	44,68
7	L75 x 75 x 5	7,360 E-04	3,8597E-07	1,48	56,5
8	L75 x 75 x 6	8,356 E-04	4,5486E-07	1,48	67,17

Fonte: Autor

Tabela 4.2 – Propriedades físicas e mecânicas do cabo condutor do tipo IBIS

Características do cabo tipo IBIS	
Diâmetro externo do cabo (mm)	19,888
Tração Última (kN)	72,50
Tração EDS (kN)	14,50
Peso por metro (N/m)	7,9770
Coefficiente de dilatação térmica (°C)	1,88E-05
Módulo de Elasticidade (GPa)	74,50
Área da seção transversal (mm ²)	234,00

Fonte: (NEXANS BRASIL, 2011)

A tração de maior atuação durante a vida útil do cabo condutor vale 20% da tração última. Trata-se da condição de EDS (*Every Day Stress*), tração que o cabo experimenta durante maior período de sua vida útil.

O cabo para-raios utilizado é uma cordoalha de aço galvanizada EHS 3/8", cujas características estão descritas na Tabela 4.3. Esses cabos são regulados no Brasil pela norma NBR 16730 (ABNT, 2018).

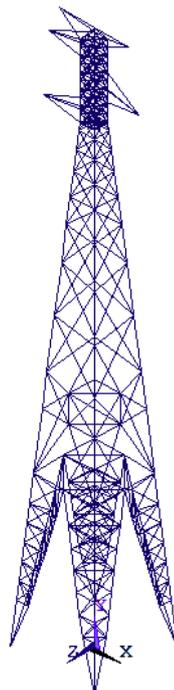
Tabela 4.3 – Características do cabo para-raios (cordoalha de aço galvanizada)

Cordoalha de aço galvanizada EHS 3/8" (7 fios):	
Diâmetro Nominal:	9,53 mm
Área da Seção Transversal:	51,14 mm ²
Peso:	3,99 N/m
Carga Mínima de Ruptura:	68,40 kN
Módulo de Elasticidade:	152 GPa

Fonte: (BELGO BEKAERT, 2019)

Os cabos para-raios são fixados no topo da torre sem auxílio de isoladores. Sua flecha no meio do vão deve ser de 90% da flecha dos cabos condutores. (LABEGALINI *et al.*, 2005).

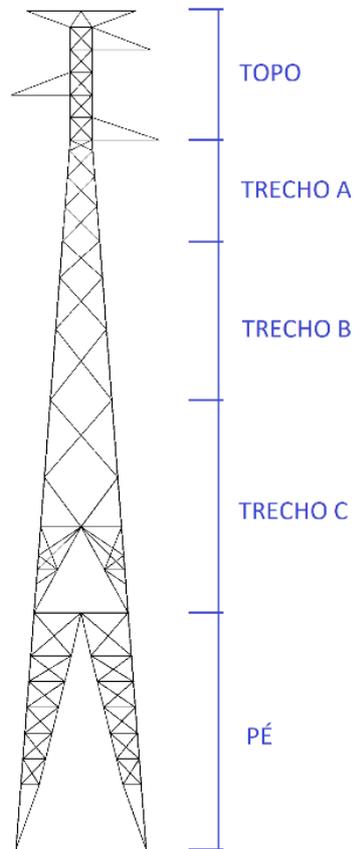
Figura 4.3 – Vista Isométrica da torre autoportante SS.



Fonte: Autor

A nomenclatura das barras da torre segue a localização conforme demonstrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Nomenclatura de barras da torre autoportante SS



Fonte: Autor

4.2 DIMENSIONAMENTO DA TORRE AUTOPORTANTE SS.

A torre autoportante foi dimensionada apenas para a hipótese de carga de ruptura de cabo, considerando cada um dos cabos (condutores e para-raios) rompendo isoladamente, e aplicando essas cargas em casos de carga independentes, além do peso próprio. As cargas foram calculadas com base nos dados dos cabos fornecidos no item 4.1 do presente trabalho e estão representadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Cargas aplicadas no modelo estático linear da Torre SS.

Cabo para-raios – Cordoalha de aço galvanizado 3/8" (9,53mm)		
Peso por metro do cabo para-raios	3,99	N/m
Tração de ruptura do cabo (Trup)	68,40	kN
Vão gravante	625,00	M
Peso próprio do cabo	2,49	kN
Ruptura de cabo (20% Trup)	13,68	kN
Cabo condutor – Cabo tipo IBIS (Nexans)		
Peso por metro do cabo condutor	7,98	N/m
Tração de ruptura do cabo (Trup)	72,50	kN
Vão gravante	675	M
Peso próprio do cabo	5,39	kN
Peso próprio do isolador	1,35	kN
Peso próprio total	6,74	kN
Ruptura de cabo (16% Trup)	11,60	kN

Fonte: Autor

A Tabela 4.5 mostra alguns dos perfis dimensionados, bem como as relações entre capacidade estrutural e esforço. Como os perfis foram dimensionados em grupos, foi adotado o maior perfil dimensionado para as barras de cada grupo.

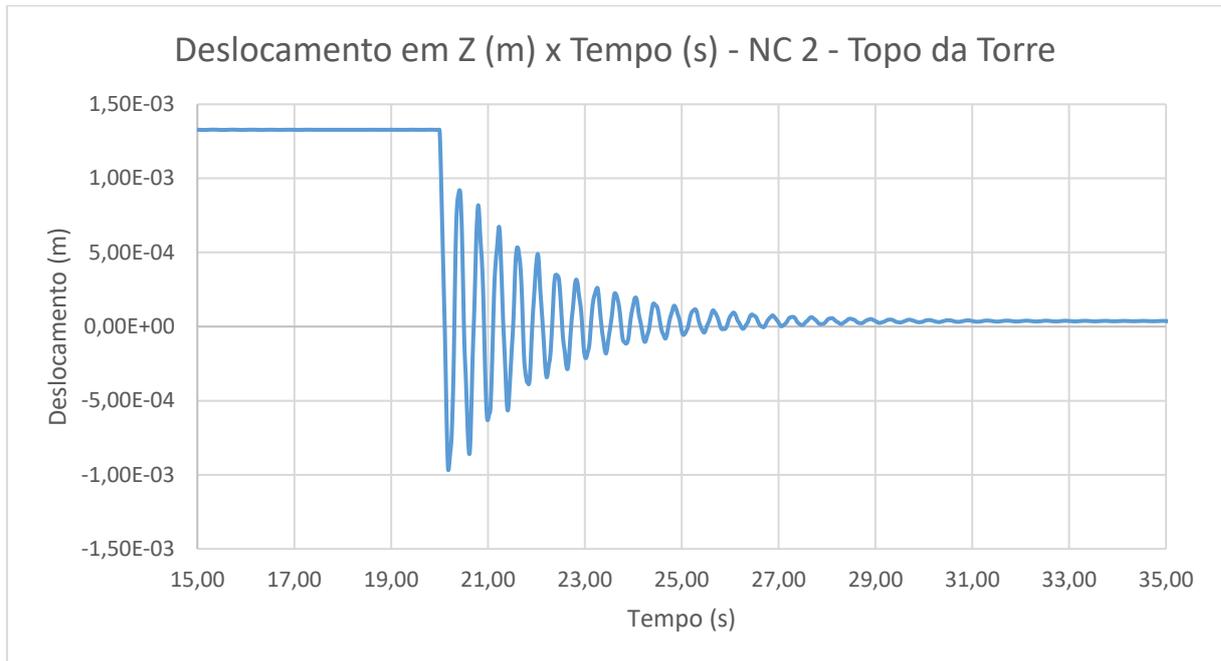
A primeira frequência natural de vibração (frequência fundamental) da torre foi avaliada através da simulação em vibração livre, após a aplicação de uma força de 100 N no topo, a qual foi retirada bruscamente no instante 20 segundos. A Figura 4.5 apresenta o deslocamento no nó de topo e a Tabela 4.6 apresenta o período e a frequência das oscilações. A frequência média obtida na simulação de vibração livre na rotina de integração direta tem valor equivalente à primeira frequência natural obtida na análise modal da torre realizada no programa Ansys.

Tabela 4.5 – Dimensionamento de barras da torre SS

Elemento	$Kz \cdot Lz$ (m)	Grupo	Perfil	F_D/R_D Tração	F_D/R_D Comp.
1	1,250	Suporte Tracionado Para-raios	L 40x40x3mm	9%	0%
2	1,250	Suporte Tracionado Para-raios	L 40x40x3mm	9%	0%
3	1,096	Suporte Comprimido Para-raios	L 50x50x3mm	0%	89%
4	1,096	Suporte Comprimido Para-raios	L 50x50x3mm	0%	89%
-	-	-	-	-	-
28	0,525	Vertical Topo	L 40x40x3mm	0%	55%
29	0,525	Vertical Topo	L 40x40x3mm	30%	0%
30	0,525	Vertical Topo	L 40x40x3mm	9%	25%
31	0,525	Vertical Topo	L 40x40x3mm	4%	44%
32	0,525	Vertical Topo	L 40x40x3mm	0%	61%
33	0,525	Vertical Topo	L 40x40x3mm	21%	27%
34	0,525	Vertical Topo	L 40x40x3mm	31%	1%
35	0,525	Vertical Topo	L 40x40x3mm	0%	69%
36	0,525	Vertical Topo	L 40x40x3mm	0%	68%
37	0,525	Vertical Topo	L 40x40x3mm	35%	11%
38	0,525	Vertical Topo	L 40x40x3mm	32%	12%
39	0,525	Vertical Topo	L 40x40x3mm	2%	72%
40	0,525	Vertical Topo	L 40x40x3mm	0%	92%
41	0,525	Vertical Topo	L 40x40x3mm	33%	21%
42	0,525	Vertical Topo	L 40x40x3mm	46%	11%
43	0,251	Vertical Trecho A	L 45x45x4mm	3%	46%
44	0,251	Vertical Trecho A	L 45x45x4mm	0%	70%
45	0,251	Vertical Trecho A	L 45x45x4mm	25%	20%
46	0,251	Vertical Trecho A	L 45x45x4mm	43%	0%
47	0,603	Vertical Trecho A	L 45x45x4mm	2%	54%
48	0,603	Vertical Trecho A	L 45x45x4mm	0%	77%
49	0,603	Vertical Trecho A	L 45x45x4mm	26%	21%
50	0,603	Vertical Trecho A	L 45x45x4mm	42%	0%
51	0,704	Vertical Trecho A	L 45x45x4mm	1%	62%
52	0,704	Vertical Trecho A	L 45x45x4mm	0%	84%
53	0,704	Vertical Trecho A	L 45x45x4mm	27%	21%
54	0,704	Vertical Trecho A	L 45x45x4mm	41%	0%
55	0,805	Vertical Trecho A	L 45x45x4mm	0%	77%
56	0,805	Vertical Trecho A	L 45x45x4mm	0%	99%
57	0,805	Vertical Trecho A	L 45x45x4mm	29%	23%
58	0,805	Vertical Trecho A	L 45x45x4mm	40%	1%
67	1,659	Vertical Trecho B	L 65x65x5mm	0%	83%
68	1,659	Vertical Trecho B	L 65x65x5mm	0%	97%
-	-	-	-	-	-
Média	1,380			6%	15%
Máximo	3,064			46%	99%

Fonte: Autor

Figura 4.5 – Resposta em vibração livre amortecida da torre autoportante.



Fonte: Autor

Tabela 4.6 – Picos de deslocamento para obtenção das frequências – Torre SS

t (s)	A (M)	T (s)	f (Hz)
20,41	9,20E-04	0,39	2,56
20,80	8,19E-04	0,43	2,33
21,23	6,74E-04	0,38	2,63
21,61	5,35E-04	0,42	2,38
22,03	4,90E-04	0,37	2,70
22,40	3,50E-04	0,42	2,38
22,82	3,16E-04	0,44	2,27
23,26	2,62E-04	0,36	2,78
23,62	2,26E-04	0,43	2,33
24,05	1,97E-04	0,37	2,70
24,42	1,56E-04	0,43	2,33
24,85	1,41E-04	0,43	2,33
25,28	1,16E-04	0,37	2,70
25,65	1,10E-04		
Média		0,40	2,49

Fonte: Autor

Os períodos de vibração foram obtidos comparando o instante em que cada pico de oscilação ocorre. As frequências são obtidas calculando o inverso do período

em segundos, ou seja, quantas oscilações ocorrem por segundo. Para a torre autoportante SS, a frequência fundamental calculada foi de 2,49 Hz.

4.3 TORRE ESTAIADA

A torre estaiada de LT selecionada para o estudo é uma torre de suspensão, denominada S1E2, a qual tem 43,5 metros de altura, com um tronco monomastro de 1,30 x 1,30 m e abertura de estais de 30 x 34 m, com a maior abertura transversal à linha e está representada na Figura 4.6.

Os perfis utilizados na torre no projeto original estão descritos na Tabela 4.7.

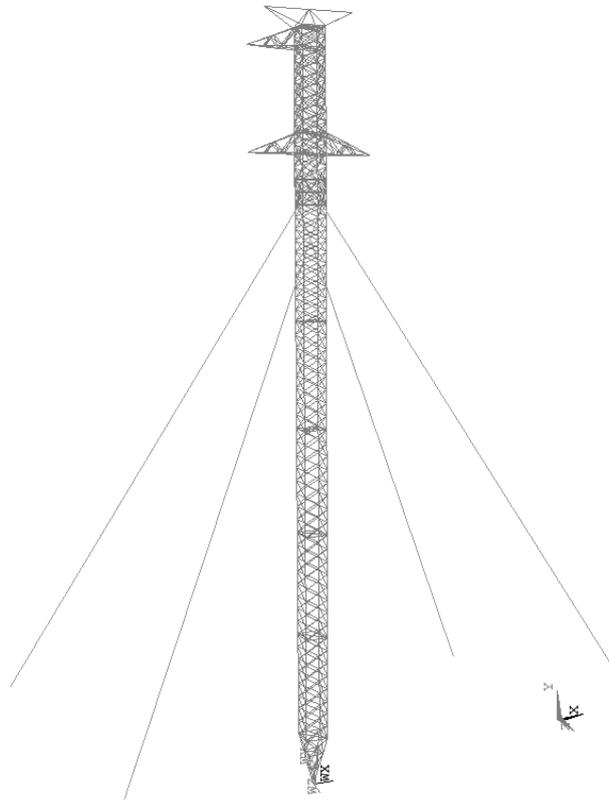
Tabela 4.7 – Perfis estruturais das torres estaiada S1E2

Nº do Perfil	Dimensões (mm)	Área da seção transversal (m ²)	Mom. de inércia $I_{xx} = I_{yy}$ (m ⁴)	r_z mín. (cm)	Peso linear (N/m)
1	L 40 x 40 x 3	2,35E-04	3,4406E-08	0,79	18,04
2	L 45 x 45 x 3	2,66E-04	4,9199E-08	0,89	20,42
3	L 50 x 50 x 3	2,96E-04	6,8388E-08	0,99	22,85
4	L 50 x 50 x 4	3,89E-04	8,9875E-08	0,99	29,86
5	L 60 x 60 x 4	4,71E-04	1,5773E-07	1,19	36,27
6	L 65 x 65 x 4	5,13E-04	2,0112E-07	1,29	39,51
7	2L 45 x 45 x 3	5,32E-04	9,8399E-08	1,41	40,84
8	L 65 x 65 x 5	6,31E-04	2,4738E-07	1,28	48,59
9	L 75 x 75 x 5	7,36E-04	3,8597E-07	1,48	56,50
10	L 75 x 75 x 6	8,75E-04	4,5486E-07	1,48	67,17

Fonte: Autor

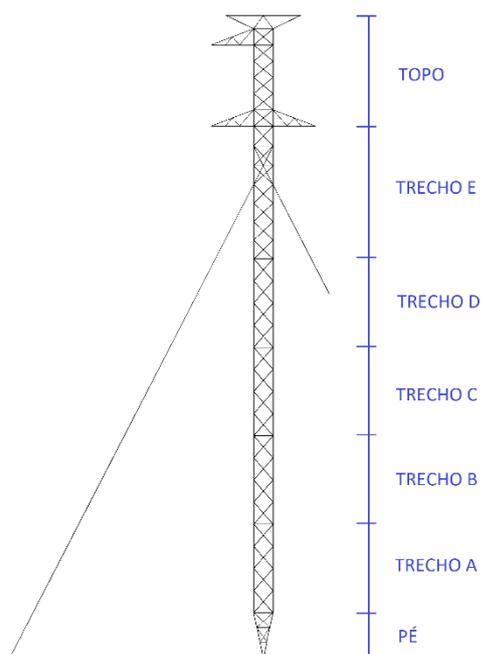
A nomenclatura das barras segue a localização mostrada na Figura 4.7. Os trechos verticais são oriundos do projeto original e não seguem a mesma ordem dos da torre autoportante.

Figura 4.6 – Vista em perspectiva da torre estaiada S1E2.



Fonte: Autor

Figura 4.7 – Nomenclatura de barras da torre estaiada S1E2



Fonte: Autor

Os cabos de estai são cordoalhas de aço zincado. Suas propriedades mecânicas são mostradas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Propriedades dos cabos de estai do tipo cordoalha EHS (37 fios) 13/16”

Diâmetro externo	20,20 mm
Área da seção transversal	320 mm ²
Peso por metro	19,42 N/m
Módulo de Elasticidade	120 GPa
Força de tração última (Trup) - UTS	328,00 kN

Fonte: BELGO BEKAERT, 2019

Os cabos utilizados como condutores são do tipo CAL 900, que são constituídos por 37 fios de liga de alumínio. Na tabela abaixo estão as principais características desse cabo.

Tabela 4.9 – Características dos cabos condutores CAL 900 KCMIL 37 fios

Módulo de Elasticidade	62 GPa
Área da seção transversal	455,7 mm ²
Fios	37 x 3,96 mm
Diâmetro externo	27,72 mm
Peso por metro	12,266 N/m
T _{Rup}	131,46 kN

Fonte: ALUBAR, 2015

Os cabos para-raios utilizados são do tipo Dotterel. Esses cabos são classificados como ACSR, ou seja, condutor de alumínio reforçado com aço. Os fios de aço são empregados para dar um melhor desempenho mecânico aos cabos. As principais características desses cabos estão listadas abaixo.

Tabela 4.10 – Características dos cabos para-raios tipo Dotterel.

Diâmetro externo	15,4 mm
Área da seção transversal	141,83 mm ²
Fios (n x mm)	12x3,08 Alu + 7x3,08 Aço
Peso por metro	6,415 N/m
Trup	76,85 kN
Módulo de Elasticidade	102 GPa

Fonte: ALUBAR, 2015

Será analisada a resposta desse modelo a um carregamento estático, equivalente à ruptura de um cabo condutor e de um cabo para-raios. Os carregamentos utilizados serão equivalentes a 16% da UTS do cabo condutor e 20% da UTS do cabo para-raios.

4.4 DIMENSIONAMENTO DA TORRE ESTAIADA S1E2.

A torre estaiada S1E2 foi dimensionada apenas para a hipótese de carga de ruptura de cabo, com base em um modelo elástico linear no software ANSYS, considerando cada um dos cabos (condutores e para-raios) rompendo isoladamente, e aplicando essas cargas em hipóteses de carga independentes, além do peso próprio. Os carregamentos de cada um dos cabos e do peso próprio estão apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Cargas aplicadas no modelo estático linear da torre S1E2

Cabo para-raios – Cabo Dotterel		
Massa por metro	653,90	kg/km
Trup	76,85	kN
Vão gravante	750,00	m
Peso próprio do cabo	4,81	kN
Ruptura de Cabo (20% Trup)	15,37	kN
Cabo condutor – CAL 900 KCMIL 37 FIOS		
Massa por metro	1256,40	kg/km
Trup	129,91	kN
Vão gravante	700,00	m
Peso próprio do cabo	8,63	kN
Peso próprio dos isoladores	1,35	kN
Peso total	9,98	kN
Ruptura de cabo (16% Trup)	20,79	kN

Fonte: Autor

O dimensionamento feito a partir das formulações da NBR 8800 resultou nos perfis resumidos na Tabela 4.12. A relação entre solicitações e resistência é evidenciada nas colunas 5 e 6 da tabela para permitir a observação de que conforme a esbeltez dos elementos, diversos dimensionamentos são condicionados pela esbeltez limite, ao invés da solicitação. Isso faz com que diversos elementos tenham uma resistência bastante superior à solicitação obtida no modelo com cargas estáticas equivalentes, utilizado no dimensionamento.

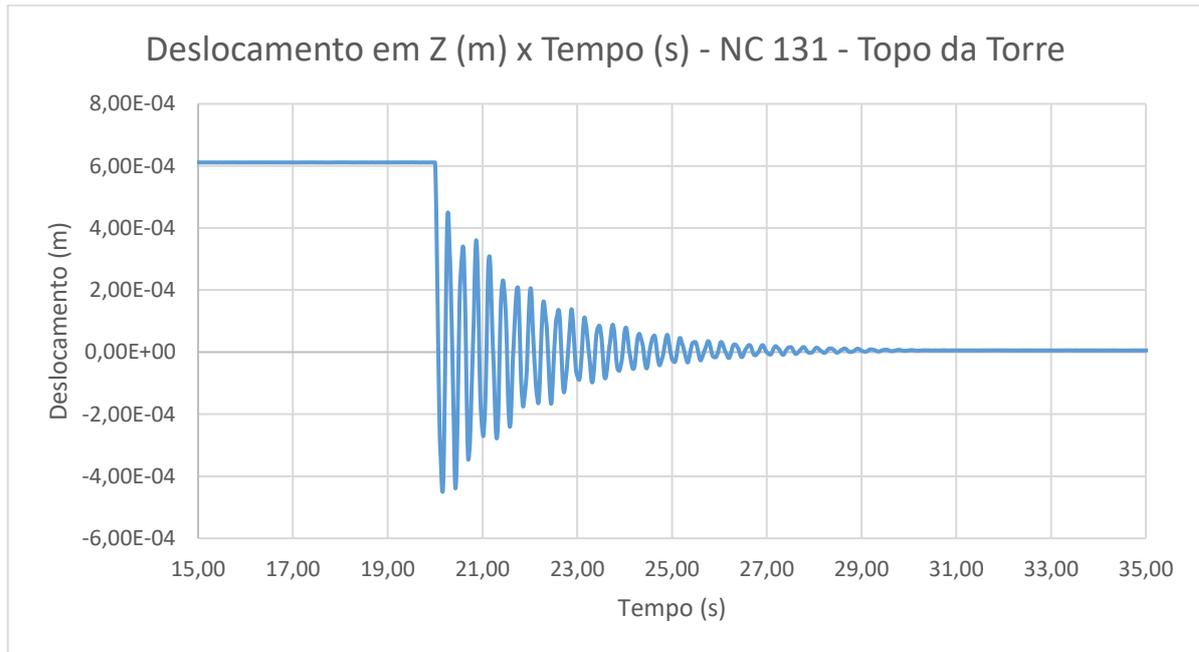
Tabela 4.12 – Dimensionamento da Torre Estaiada S1E2

Elemento	Kz*Lz (m)	Grupo	Perfil	F _D /R _D Tração	F _D /R _D Comp.
1	1,046	Montante Pé	L 60mmx60mmx4mm	0%	74%
2	1,046	Montante Pé	L 60mmx60mmx4mm	0%	70%
3	1,046	Montante Pé	L 60mmx60mmx4mm	0%	68%
4	1,046	Montante Pé	L 60mmx60mmx4mm	0%	72%
5	1,046	Montante Pé	L 60mmx60mmx4mm	0%	49%
6	1,046	Montante Pé	L 60mmx60mmx4mm	0%	46%
7	1,046	Montante Pé	L 60mmx60mmx4mm	0%	45%
8	1,046	Montante Pé	L 60mmx60mmx4mm	0%	48%
9	1,046	Montante Pé	L 60mmx60mmx4mm	0%	62%
10	1,046	Montante Pé	L 60mmx60mmx4mm	0%	59%
-	-	-	-	-	-
97	1,500	Montante Trecho B	L 65mmx65mmx5mm	0%	85%
98	1,500	Montante Trecho B	L 65mmx65mmx5mm	0%	73%
99	1,500	Montante Trecho B	L 65mmx65mmx5mm	0%	67%
100	1,500	Montante Trecho B	L 65mmx65mmx5mm	0%	81%
101	1,500	Montante Trecho B	L 65mmx65mmx5mm	0%	87%
102	1,500	Montante Trecho B	L 65mmx65mmx5mm	0%	73%
103	1,500	Montante Trecho B	L 65mmx65mmx5mm	0%	67%
104	1,500	Montante Trecho B	L 65mmx65mmx5mm	0%	84%
105	1,500	Montante Trecho B	L 65mmx65mmx5mm	0%	90%
106	1,500	Montante Trecho B	L 65mmx65mmx5mm	0%	74%
107	1,500	Montante Trecho B	L 65mmx65mmx5mm	0%	67%
108	1,500	Montante Trecho B	L 65mmx65mmx5mm	0%	86%
109	1,500	Montante Trecho B	L 65mmx65mmx5mm	0%	92%
110	1,500	Montante Trecho B	L 65mmx65mmx5mm	0%	75%
-	-	-	-	-	-
335	0,937	Diagonais Trecho E	L 40mmx40mmx3mm	15%	91%
336	0,937	Diagonais Trecho E	L 40mmx40mmx3mm	25%	99%
337	0,937	Diagonais Trecho E	L 40mmx40mmx3mm	29%	90%
338	0,937	Diagonais Trecho E	L 40mmx40mmx3mm	28%	76%
339	0,937	Diagonais Trecho E	L 40mmx40mmx3mm	50%	27%
340	0,937	Diagonais Trecho E	L 40mmx40mmx3mm	48%	84%
341	0,937	Diagonais Trecho E	L 40mmx40mmx3mm	47%	77%
342	0,937	Diagonais Trecho E	L 40mmx40mmx3mm	19%	84%
-	-	-	-	-	-
535	1,889	Diagonal Braço Estai	L 2x45mmx45mmx3mm	53%	92%
536	1,321	Horizontal Braço Estai	L 50mmx50mmx4mm	0%	54%
537	1,321	Horizontal Braço Estai	L 50mmx50mmx4mm	0%	95%
538	1,321	Horizontal Braço Estai	L 50mmx50mmx4mm	0%	92%
539	1,321	Horizontal Braço Estai	L 50mmx50mmx4mm	40%	86%
-	-	-	-	-	-
Média	1,129			6%	27%
Máximo	2,500			55%	99%

Fonte: Autor

A primeira frequência natural amortecida de vibração da torre estaiada S1E2 foi avaliada da mesma forma que na torre autoportante. Os resultados são mostrados na Figura 4.8 e na Tabela 4.13.

Figura 4.8 – Resposta em vibração livre amortecida da torre S1E2.



Fonte: Autor

Tabela 4.13 – Picos de deslocamento para obtenção das frequências naturais amortecidas na torre S1E2.

t (s)	A (m)	T (s)	f (Hz)
2,03E+01	4,50E-04	0,32	3,13
2,06E+01	3,41E-04	0,28	3,57
2,09E+01	3,61E-04	0,28	3,57
2,12E+01	3,09E-04	0,28	3,57
2,14E+01	2,31E-04	0,31	3,23
2,17E+01	2,09E-04	0,28	3,57
2,20E+01	2,06E-04	0,27	3,70
2,23E+01	1,64E-04	0,31	3,23
2,26E+01	1,36E-04	0,28	3,57
2,29E+01	1,39E-04	0,27	3,70
2,32E+01	1,11E-04	0,32	3,13
2,35E+01	8,50E-05	0,28	3,57
2,38E+01	8,85E-05	0,28	3,57
2,40E+01	7,91E-05	0,28	3,57
2,43E+01	5,91E-05		
Média		0,29	3,48

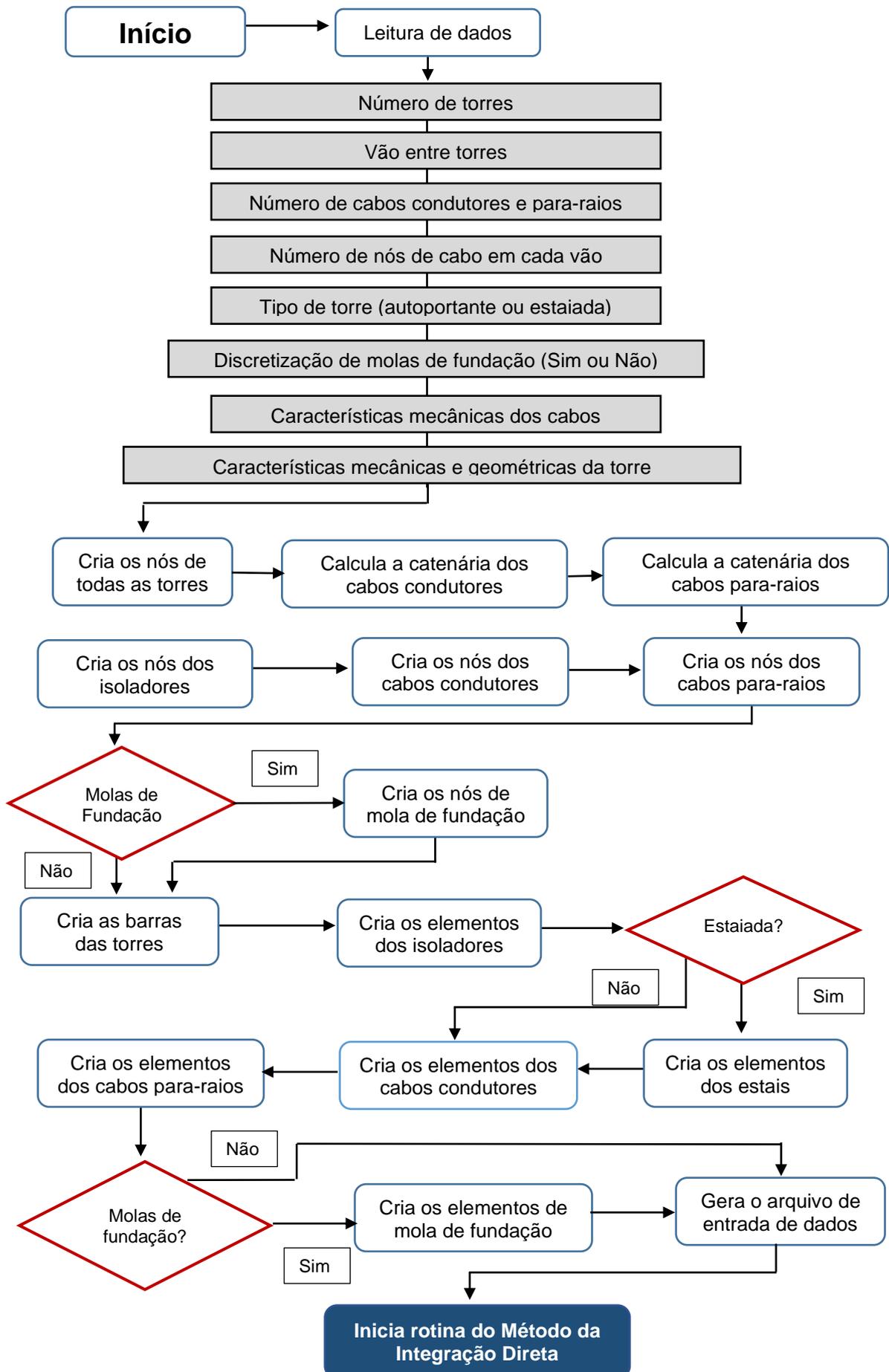
Fonte: Autor

Para a torre estaiada S1E2, a frequência fundamental amortecida calculada foi de 3,48 Hz.

4.5 ROTINA COMPUTACIONAL PARA GERAÇÃO DOS MODELOS

Na rotina computacional desenvolvida por Kaminski (2007) a entrada de dados era manual, ou seja, era necessário informar todos os nós e barras de todas as torres, cabos e isoladores do modelo estrutural do trecho de LT. Para um modelo com 3 ou mais torres, o número de nós e barras fica muito grande, tornando a entrada de dados manual muito trabalhosa, além de possibilitar a ocorrência de erro humano na entrada de dados. Para facilitar a entrada de dados, foi criada uma sub-rotina em Fortran para, a partir do modelo estrutural de uma torre e dos dados de número de vãos, cabos e propriedades mecânicas dos cabos e isoladores, gerar um modelo estrutural completo de um trecho de LT de forma automática.

Para a correta discretização do modelo, é necessária a geração dos nós do vão de cabos condutores e para-raios, bem como a correta ligação dos elementos de torre com isoladores, cabos e apoios. O fluxograma a seguir resume os passos adotados para a sub-rotina.



4.6 CATENÁRIA DE CABOS

A função matemática que melhor representa a curva de um cabo suspenso entre dois pontos é uma função conhecida como catenária. Em análises simplificadas para vãos pequenos, geralmente menores do que 450 metros, pode ser adotada uma função de parábola para descrever a geometria deformada dos cabos sem erros significativos. No presente trabalho, foi utilizado equacionamento descrito em Cappellari (2005) para obtenção das catenárias dos cabos utilizados no modelo.

É necessário obter o cabo em uma determinada posição que proporcionará, após a aplicação da força peso pela rotina de análise pelo método da integração direta, a catenária final e a tração de projeto desejada. A formulação descrita por Cappellari (2005) determina as condições da catenária final através da equação constitutiva dos cabos e desconta a deformação axial causada pela força peso, obtendo assim a catenária inicial (sem a flecha do peso próprio) que será utilizada na geração do modelo do trecho de LT.

Observa-se que a tração de maior atuação durante a vida útil do cabo vale 20% da tração última. Trata-se da condição de EDS (*Every Day Stress*), tração que o cabo experimenta durante maior período de sua vida útil.

As equações 22, 23 e 24 são utilizadas para obtenção dos parâmetros da catenária do cabo, conforme a geometria do vão, as propriedades físicas do cabo e a tensão a que o mesmo estará sujeito.

$$T_i = 0.2 \cdot T_{rup} \quad (22)$$

na qual:

T_i é a tração equivalente a 20% da tração última (kN);

T_{rup} é a tração última (kN).

$$C = \frac{T_i}{p} \quad (23)$$

$$X_0 = \frac{L}{2} - C \cdot \arcsen\left(\frac{B}{2 \cdot C \cdot \sinh\left(\frac{L}{2 \cdot C}\right)}\right) \quad (24)$$

nas quais:

C é o parâmetro da catenária, calculado em metros.

p é o peso por metro do cabo.

X_0 é a ordenada onde ocorre a maior flecha.

L é o vão entre os pontos de apoio, no caso, os isoladores da linha de transmissão.

B é o desnível entre os pontos de apoio do cabo, observando que se os cabos estão nivelados, a maior flecha ocorrerá no centro do vão.

Assim, pode-se calcular as flechas ao longo do cabo $y(x)$ através da equação:

$$y = C \cdot \left(\cosh\left(\frac{x - X_0}{C}\right) - \cosh\left(\frac{X_0}{C}\right) \right) \quad (25)$$

Com essas equações, consegue-se encontrar a catenária teórica, ou seja, a definitiva. Porém, se modelarmos a catenária com essa geometria, ao sofrer a aplicação do seu peso próprio pela rotina do método da integração direta descrita por Kaminski (2007), o cabo sofrerá uma deformação adicional. Isto tornaria a flecha da catenária excessiva, prejudicando a fidelidade dos resultados obtidos no estudo do presente trabalho.

Para obter os valores das sucessivas flechas que descrevem a catenária do cabo antes da deformação causada pela força peso, deve-se utilizar a seguinte abordagem: através da equação (26) pode-se encontrar a deformação no cabo devido à tensão EDS previamente citada, que é a tensão que o cabo está sujeito em condições normais de uso, devido principalmente a seu peso próprio.

$$\Delta l = \frac{l_e \cdot T_i}{E \cdot A} \quad (26)$$

na qual:

l_e é o comprimento do cabo com a deformação.

E é o módulo de elasticidade longitudinal à tração do material do cabo.

A é a área da seção transversal do cabo.

Assim, com o comprimento do cabo antes de sofrer a deformação, pode-se obter uma nova catenária através da equação (27) que define um novo parâmetro de catenária a partir do comprimento inicial do cabo.

$$l_i = \sqrt{B^2 + 4 \cdot C_i^2 \cdot \left(\sinh\left(\frac{L}{2 \cdot C_i}\right) \right)^2} \quad (27)$$

na qual:

l_i é o comprimento inicial do cabo, ou seja, sem deformação. $l_i = l_e - \Delta l$

C_i é o parâmetro da catenária formada por este cabo.

Então, com o novo valor do parâmetro da catenária é possível encontrar os valores das flechas utilizadas para modelagem do trecho de LT.

Os modelos das torres isoladas foram analisados primeiramente através do software ANSYS. Uma análise estática foi feita para avaliar os esforços obtidos com a aplicação das cargas “estáticas equivalentes” ao rompimento de um cabo condutor ou de um cabo para-raios. As mesmas cargas foram aplicadas, de forma gradual, nas torres modeladas para análise pelo MID. Os resultados foram comparados para a validação tanto da discretização dos modelos, quanto da rotina desenvolvida em FORTRAN. Foram avaliados os esforços nas barras e os deslocamentos nos nós da torre. Nessa etapa, foram calibrados o intervalo de tempo de integração do MID e as propriedades das barras fictícias para a condição de estabilidade do modelo. Também foi calibrado o coeficiente de amortecimento proporcional à massa a ser utilizado, de modo que a razão de amortecimento resultante ao fim da análise seja compatível com o obtido em ensaios experimentais de torres metálicas.

Após a validação dos modelos das torres e da rotina computacional, foi realizada a análise dos trechos de LT utilizando o MID. Nessa análise foram levados em consideração os efeitos da não linearidade geométrica das barras.

Os cabos foram discretizados em elementos de treliça espacial, com as propriedades físicas descritas nos itens anteriores. Seus traçados foram definidos a partir da catenária obtida no regime de tensão EDS. Após a introdução gradual das

cargas permanentes e de peso próprio no modelo MID, a ruptura de um dos cabos foi simulada pela desativação de um dos elementos que simula o trecho de cabo próximo ao ponto de fixação na cadeia de isoladores. Foi avaliado o comportamento da torre ao longo do tempo de simulação da oscilação livre amortecida a partir desse instante.

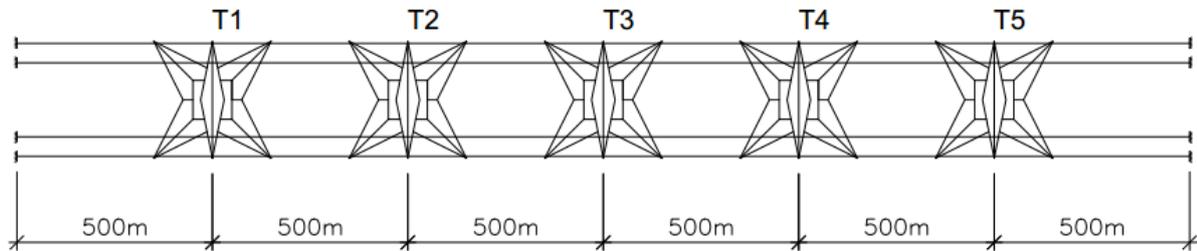
A análise terá como principal objetivo a investigação da possibilidade de superação de um ou mais Estados Limites Últimos (ELU) provocados pelo evento de ruptura de um cabo e a sua propagação para suportes adjacentes. Para isso, o comportamento dos elementos foi simulado e avaliado também após a superação de um ELU.

As torres utilizadas nesse estudo são projetos correntes em linhas de transmissão brasileiras e foram dimensionadas para situações reais, com diversas combinações de ações, últimas e de serviço. Essas combinações levam em conta as ações permanentes, como o peso próprio dos elementos e acessórios, variáveis, como a ação de vento, e excepcionais, como a ruptura de cabo e o processo de montagem da estrutura. Para o presente estudo, no intuito de avaliar o dimensionamento para a ação de ruptura de cabo, foram desenvolvidos modelos dimensionados para uma combinação de ações específica, onde somente foram consideradas as ações permanentes em conjunto com a ruptura do cabo, com $\gamma_g = 1,0$. Essa consideração visa eliminar a interferência do dimensionamento para as demais ações variáveis e excepcionais. As ações variáveis que foram desconsideradas, principalmente as devidas ao vento, são críticas para o dimensionamento de grande parte das barras da torre, tornando as mesmas superabundantes em resistência frente ao caso da ruptura de cabo. Dessa forma, foi possível avaliar isoladamente se a simplificação da consideração do efeito da ruptura de cabo por meio das cargas estáticas equivalentes também é efetiva na prevenção do efeito cascata nas LT.

4.7 TRECHO DE LT COM TORRES AUTOPORTANTES

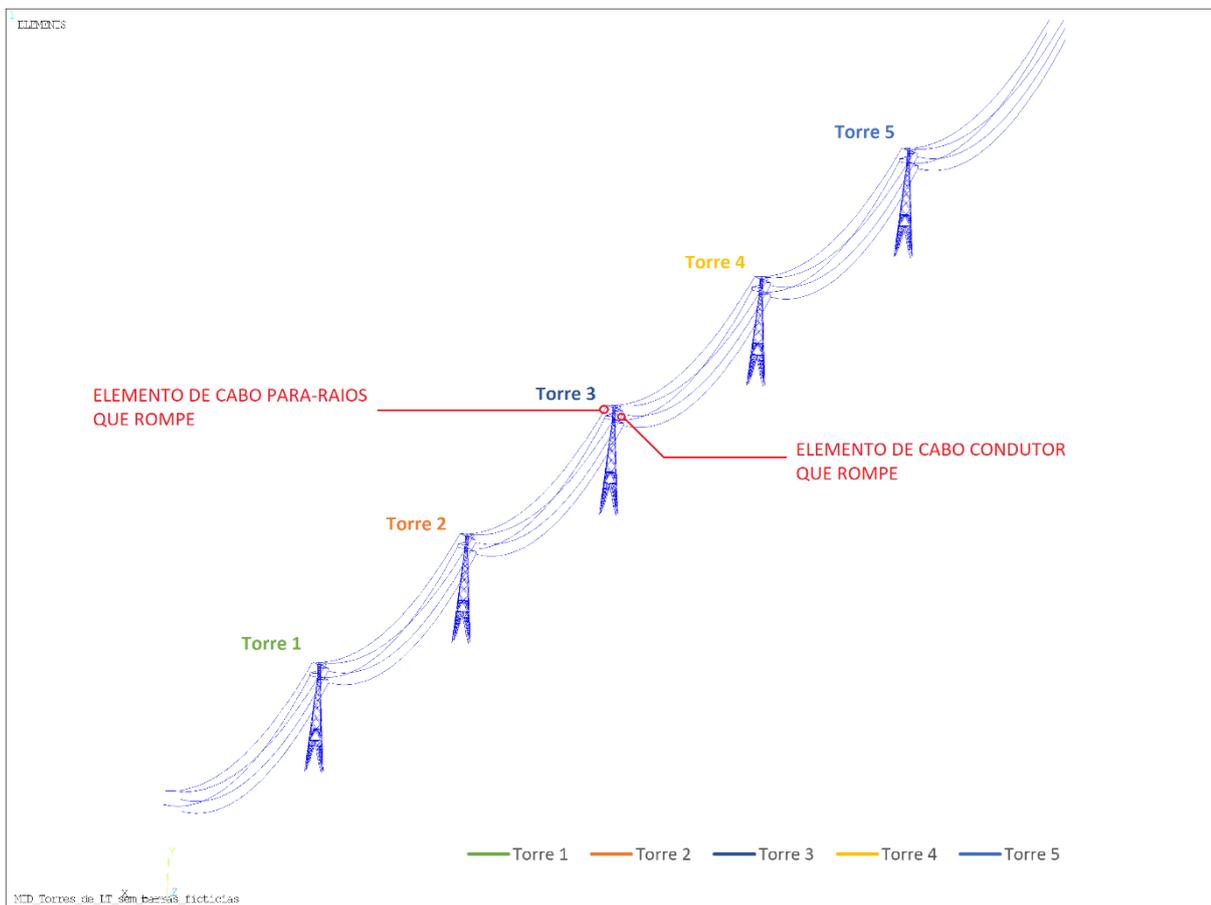
A partir da torre autoportante SS foi analisado o comportamento de um trecho de LT composto por 5 torres e 6 vãos de cabos, conforme ilustrado nas Figura 4.9 e Figura 4.10.

Figura 4.9 – Planta esquemática do trecho de LT com cinco torres autoportantes SS.



Fonte: Autor

Figura 4.10 – Modelo de LT com cinco torres autoportantes SS.



Fonte: Autor

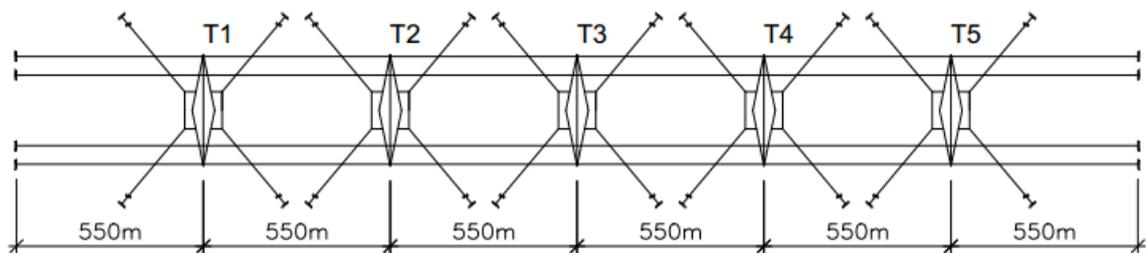
Os vãos são de 500 m, compostos por três cabos condutores e dois para-raios. Os cabos condutores escolhidos para o estudo são do tipo IBIS. Trata-se de um cabo composto por 26 fios de alumínio e 7 fios de aço, que compõe a alma e tem a função de melhorar as propriedades mecânicas do cabo. Para efeitos de cálculo, foram

utilizadas as propriedades apresentadas na Tabela 4.2. Os cabos para-raios são cordoalhas de aço galvanizado 3/8", cujas propriedades mecânicas utilizadas no modelo estão descritas na Tabela 4.3.

4.8 TRECHO DE LT COM TORRES ESTAIADAS

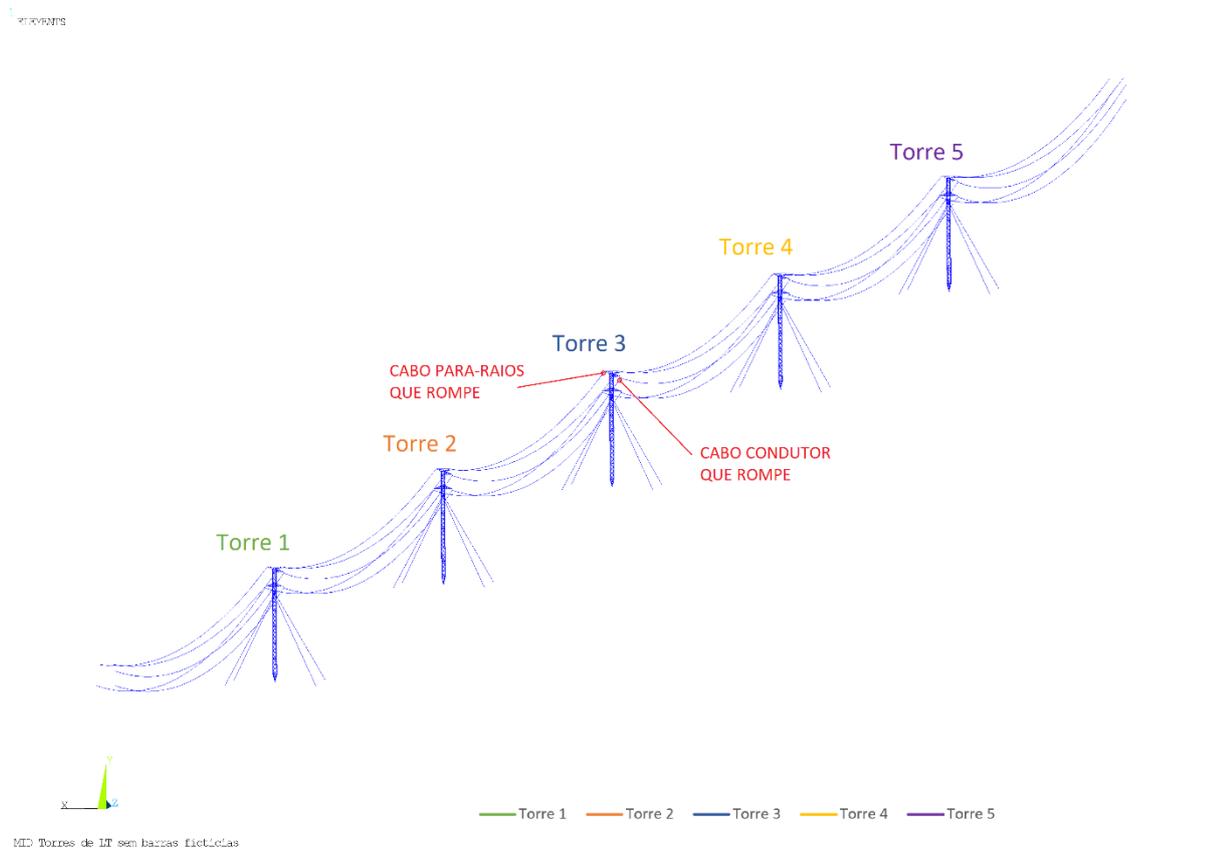
A partir da torre estaiada S1E2 foi estudado o comportamento estrutural de um trecho de LT usual para esse tipo de torre. O trecho é composto por 5 torres e 6 vãos de 550 m, conforme as Figuras 4.11 e 4.12.

Figura 4.11 – Trecho de LT composto por cinco torres estaiadas S1E2.



Fonte: Autor

Figura 4.12 – Modelo de LT com cinco torres estaiadas S1E2.



Fonte: Autor

O elemento de cabo condutor que rompe fica entre as torres 2 e 3, sendo adjacente ao elemento de isolador da torre 3, de modo análogo, o elemento de cabo para-raios que rompe também fica no mesmo vão, sendo adjacente ao suporte da torre 3, conectado à mesma sem isolador.

4.9 PARÂMETROS DE ANÁLISE DINÂMICA

A análise dinâmica pelo método da integração direta foi realizada com utilização da rotina programada em Fortran chamada MID. O fator de amortecimento proporcional à massa considerado foi de 1,0 para as torres, 2,0 para os isoladores e 0,5 para os cabos. O intervalo de tempo de integração utilizado foi de 5×10^{-6} segundos.

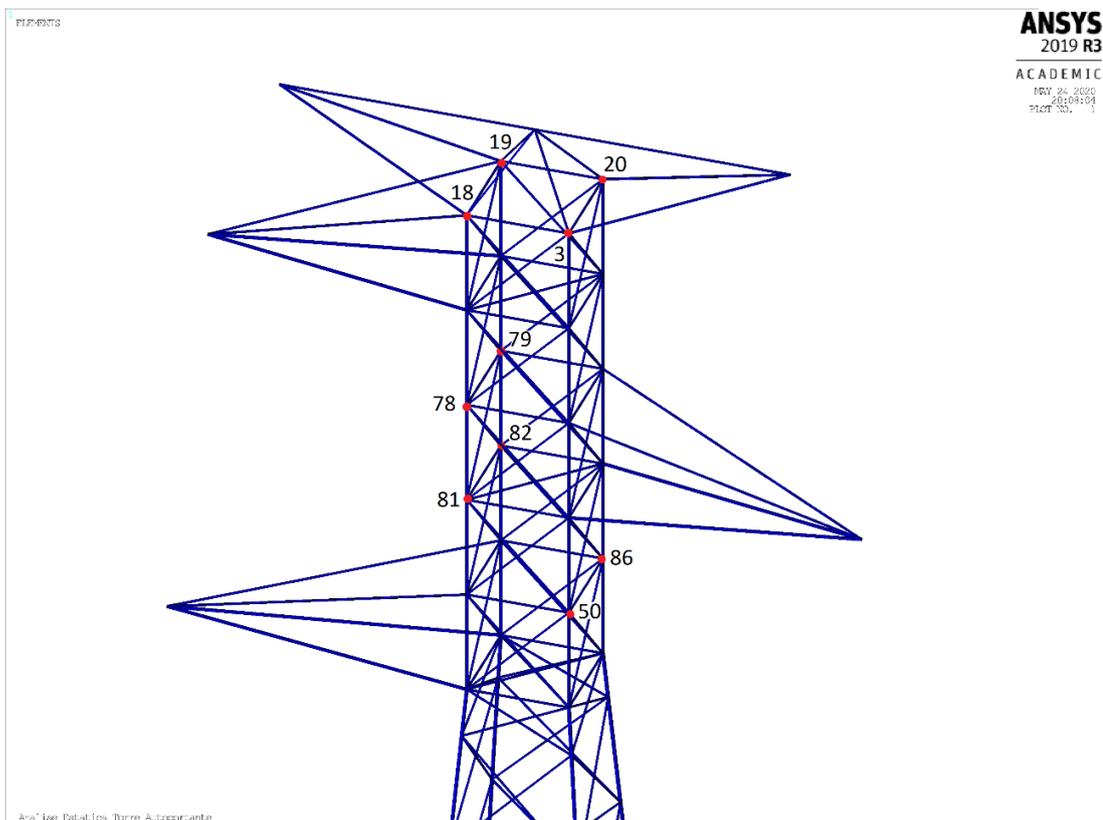
5 RESULTADOS

5.1 ANÁLISE DO TRECHO DE LT COM CINCO TORRES AUTOPORTANTES SS PARA RUPTURA DE CABO CONDUTOR

5.1.1 Análise dos Deslocamentos

Os deslocamentos foram analisados nas direções transversal e longitudinal à LT (eixos X e Z do modelo, respectivamente), ao longo do tempo de análise. Para melhor visualização, serão apresentados os dados a partir do instante 15 segundos da simulação, considerando que o rompimento do cabo acontece no instante 20 segundos. Do início da simulação até o instante 15 segundos, as cargas de peso próprio vão sendo aplicadas gradativamente, para evitar excitação dinâmica na torre devido a um aumento brusco de cargas. Os nós monitorados são mostrados na Figura 5.1. Serão apresentados os deslocamentos dos nós 18 e 03, uma vez que os demais apresentaram comportamento bastante similar, apenas com amplitude menor de deslocamento.

Figura 5.1 – Nós de controle para observação dos deslocamentos

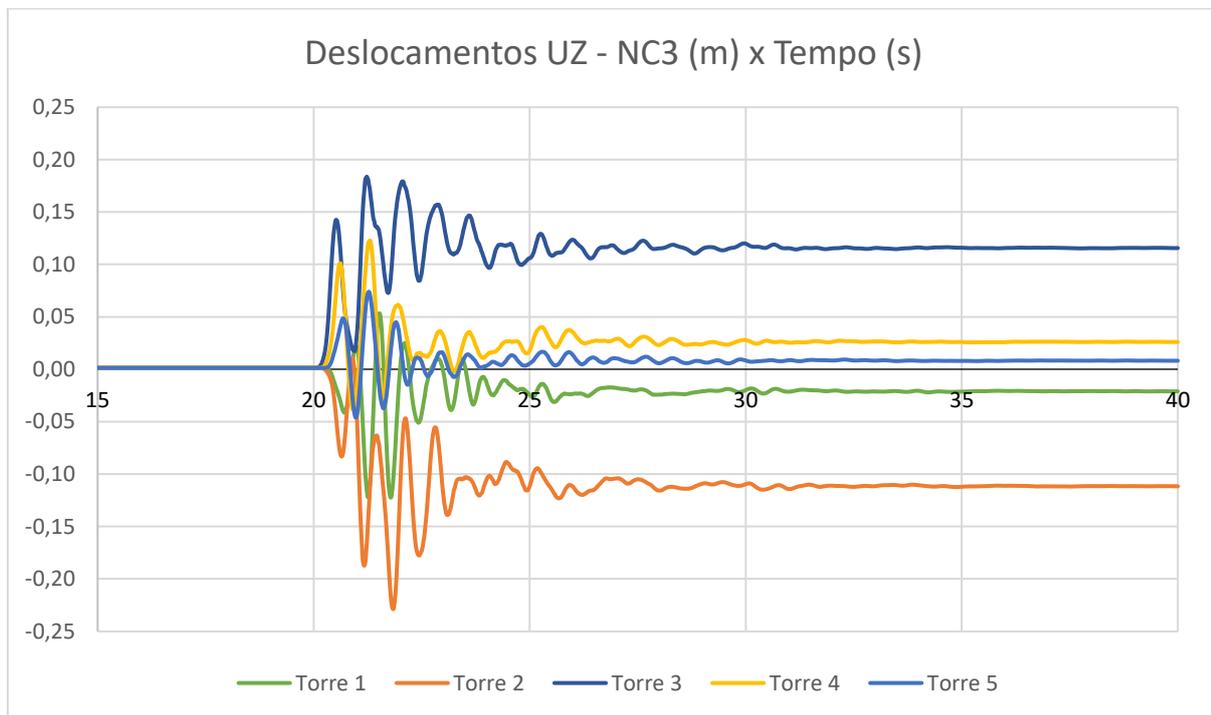


5.1.2 Deslocamentos na direção longitudinal à LT (eixo Z)

Nas Figuras 5.3 e 5.3 é possível verificar o efeito dinâmico da ruptura do cabo condutor superior nos deslocamentos na direção Z dos nós 03 e 18, respectivamente, no modelo do trecho de LT com as cinco torres autoportantes SS. O elemento de cabo que rompe está posicionado entre as torres 2 e 3, mais próximo à torre 3, portanto são essas as torres que mais sofrem deslocamentos. Também é possível observar que os deslocamentos são bastante superiores nos instantes logo após ao rompimento, antes de estabilizarem novamente na nova condição.

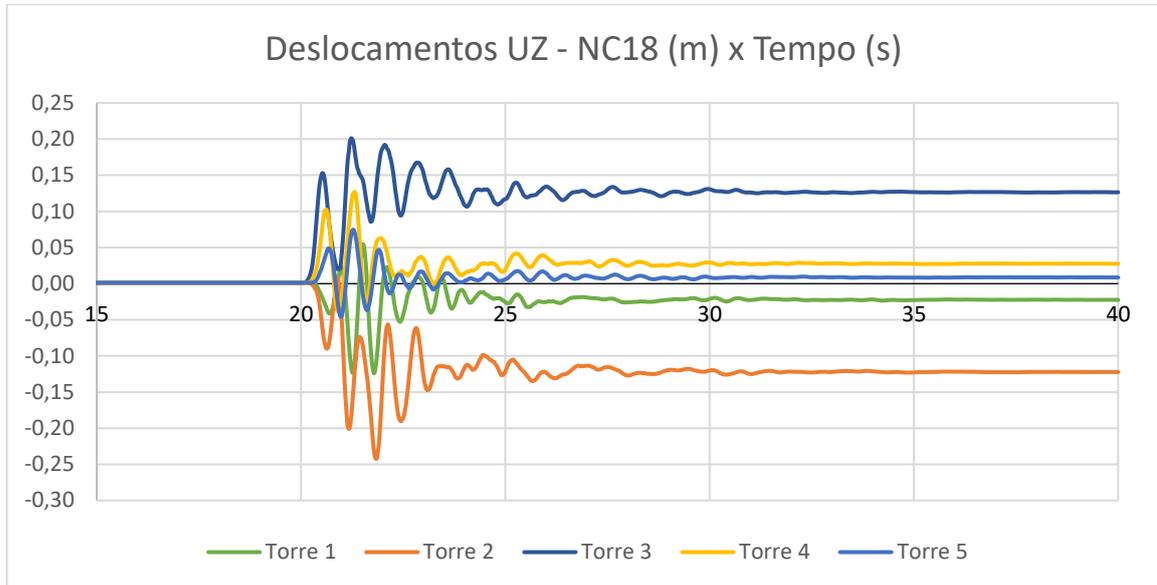
Apesar do elemento que rompe estar conectado à torre 3, a torre 2 tem deslocamentos ligeiramente superiores aos da torre 3.

Figura 5.2 – Deslocamentos do nó 03 na direção Z – Torres autoportantes SS – Ruptura do cabo condutor superior



Fonte: Autor

Figura 5.3 – Deslocamentos do nó 18 na direção Z – Torres autoportantes SS – Ruptura do cabo condutor superior

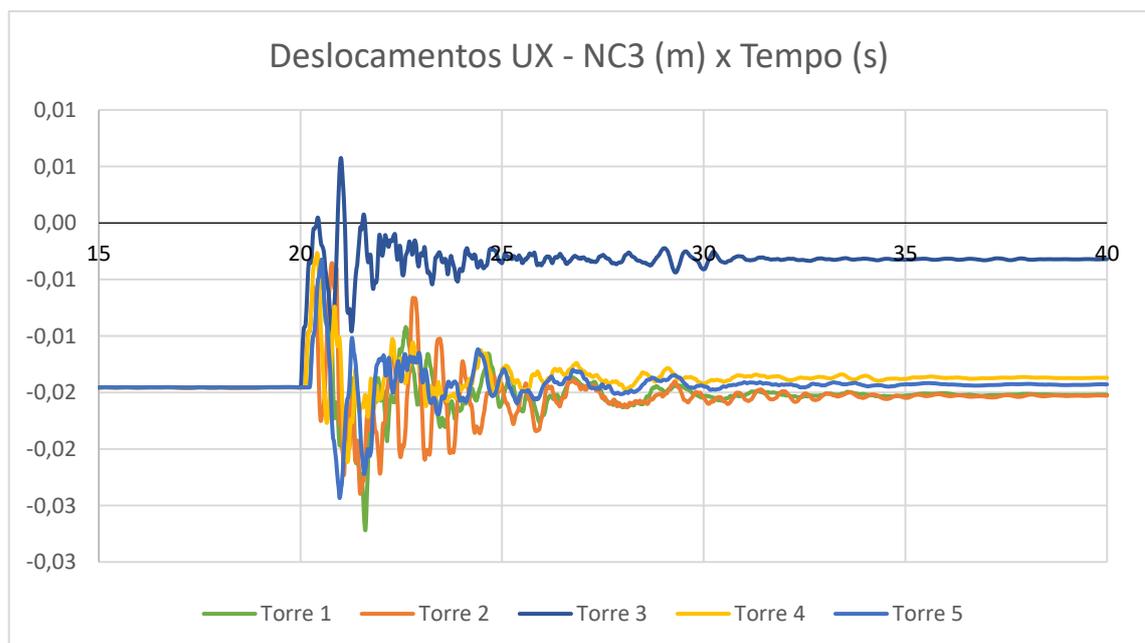


Fonte: Autor

5.1.3 Deslocamentos no eixo X

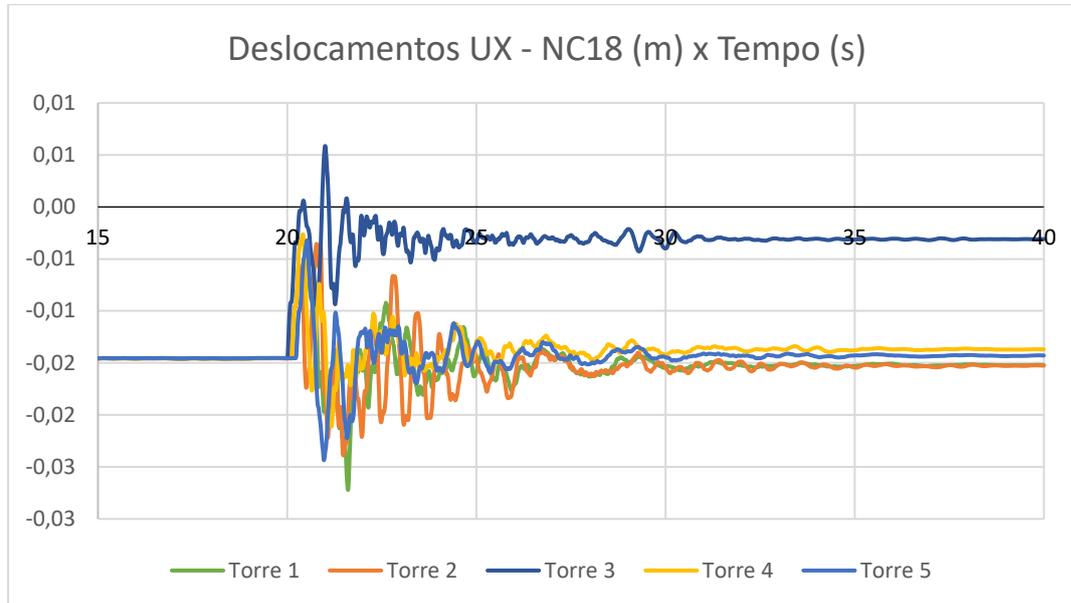
As Figuras 5.4 e 5.5 demonstram os deslocamentos no eixo X da linha de transmissão.

Figura 5.4 – Deslocamentos do nó 03 na direção X – Torres Autoportantes SS – Ruptura cabo condutor superior



Fonte: Autor

Figura 5.5 – Deslocamentos do nó 18 na direção X – Torres autoportantes SS – Ruptura cabo condutor superior

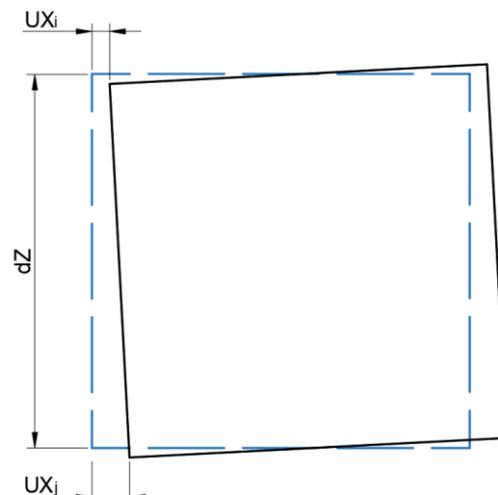


Fonte: Autor

5.1.4 Deslocamento Angular das Torres do Modelo de 5 Torres com Ruptura do Cabo Condutor

Os deslocamentos angulares foram medidos através da parametrização dos deslocamentos translacionais de dois nós do topo da torre, de forma a avaliar se há presença de efeitos de torção. A parametrização dos deslocamentos está descrita na Figura 5.6 e na Equação (28).

Figura 5.6 – Parâmetro para medida do deslocamento angular.



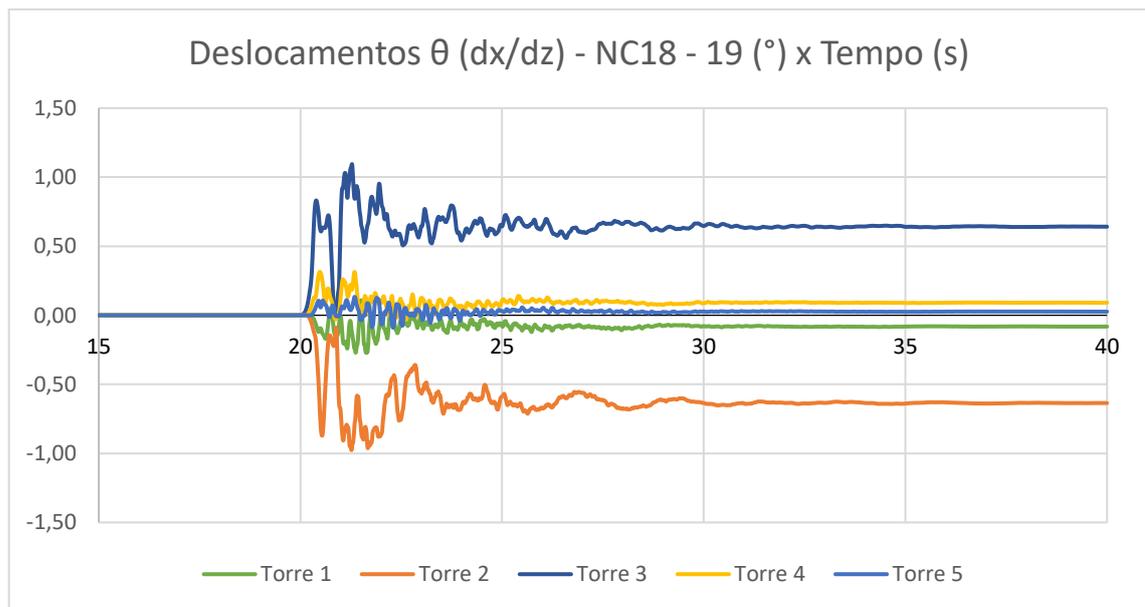
Fonte: Autor

O deslocamento angular considerado foi medido tomando o ângulo formado entre dois pontos na mesma a seção da torre.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{UX_i - UX_j}{dz} \right) \quad (28)$$

Na Figura 5.7 é possível observar o comportamento do topo da torre ao longo da simulação. As torres giram em sentidos contrários conforme a posição em relação ao ponto de ruptura de cabo. A magnitude do giro, de cerca de 1 grau demonstra que a torção global da torre nesse caso não é um efeito preponderante nos esforços obtidos na análise, visto que indicam que não há diferença significativa de deslocamentos em pontos em um mesmo nível.

Figura 5.7 – Deslocamentos angulares – Torres autoportantes SS – Ruptura cabo condutor superior



Fonte: Autor

5.1.5 Barras que Rompem no Modelo de 5 Torres SS com Ruptura do Cabo Condutor

Das 2740 barras de torre do modelo, 10 barras ultrapassam em algum momento a capacidade projetada, o que equivale a 0,36% das barras do modelo. Em todos os casos, o esforço preponderante é a compressão. As barras que rompem são montantes posicionados em diversas alturas diferentes nas torres e uma barra do braço da torre. Na torre 3 também há a ruptura de uma barra diagonal do trecho superior da torre.

A Tabela 5.1 apresenta a quantidade de barras que rompem em cada torre.

Tabela 5.1 – Barras que excedem a resistência no caso da ruptura de cabo condutor.

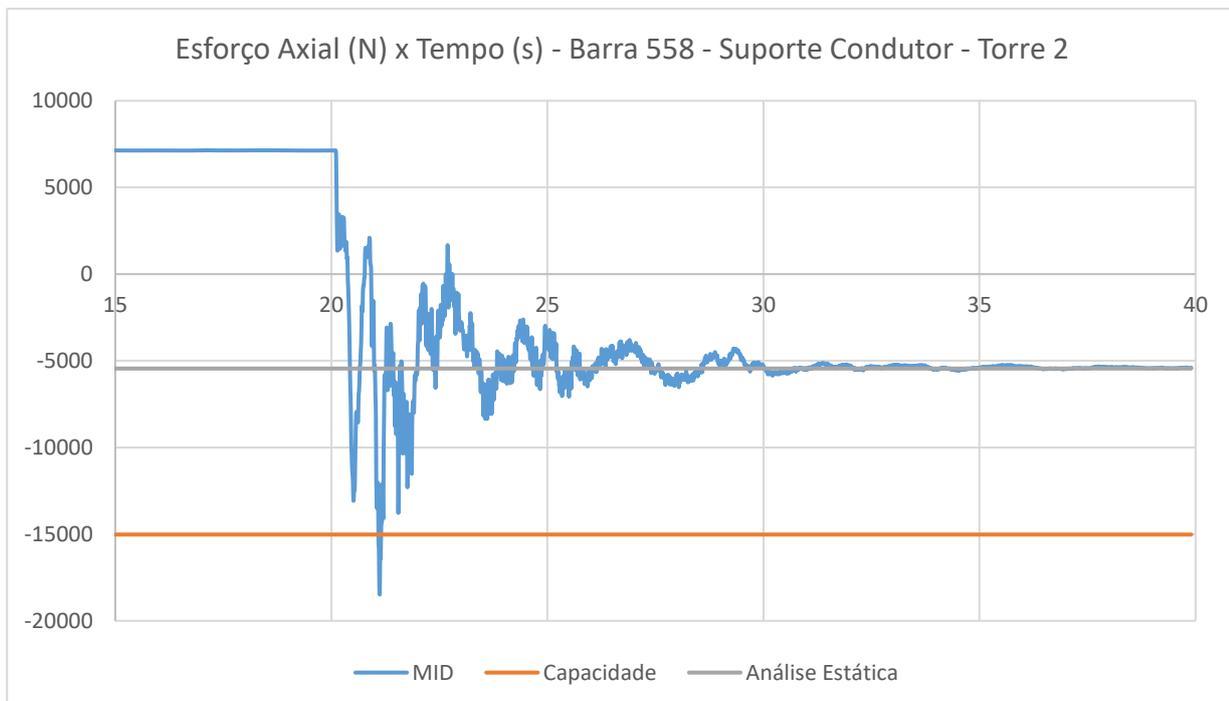
Torre	Nº de Barras	Proporção entre torres	N _{SD} / R _D		Amplificação Dinâmica	
			Média	Máximo	Média	Máxima
Torre 2	6	60,0%	1,21	1,32	2,26	3,65
Torre 3	4	40,0%	1,08	1,16	2,06	2,93
	10	100,0%	1,15			

Fonte: Autor

5.1.6 Esforço axial nas barras de torre do modelo de 5 torres SS com Ruptura do Cabo Condutor

Conforme a Figura 5.8, é possível verificar que o esforço residual após a estabilização do efeito dinâmico é equivalente ao esforço obtido pela análise estática. Porém, com a amplificação dinâmica o pico de esforço é bastante superior ao esforço residual, sendo superior também à resistência dimensionada.

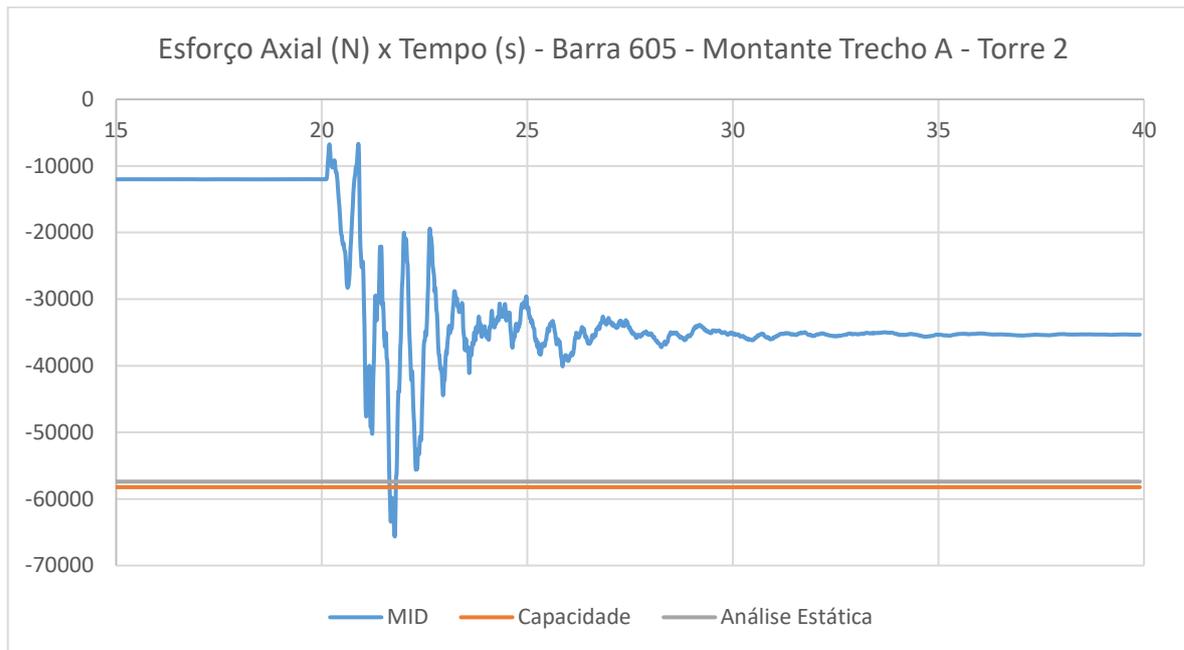
Figura 5.8 – Esforço axial x tempo barra 558 – Ruptura Cabo Condutor



Fonte: Autor

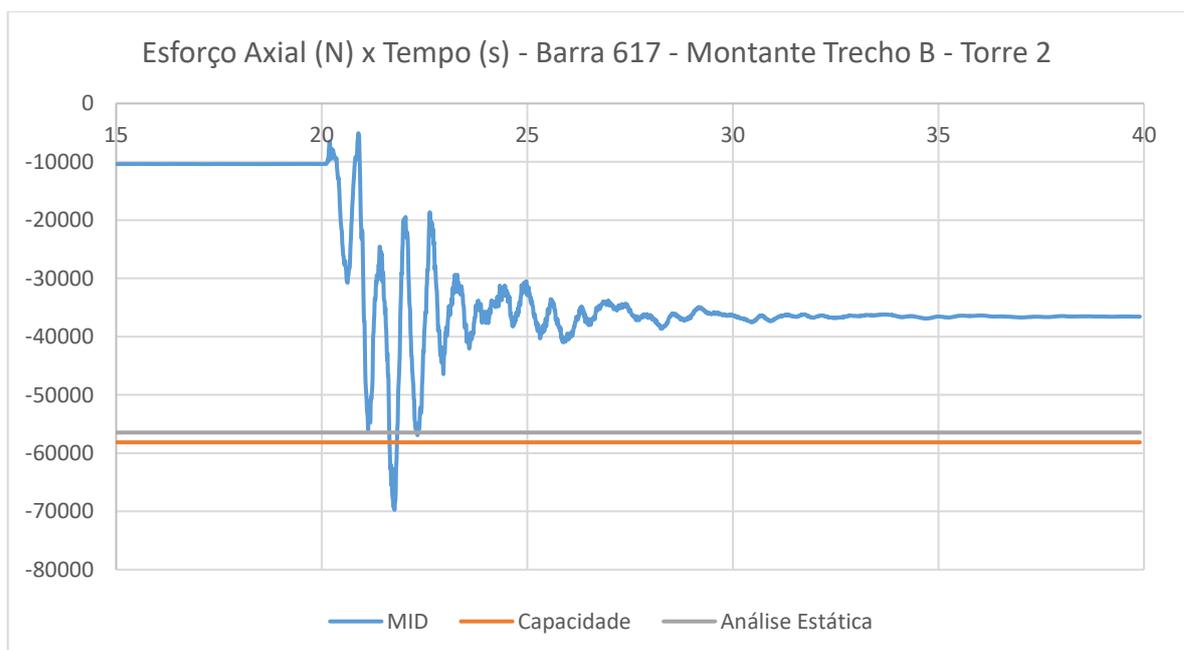
Nos montantes, que são dimensionados em sua grande maioria à compressão, o esforço residual é até inferior ao obtido na análise estática, porém o pico de esforços ultrapassa a capacidade dimensionada. Nas Figuras 5.9 e 5.10 é possível observar o comportamento dos montantes da Torre 2.

Figura 5.9 – Esforço axial x tempo barra 605 – Ruptura Cabo Condutor



Fonte: Autor

Figura 5.10 – Esforço axial x tempo barra 617 – Ruptura Cabo Condutor



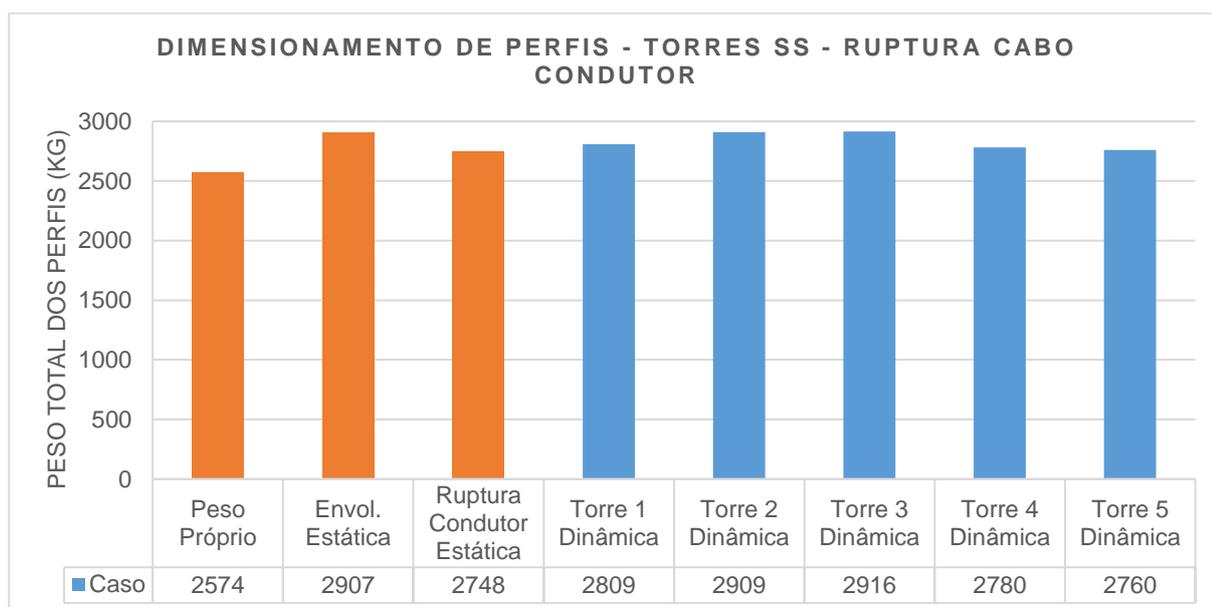
Fonte: Autor

5.1.7 Dimensionamento das torres SS conforme esforços da análise dinâmica da ruptura de cabo condutor

O dimensionamento das torres foi realizado conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008), conforme descrito no 3.4 deste trabalho. A atualização do dimensionamento para os esforços obtidos na análise dinâmica não mostrou um significativo aumento do peso total dos perfis da torre, o que mostra que a consideração dos esforços dinâmicos de ruptura de cabo não aumentaria muito o custo para a fabricação desta torre (Figura 5.11).

No caso da torre analisada, o dimensionamento para a envoltória estática para ruptura dos cabos resultou em peso total da torre superior à média das torres que foram analisadas pelo método da integração direta para a ruptura do cabo condutor superior. A diferença de peso é de 72kg, ou 2,5% a mais de peso na envoltória estática. Porém comparando com o caso estático de ruptura de cabo condutor, essa relação se inverte, sendo a média das torres dimensionadas com os esforços da análise dinâmica 87kg, ou 3,2%, mais pesada que o caso estático equivalente. Comparando com a torre mais solicitada do modelo de LT, essa diferença aumenta para 168kg, ou 5,8% do peso total.

Figura 5.11 – Dimensionamento das torres conforme esforços da análise dinâmica



Fonte: Autor

5.2 ANÁLISE DO TRECHO DE LT COM CINCO TORRES AUTOPORTANTES SS PARA RUPTURA DE CABO PARA-RAIOS.

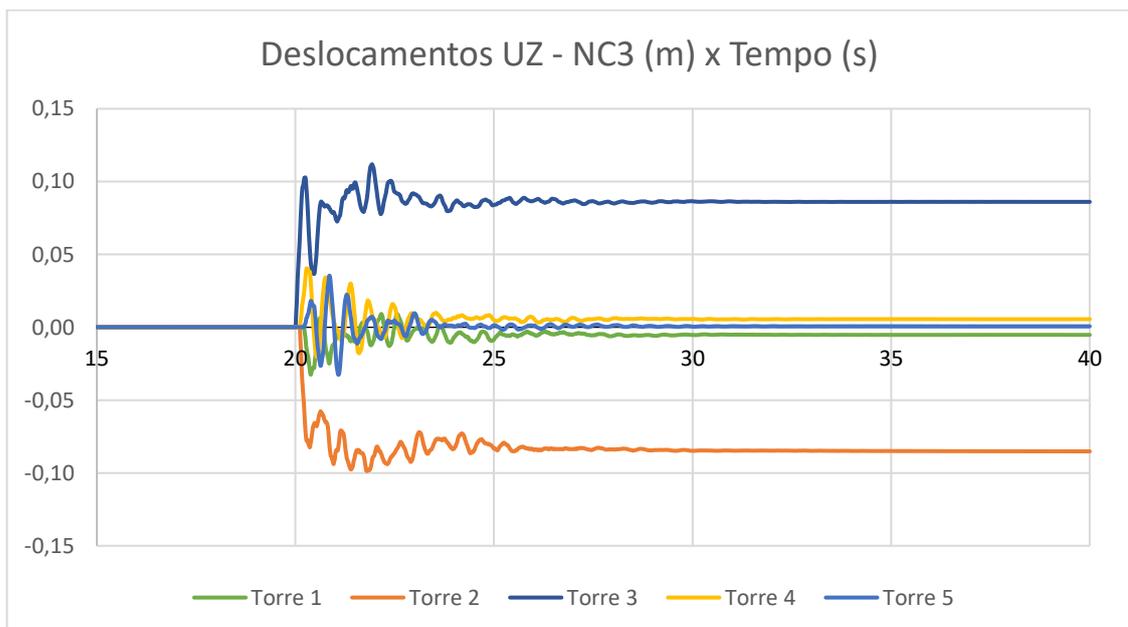
5.2.1 Análise dos deslocamentos

Foram utilizados os mesmos nós de controle mostrados na Figura 5.1.

5.2.2 Deslocamentos no Eixo Z.

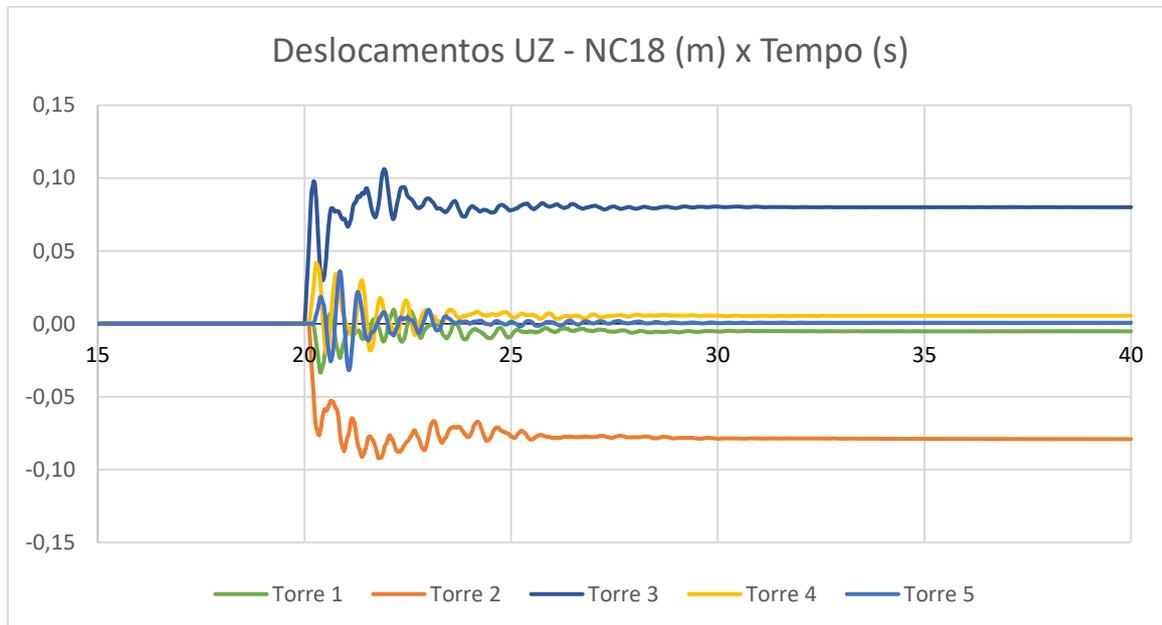
As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam os deslocamentos no eixo Z da linha de transmissão de torres SS no evento da ruptura do cabo para-raios.

Figura 5.12 – Deslocamentos do nó 03 na direção Z – Torres autoportantes SS – Ruptura de cabo para-raios



Fonte: Autor

Figura 5.13 – Deslocamentos do nó 18 na direção Z – Torres autoportantes SS – Ruptura cabo para-raios



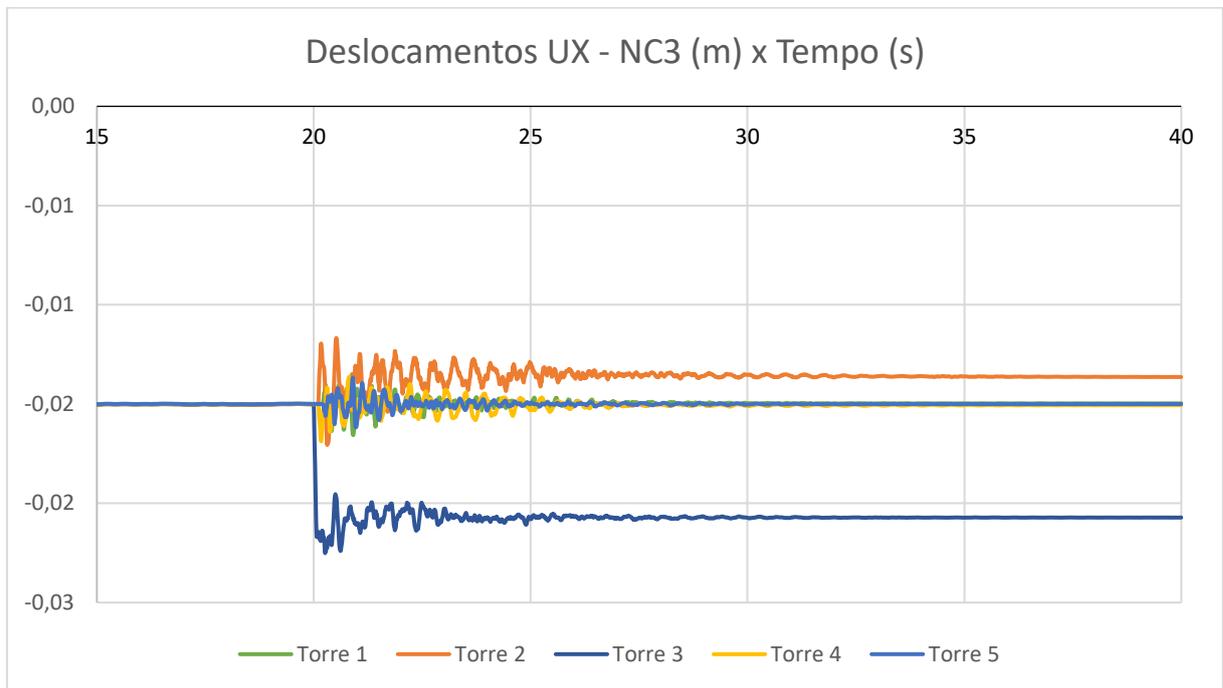
Fonte: Autor

É possível verificar que a amplitude de deslocamentos é bastante inferior à ruptura do cabo condutor.

5.2.3 Deslocamentos no Eixo X.

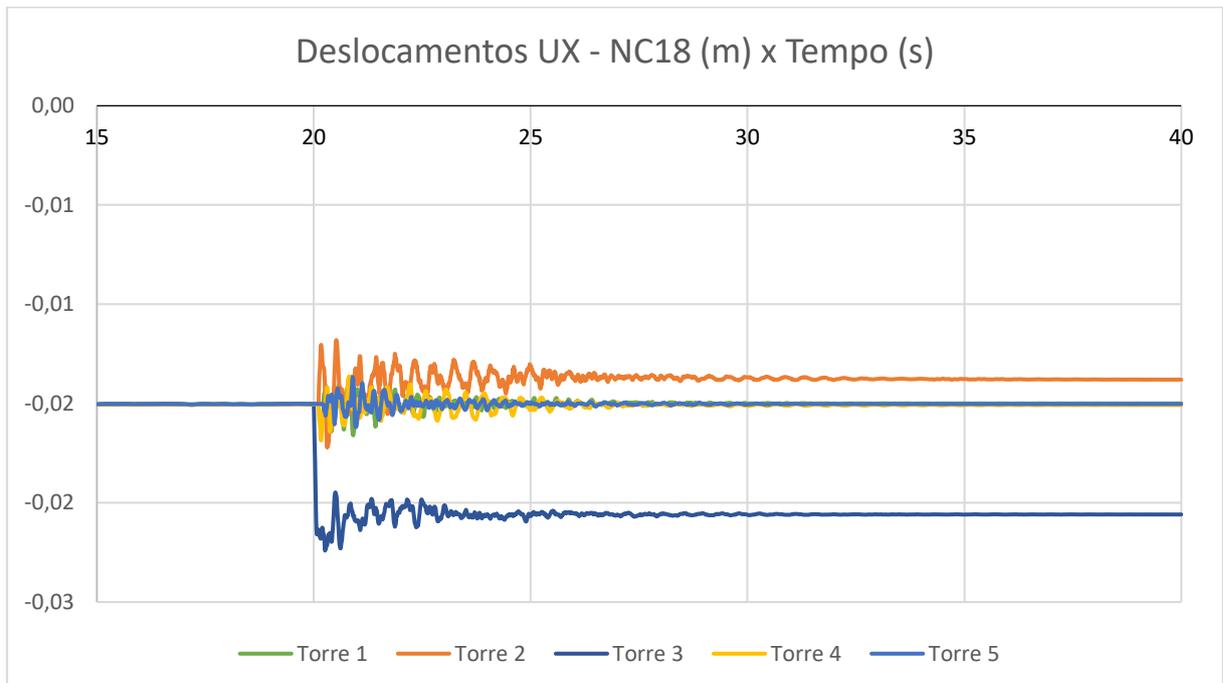
As Figuras 5.14 e 5.15 apresentam os deslocamentos no eixo X, transversal à linha de transmissão com torres SS, no evento da ruptura de cabo para-raios.

Figura 5.14 – Deslocamentos do nó 3 na direção X – Torres autoportantes SS – Ruptura Para-raios



Fonte: Autor

Figura 5.15 – Deslocamentos do nó 18 na direção X – Torres autoportantes SS – Ruptura do cabo para-raios



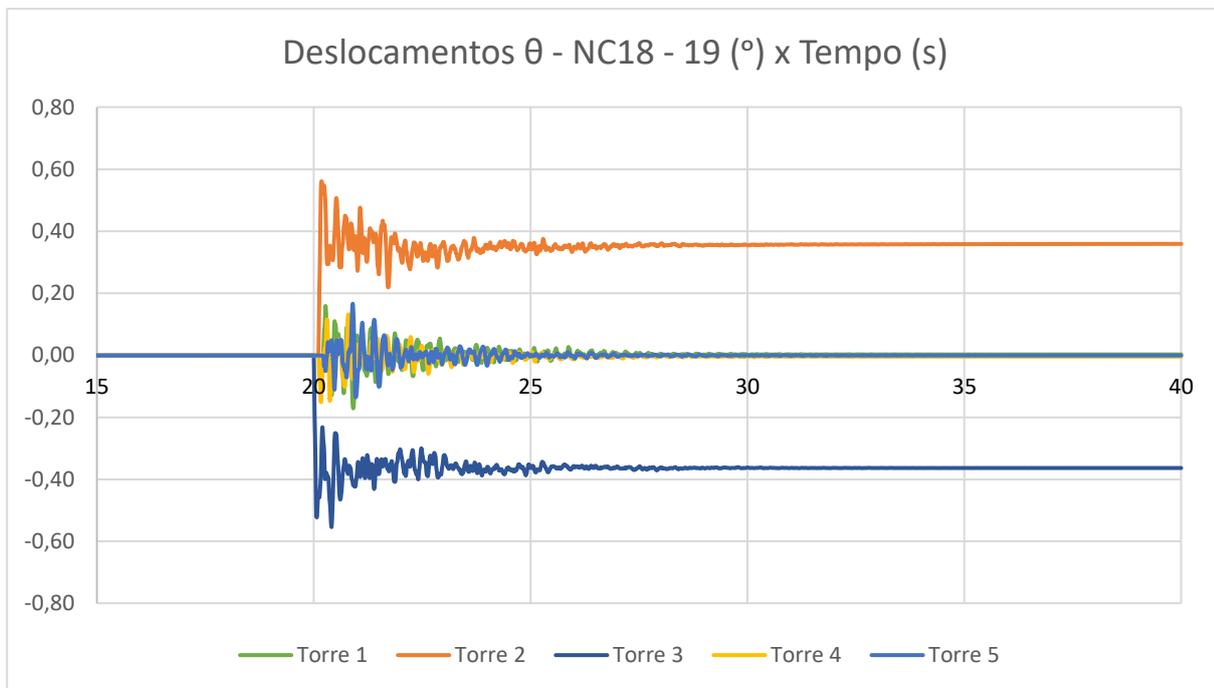
Fonte: Autor

Os deslocamentos na direção X foram mais acentuados na Torre 3, que após a ruptura do cabo para-raios, fica com cargas assimétricas, sustentando somente um vão de cabo. Essa diferença de cargas faz a torre se deslocar lateralmente, porém esse deslocamento é irrelevante quando comparados com os da direção Z.

5.2.4 Deslocamento Angular

A Figura 5.16 apresenta os deslocamentos angulares no topo das torres da LT com torres SS.

Figura 5.16 – Deslocamento Angular – Torre SS – Ruptura Para-raios



Fonte: Autor

É possível verificar que a Torre 3 apresenta deslocamentos bastante superiores às demais torres da LT. Isso ocorre devido à posição do cabo rompido, que mantém somente um dos braços da torre tensionado.

5.2.5 Barras que rompem no modelo de LT 5 torres autoportantes com ruptura do cabo para-raios.

Na simulação de ruptura de cabo para-raios na rotina do método da integração direta, nenhuma barra ultrapassou a capacidade de carga dimensionada pelos esforços obtidos na análise estática.

Na Tabela 5.2 é possível observar as barras que alcançaram solicitações mais próximas da capacidade dimensionada.

Tabela 5.2 – Barras mais solicitadas em relação à capacidade no caso de ruptura do para-raios.

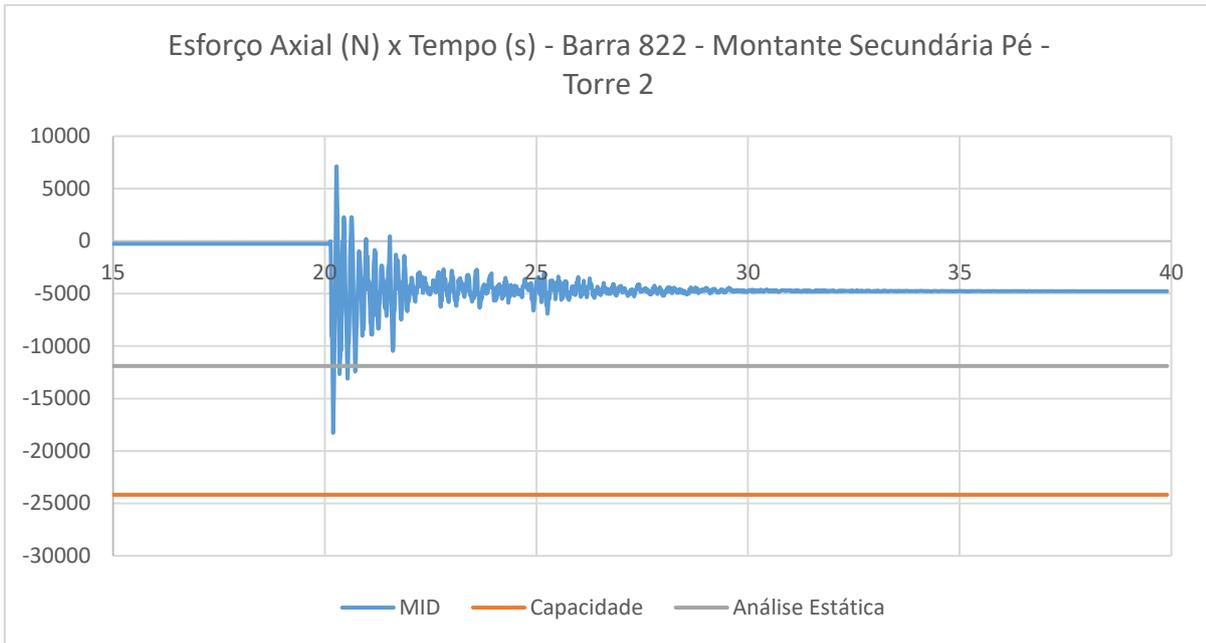
BARRA	MAX.COMP.(N)	CAP.COMP.(N)	MAX.COMP/ CAP.COMP	TEMPO(s)	ESF.AXIAL RESIDUAL(N)	AMP.DIN.MAX
822	-1,83E+04	2,42E+04	0,76	20,20	-4,78E+03	3,83
1371	-1,82E+04	2,42E+04	0,75	20,09	-4,84E+03	3,77
1152	-4,06E+04	5,82E+04	0,7	21,90	-3,43E+04	1,18
605	-3,94E+04	5,82E+04	0,68	21,82	-3,40E+04	1,16
1164	-3,96E+04	5,82E+04	0,68	21,91	-3,25E+04	1,22
1410	-4,76E+04	7,03E+04	0,68	21,94	-3,77E+04	1,26
617	-3,86E+04	5,82E+04	0,66	21,77	-3,23E+04	1,2
554	-2,33E+04	3,59E+04	0,65	21,34	-1,87E+04	1,25
863	-4,49E+04	7,03E+04	0,64	21,83	-3,74E+04	1,2
1099	-2,21E+04	3,59E+04	0,61	21,39	-1,86E+04	1,19

Fonte: Autor

5.2.6 Esforço Axial nas barras do modelo de LT 5 torres autoportantes com ruptura do cabo para-raios.

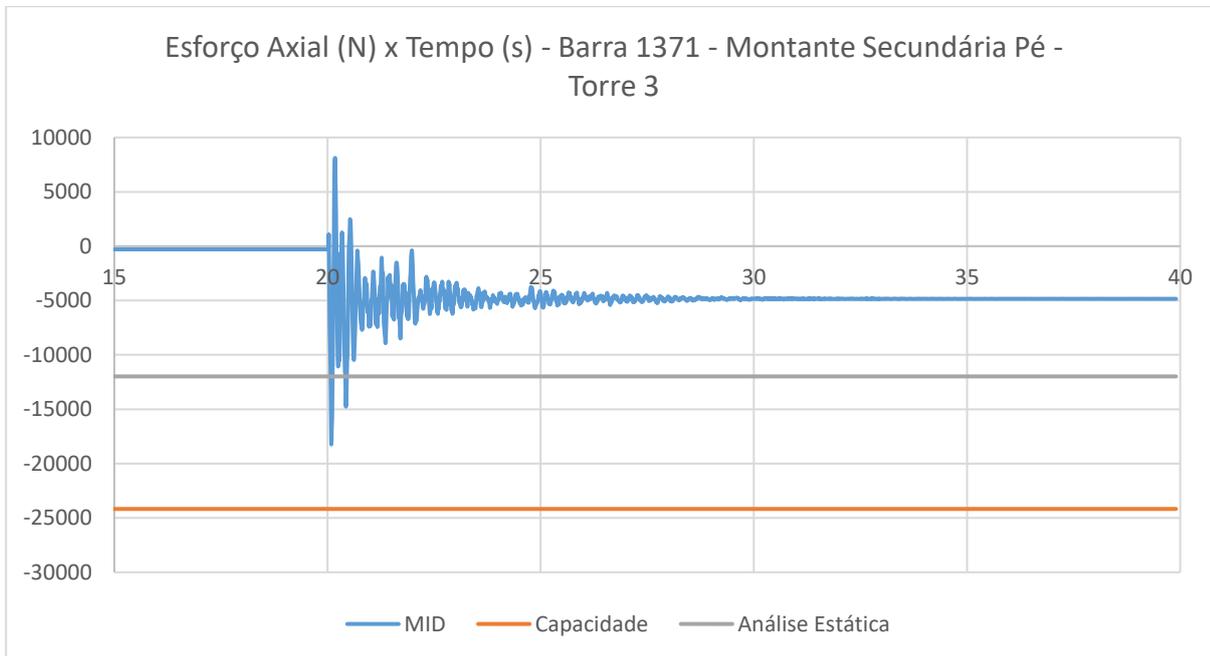
É possível analisar pelas Figuras 5.17 e 5.18 que apesar das barras não excederem a capacidade dimensionada, excedem a solicitação obtida pelo modelo estático em alguns casos, como os dos montantes secundários dos pés apresentados. No caso das Figuras 5.19 e 5.20, de montantes principais da porção superior da torre, que os esforços da análise dinâmica são em todo o tempo de análise inferiores aos da análise estática.

Figura 5.17 – Esforço Axial - Barra 822 – Torre SS – Ruptura Cabo Para-raios



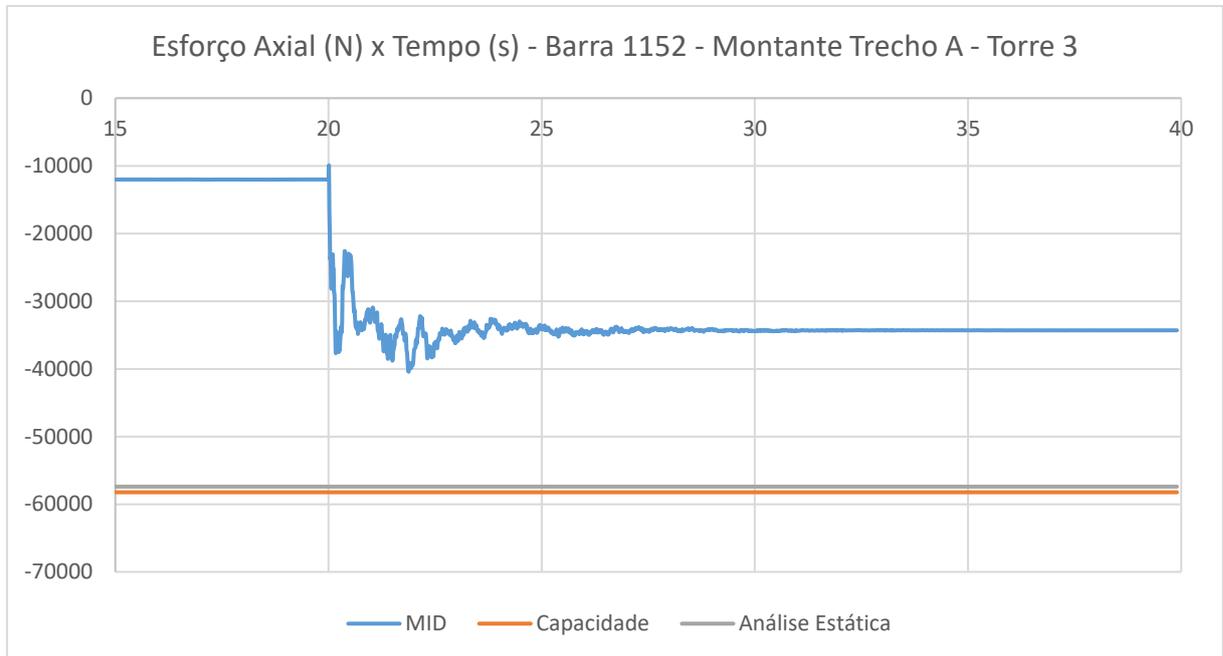
Fonte: Autor

Figura 5.18 – Esforço Axial – Barra 1371 – Torre SS – Ruptura Cabo Para-raios



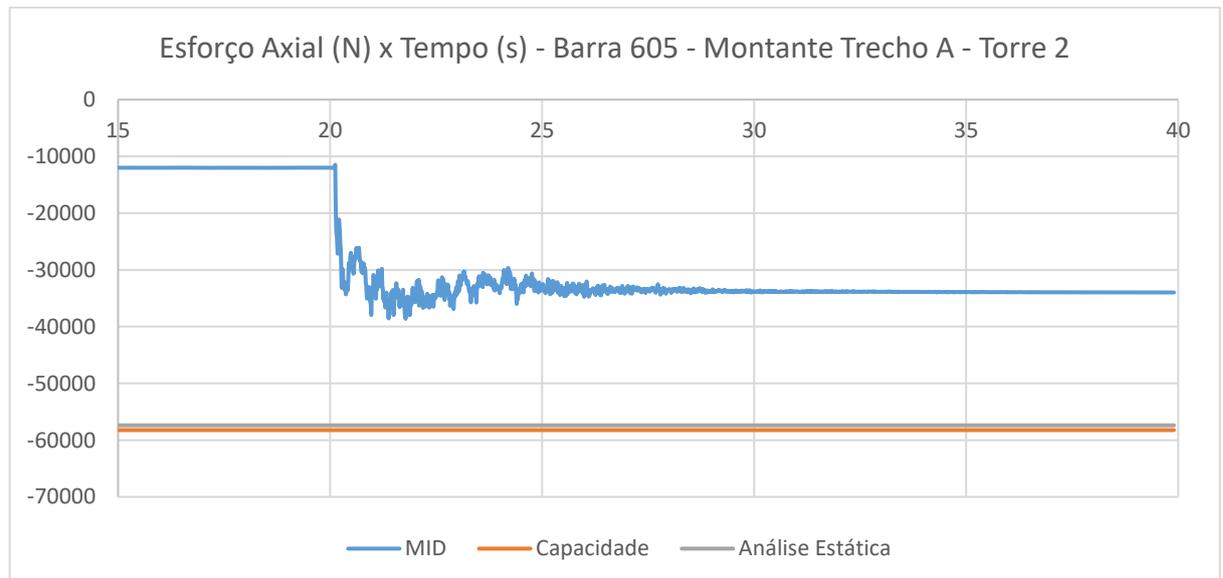
Fonte: Autor

Figura 5.19 – Esforço Axial – Barra 1152 – Torre SS – Ruptura Cabo Para-raios



Fonte: Autor

Figura 5.20 – Esforço Axial – Barra 605 – Torre SS – Ruptura Cabo Para-raios

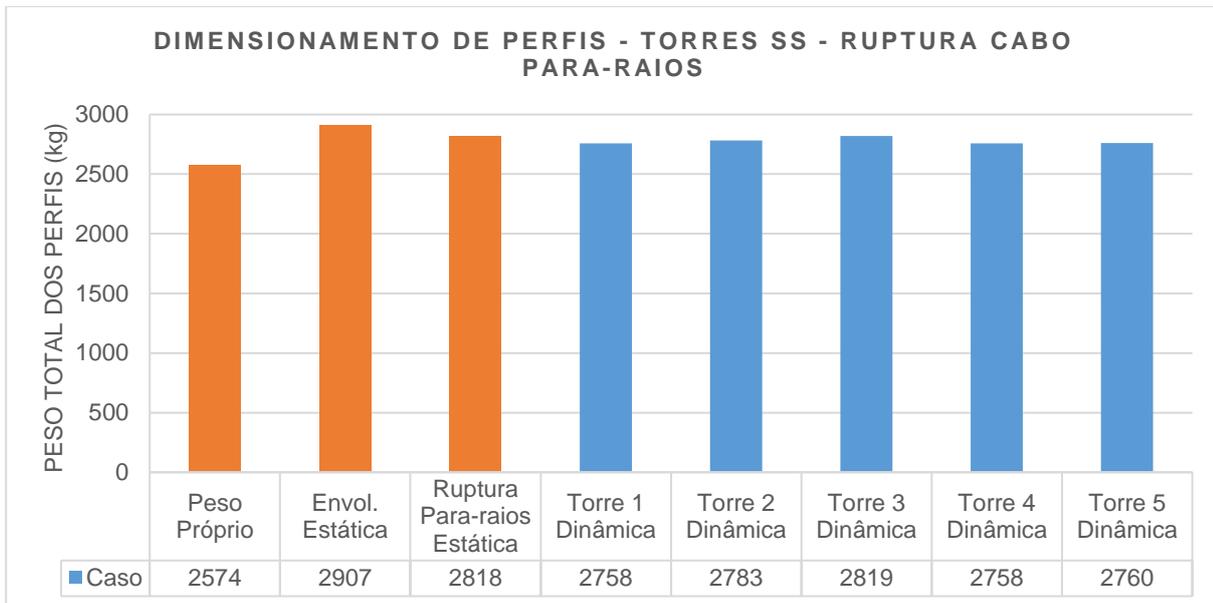


Fonte: Autor

5.2.7 Dimensionamento das torres SS conforme esforços da análise dinâmica da ruptura de cabo para-raios

A Figura 5.21 mostra o dimensionamento das torres autoportantes SS a partir dos esforços obtidos na análise dinâmica em comparação com o dimensionamento inicial a partir dos esforços de envoltória da análise estática.

Figura 5.21 – Dimensionamento das torres – análise dinâmica da ruptura de cabo para-raios



Fonte: Autor

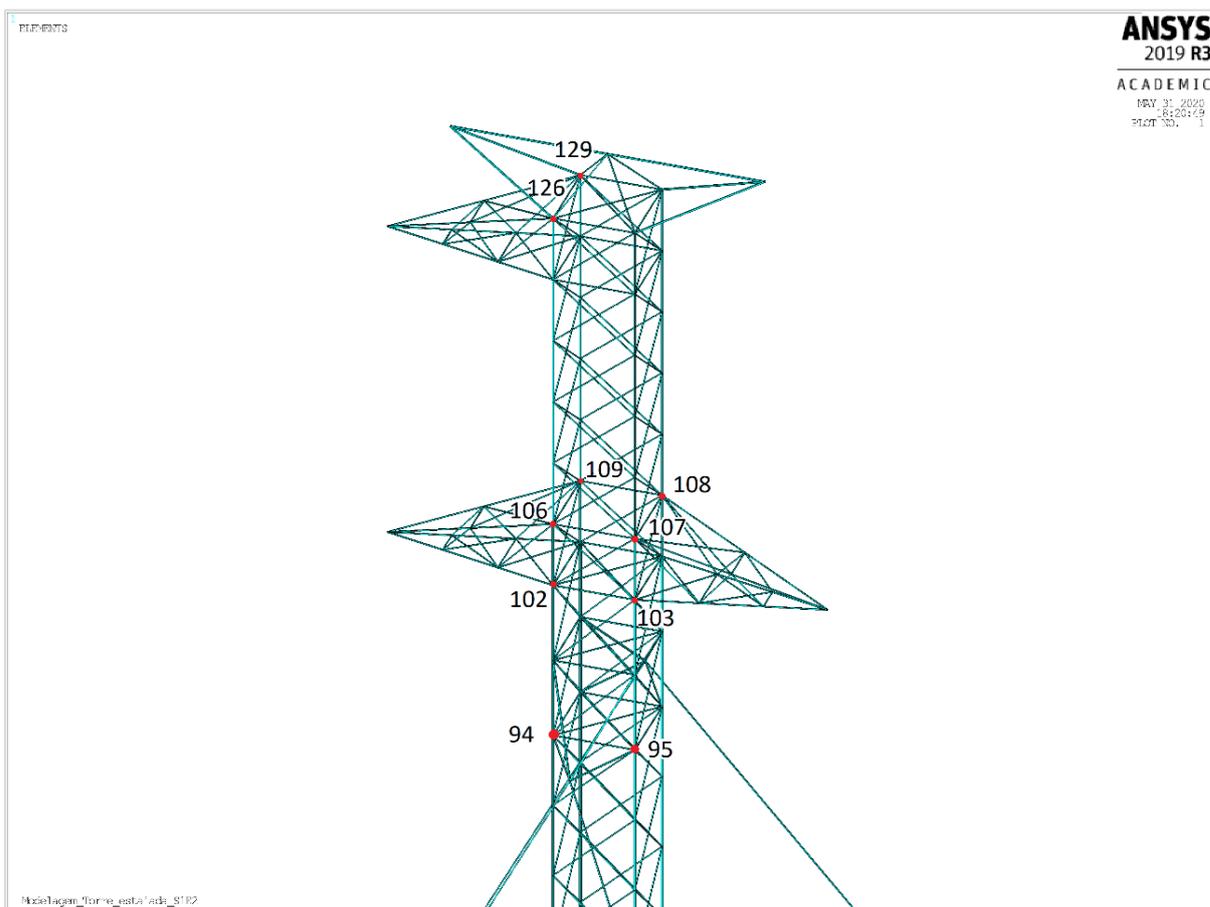
A diferença entre o dimensionamento oriundo do caso da análise estática de ruptura de cabo para-raios e a média das torres dimensionadas pela análise dinâmica é de 42kg, ou cerca de 1,5% do peso, sendo o dimensionamento pela análise estática levemente mais pesado. No caso da envoltória estática, a torre dimensionada é 131kg mais pesada que a média da análise dinâmica, equivalente a 4,5% do peso total. Na presente análise é possível observar que a torre mais solicitada do modelo de LT analisado pelo método da integração direta teve dimensionamento praticamente igual à torre dimensionada com os esforços obtidos no caso de ruptura de cabo para-raios da análise estática.

5.3 ANÁLISE DO TRECHO DE LT COM CINCO TORRES ESTAIADAS S1E2 PARA RUPTURA DE CABO CONDUTOR

5.3.1 Análise dos Deslocamentos

A Figura 5.22 apresenta a posição dos nós nos quais foram avaliados os deslocamentos nas torres estaiadas S1E2.

Figura 5.22 – Nós de controle para observação dos deslocamentos

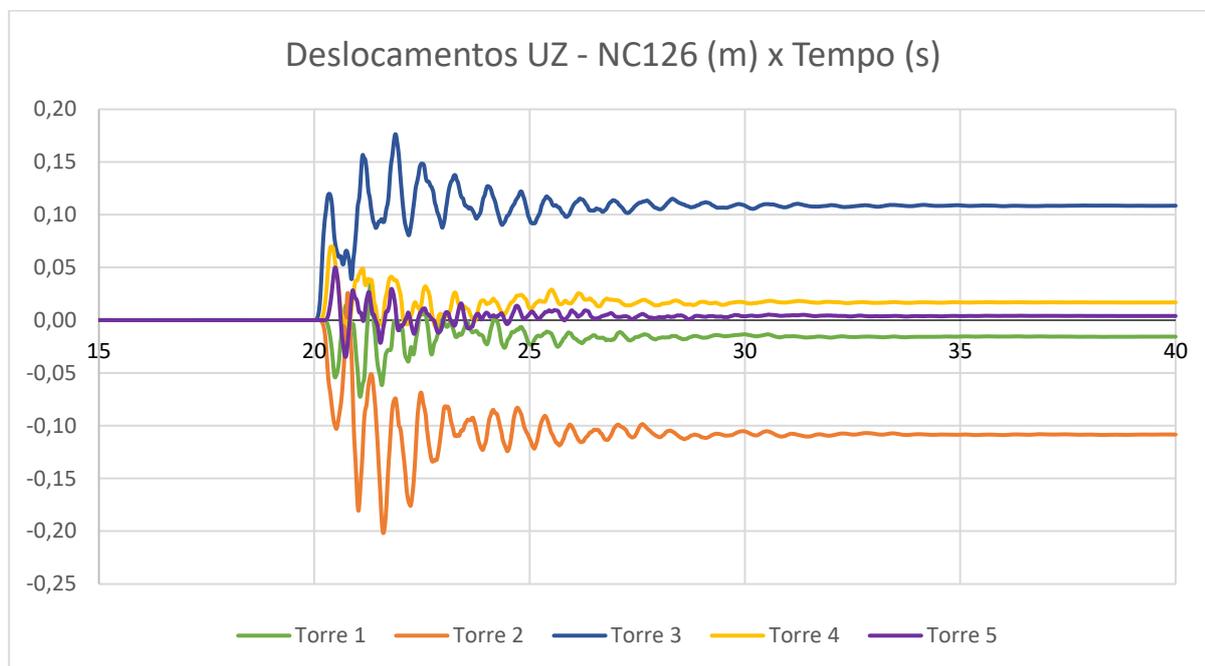


Fonte: Autor

5.3.2 Deslocamentos no Eixo Z

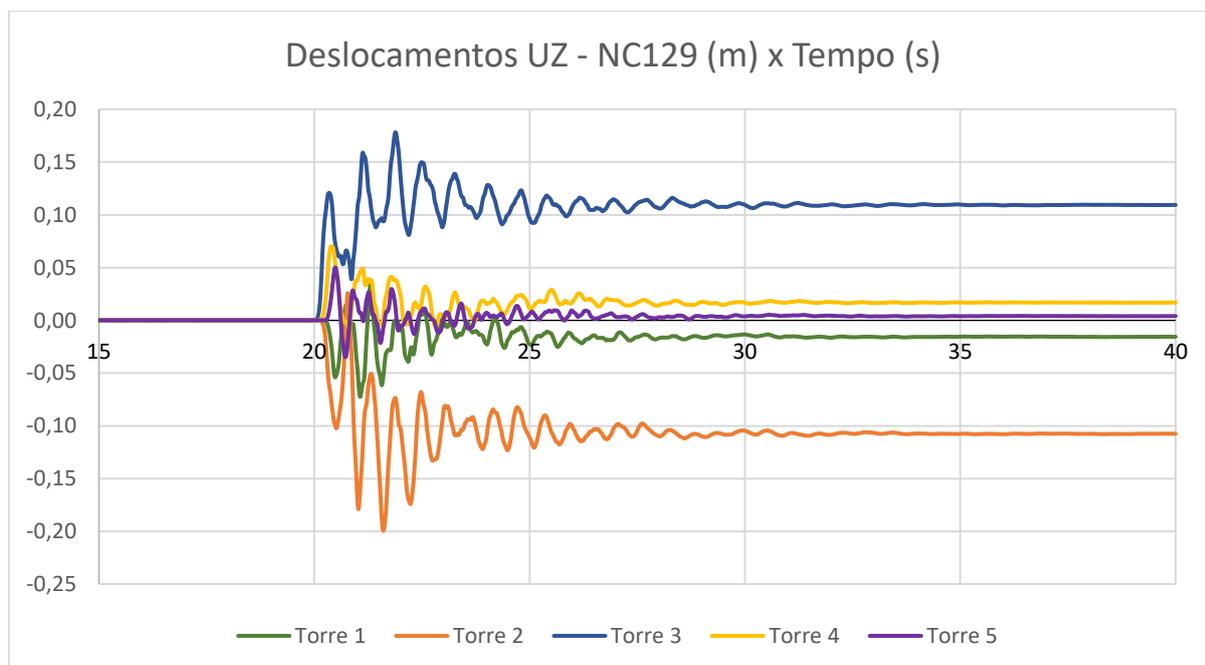
As Figuras 5.23 e 5.24 ilustram os deslocamentos dos nós das torres estaiadas S1E2 no eixo Z, longitudinal à LT no evento da ruptura do cabo condutor mais alto.

Figura 5.23 – Deslocamentos do nó 126 na direção Z – Torres estaiadas S1E2 – Ruptura cabo condutor superior



Fonte: Autor

Figura 5.24 – Deslocamentos do nó 129 na direção Z – Torres estaiadas S1E2 – Ruptura cabo condutor superior

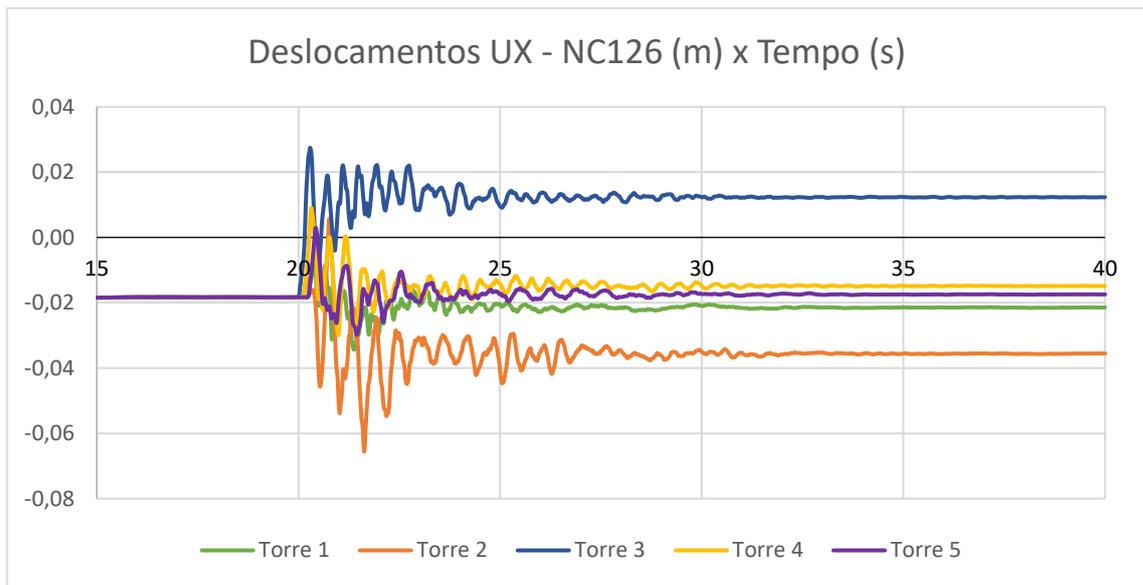


Fonte: Autor

5.3.3 Deslocamentos no eixo X

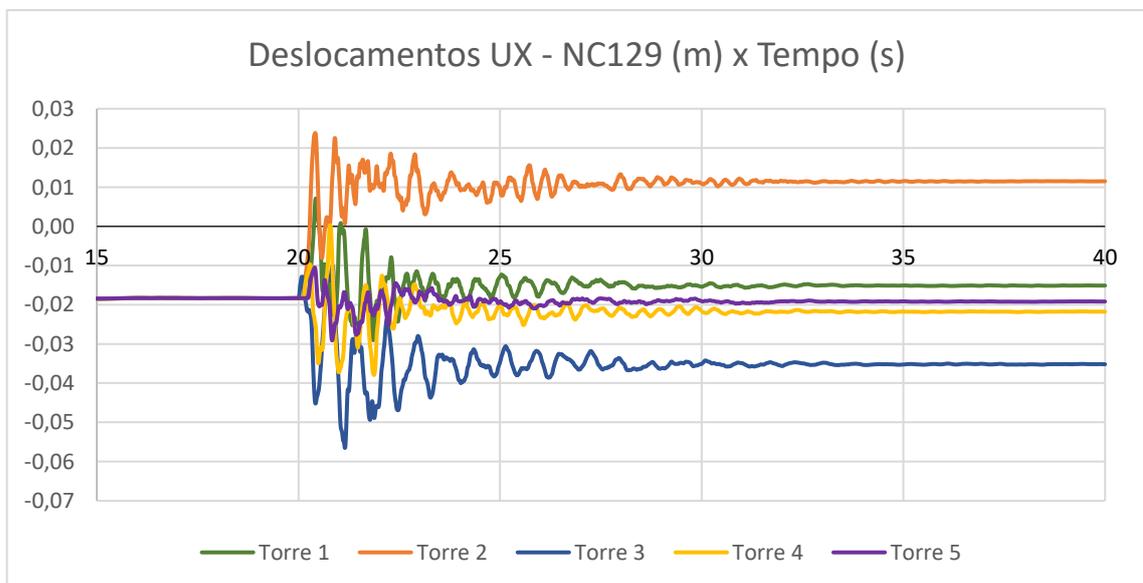
As Figuras 5.25 e 5.26 apresentam os deslocamentos dos nós da torre estaiada S1E2 no eixo X, transversal à linha de transmissão no evento da ruptura do cabo condutor.

Figura 5.25 – Deslocamentos do nó 126 na direção X – Torres estaiadas S1E2 – Ruptura cabo condutor superior



Fonte: Autor

Figura 5.26 – Deslocamentos do nó 126 na direção X – Torres estaiadas S1E2 – Ruptura do cabo condutor superior



Fonte: Autor

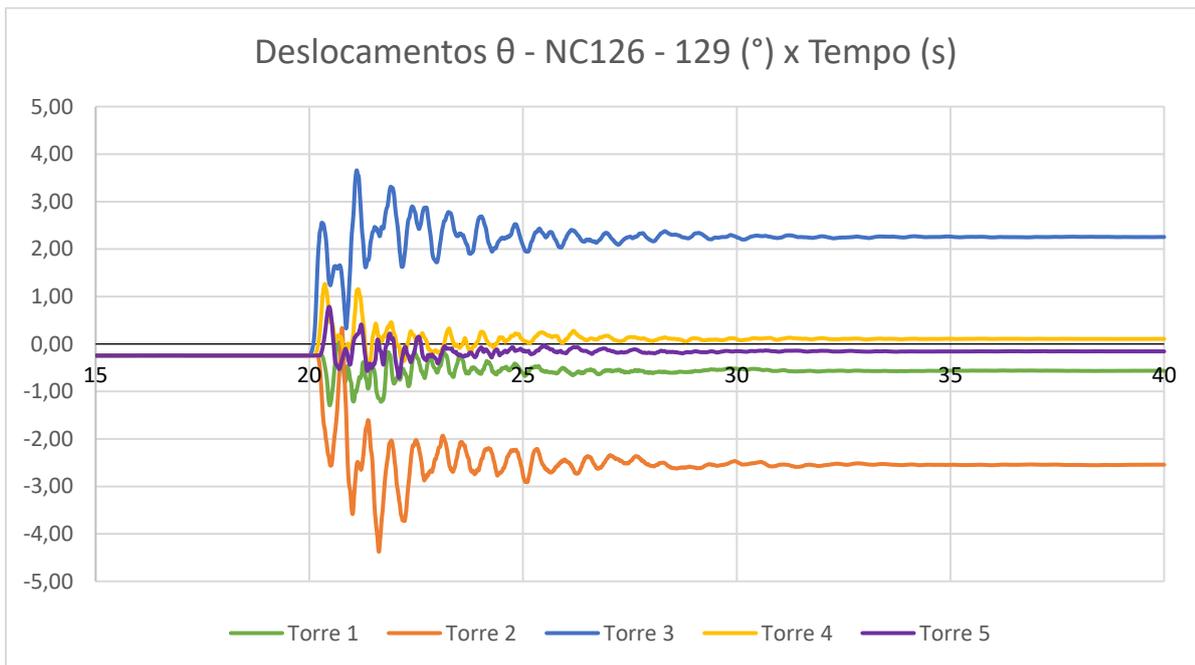
Deslocamentos são opostos entre a torre 2 e 3, mas com intensidade semelhante. São em geral maiores do que os da torre SS. O cabo que rompe está na porção negativa do eixo X. Os deslocamentos são opostos entre os nós 126 e 129 devido ao efeito de torção na torre, causado pela tensão residual do cabo que rompe, que tem direção oposta entre as duas torres.

5.3.4 Deslocamentos angulares

A Figura 5.27 ilustra o deslocamento angular no topo das torres estaiadas. A forma de obtenção dos deslocamentos angulares é a mesma utilizada nas torres autoportantes, descrita em 5.1.4.

É possível verificar que, em relação à torre autoportante, os deslocamentos angulares são cerca de 250% superiores, o que indica uma rigidez à torção menor na torre estaiada.

Figura 5.27 – Deslocamento Angular – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Condutor



Fonte: Autor

5.3.5 Barras que Rompem Modelo 5 Torres S1E2 Ruptura do Cabo Condutor

Das 2695 barras de torre do modelo, 156 barras ultrapassam em algum momento a capacidade projetada, o que equivale a 5,79% das barras do modelo. Em todos os casos, o esforço preponderante é a compressão. Esse índice é bastante

superior ao verificado nas torres autoportantes. O grupo de barras mais afetado é o dos montantes, com 96 barras, seguido das diagonais com 33, braços com 17 e horizontais com 10 barras. A Tabela 5.3 apresenta um resumo da quantidade de barras que rompem em cada uma das torres do modelo de linha de transmissão.

Tabela 5.3 – Barras que rompem – Torre S1E2 – Ruptura Condutor

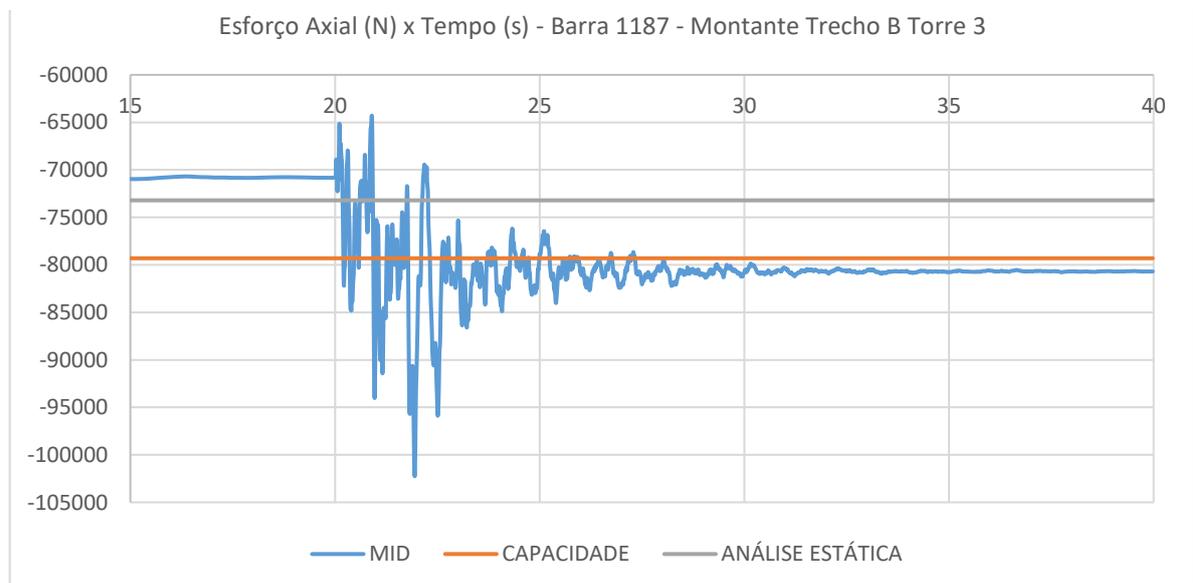
Torre	Nº de Barras	Proporção entre torres	N _{SD} / R _D		Amplificação Dinâmica	
			Média	Máximo	Média	Máxima
Torre 1	20	13,9%	1,07	1,14	1,216	1,31
Torre 2	61	42,4%	1,18	2,22	1,519	3,59
Torre 3	36	25,0%	1,24	2,29	1,556	2,03
Torre 4	18	12,5%	1,04	1,11	1,222	1,3
Torre 5	9	6,3%	1,04	1,08	1,161	1,21
	144	100,0%	1,15			

Fonte: Autor

5.3.6 Esforços nas barras de torre do modelo de 5 torres S1E2.

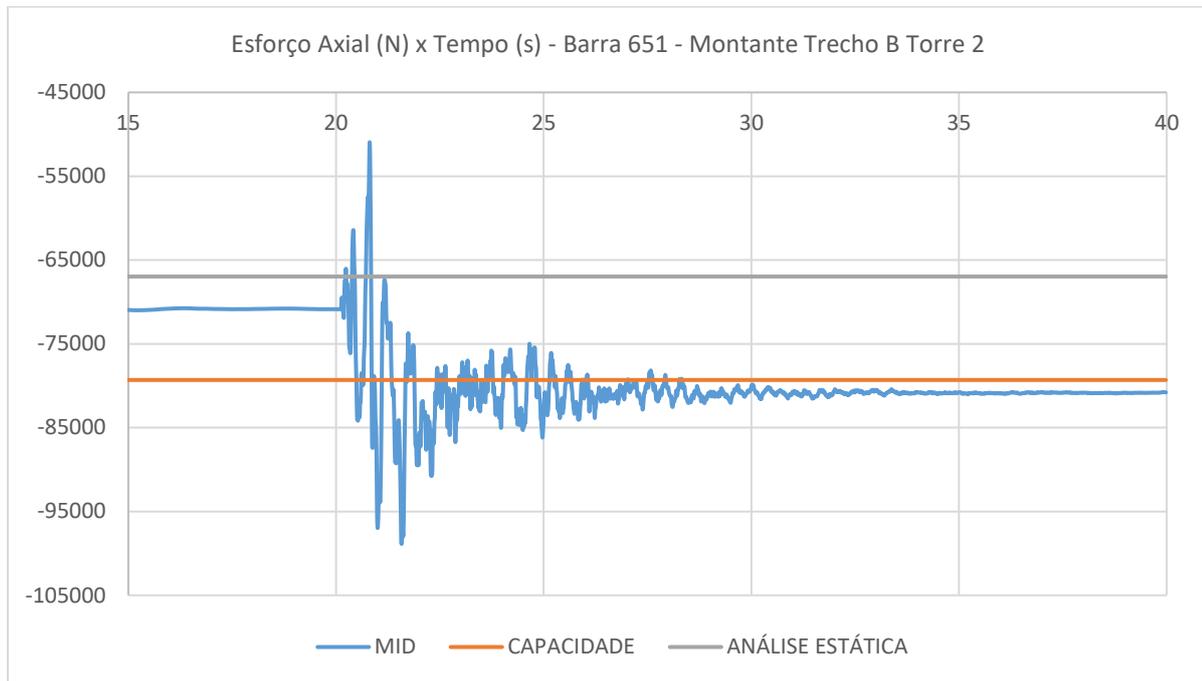
A seguir serão apresentadas as barras cujos esforços no modelo estrutural de análise dinâmica superaram a sua capacidade por maior margem, como mostram as Figura 5.28 a 5.32.

Figura 5.28 – Esforço Axial – Barra 1187 – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Condutor



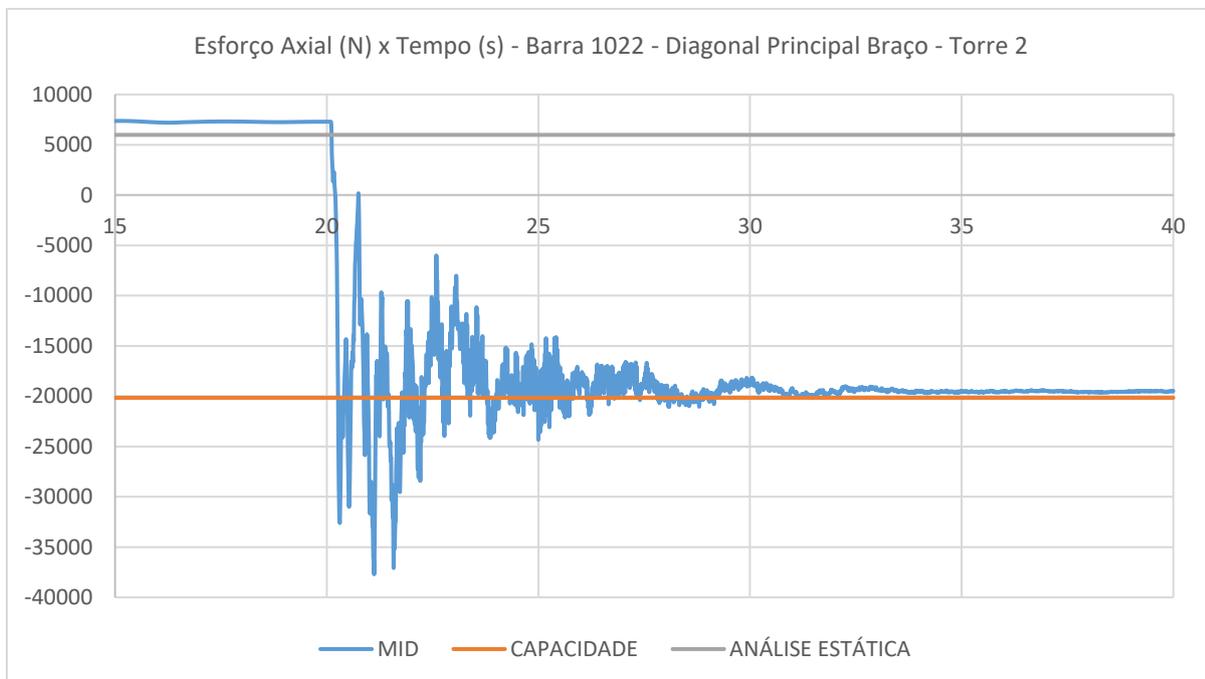
Fonte: Autor

Figura 5.29 – Esforço Axial – Barra 651 – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Condutor



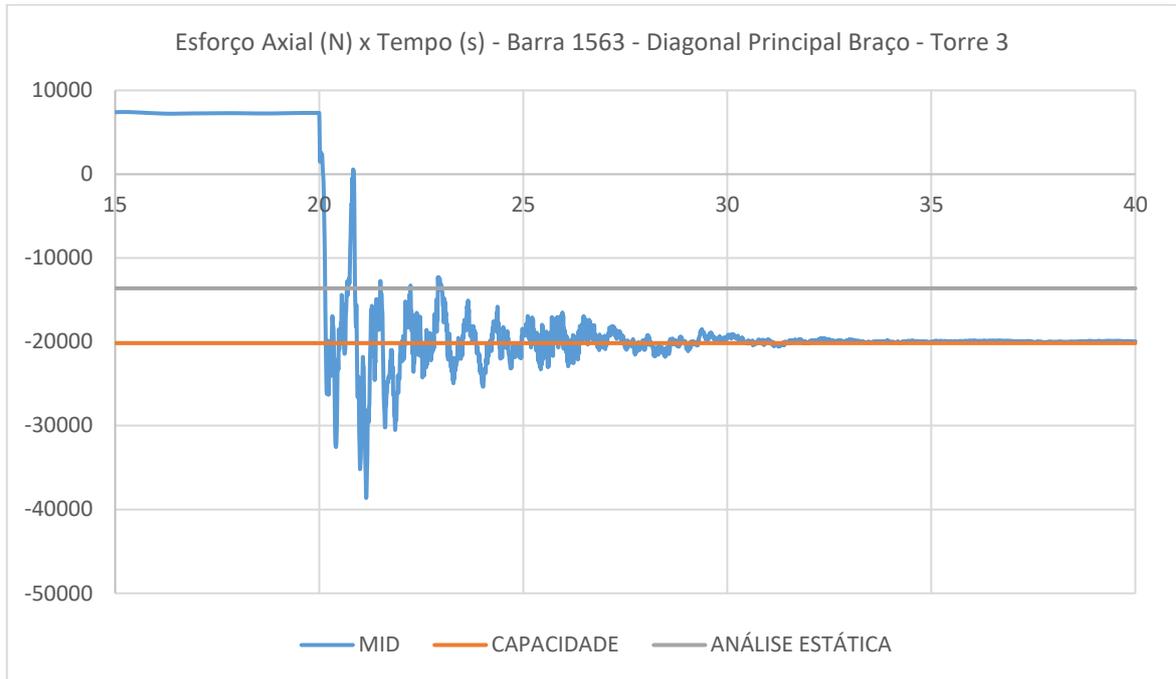
Fonte: Autor

Figura 5.30 – Esforço Axial – Barra 1022 – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Condutor



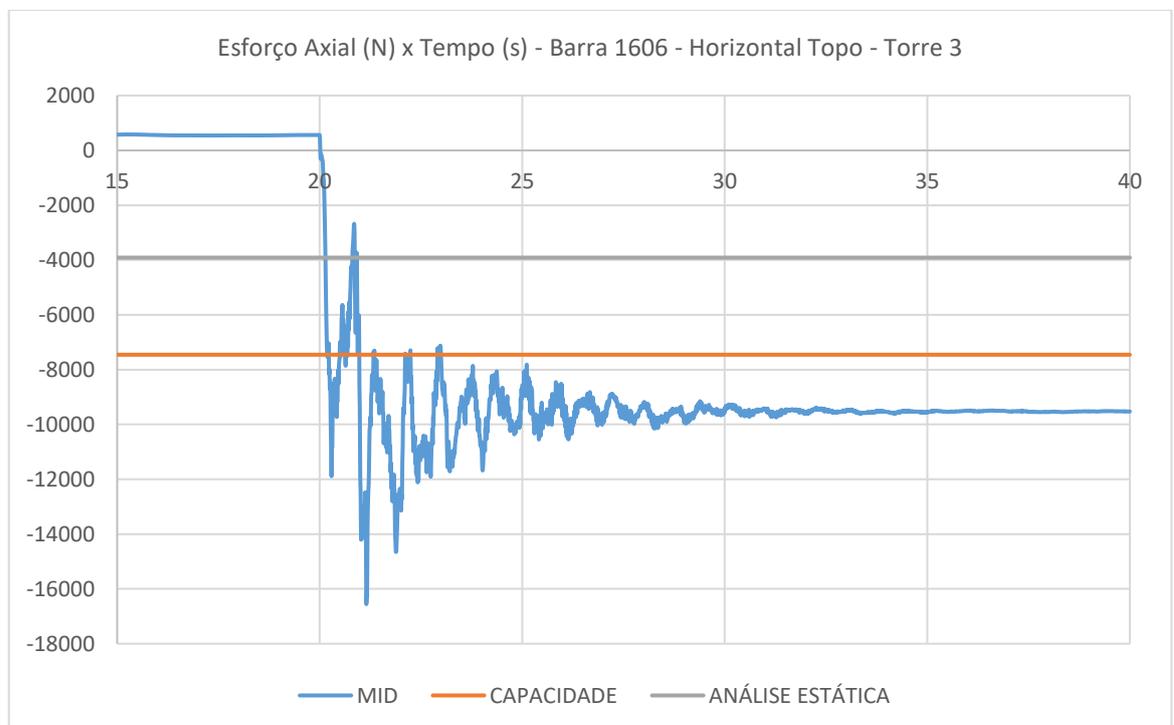
Fonte: Autor

Figura 5.31 – Esforço Axial – Barra 1563 - Torre S1E2 – Ruptura Cabo Condutor



Fonte: Autor

Figura 5.32 – Esforço Axial – Barra 1606 – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Condutor

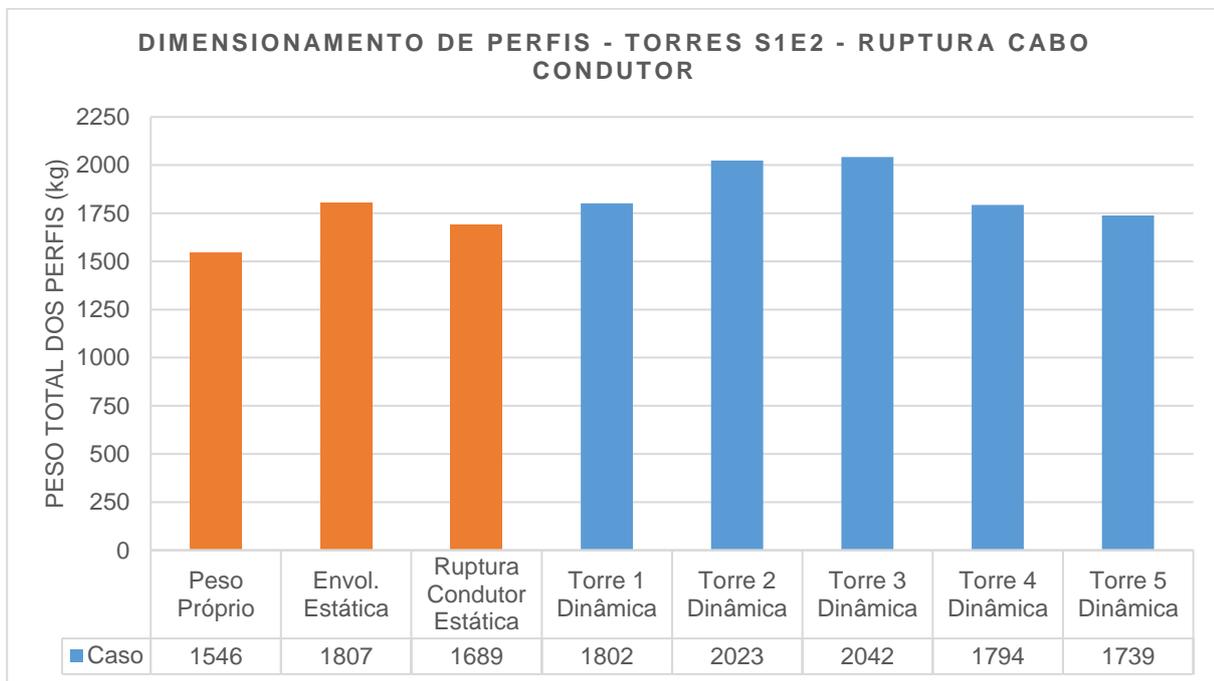


Fonte: Autor

5.3.7 Dimensionamento das torres S1E2 conforme esforços da análise dinâmica da ruptura de cabo condutor

Devido ao grande número de barras que rompem, o dimensionamento de barras pelos esforços da análise dinâmica é substancialmente maior considerando esses esforços. Para dimensionamento das torres 2 e 3, foi necessário um acréscimo de 235 kg de aço, o que equivale a mais de 10% de acréscimo no peso da estrutura. Consequentemente, pode-se estimar um acréscimo de custos da mesma magnitude. Apesar de haver diversas barras que rompem nas torres 1 e 4, o dimensionamento pelos esforços dessas torres não foi maior do que o da envoltória estática. Tal dimensionamento foi feito somente para o caso da ruptura do cabo condutor superior, um dimensionamento feito com base em uma envoltória de esforços da ruptura de todos os cabos com a análise dinâmica resultaria ligeiramente superior (Figura 5.33).

Figura 5.33 – Dimensionamento das torres S1E2 – análise dinâmica da ruptura de cabo condutor



Fonte: Autor

5.4 ANÁLISE DO TRECHO DE LT COM CINCO TORRES ESTAIADAS S1E2 PARA RUPTURA DE CABO PARA-RAIOS.

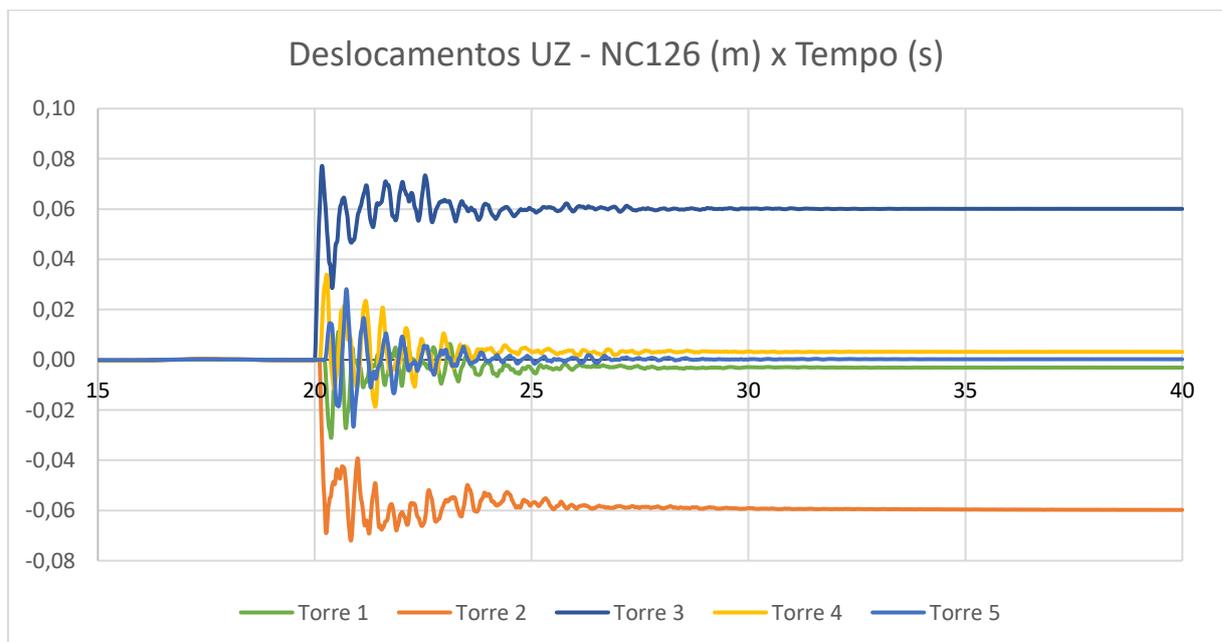
5.4.1 Análise dos Deslocamentos

Os deslocamentos foram monitorados nos nós apresentados na Figura 5.22, os mesmos avaliados para a ruptura do cabo condutor. Serão apresentados aqui os nós que apresentam o maior deslocamento absoluto.

5.4.2 Deslocamentos no Eixo Z

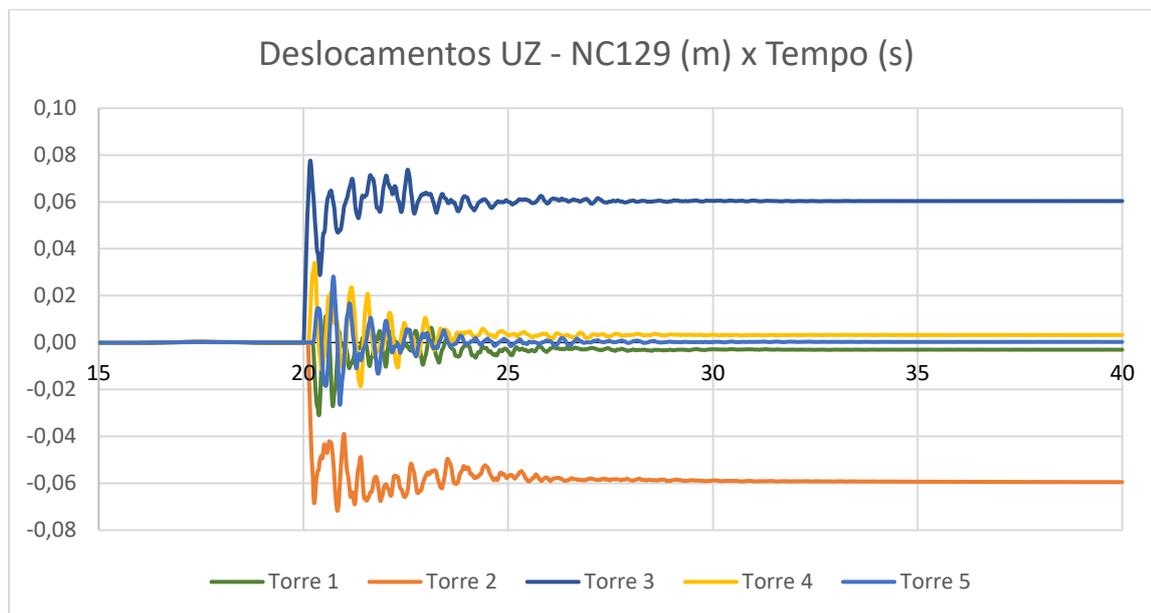
Os deslocamentos seguem o mesmo padrão da ruptura de cabo condutor, porém com magnitude relativamente menor. Enquanto os deslocamentos na ruptura do cabo condutor chegaram a aproximadamente 20 cm, na ruptura do cabo para-raios o valor máximo fica em 8 cm, estabilizando em 6 cm no repouso, conforme ilustram as Figuras 5.34 e 5.35.

Figura 5.34 – Deslocamentos do nó 126 na direção Z – Torres Estaiadas S1E2 – Ruptura de cabo para-raios



Fonte: Autor

Figura 5.35 – Deslocamentos do nó 129 na direção Z – Torres estaiadas S1E2 – Ruptura de cabo para-raios

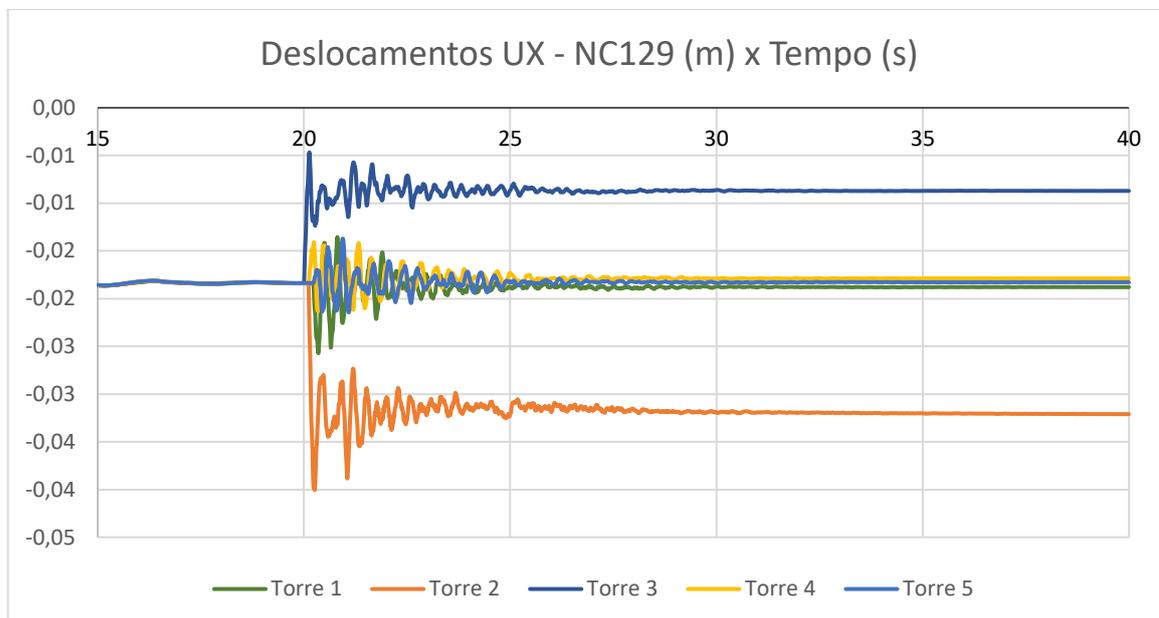


Fonte: Autor

5.4.3 Deslocamentos no eixo X

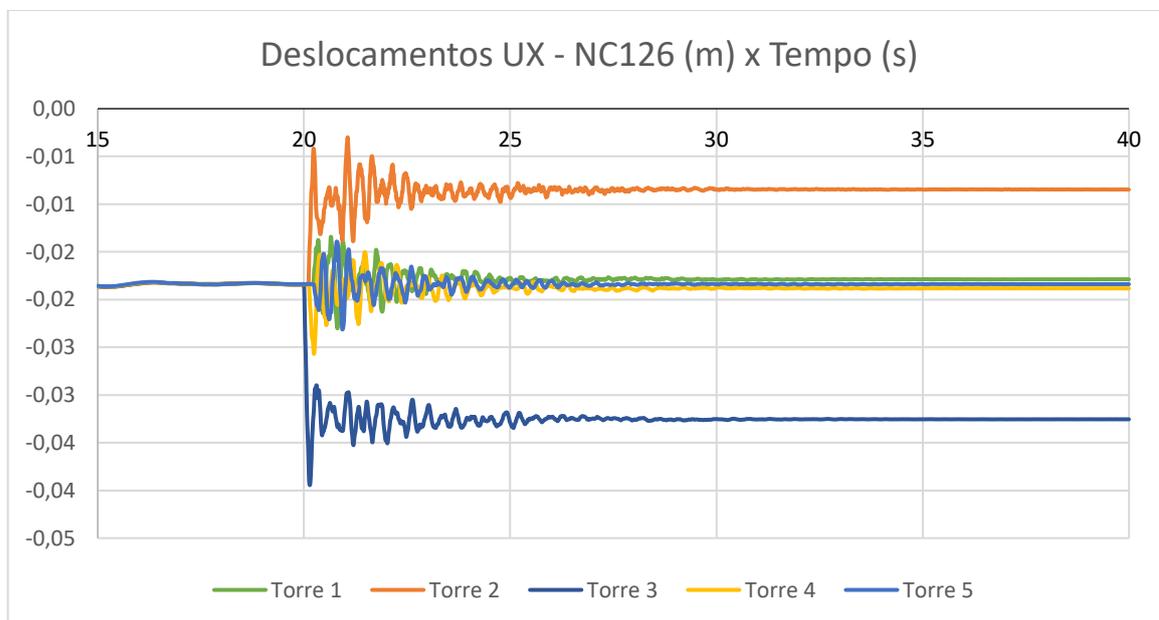
As Figuras 5.36 e 5.37 ilustram os deslocamentos no Eixo X das torres estaiadas S1E2 no evento da ruptura de cabo para-raios. É possível observar que as torres se deslocam em menor intensidade em comparação com o caso da ruptura do cabo condutor.

Figura 5.36 – Deslocamentos do nó 126 na direção X – Torres estaiadas S1E2 – Ruptura de cabo para-raios



Fonte: Autor

Figura 5.37 – Deslocamentos do nó 129 na direção X – Torres estaiadas S1E2 – Ruptura de cabo para-raios

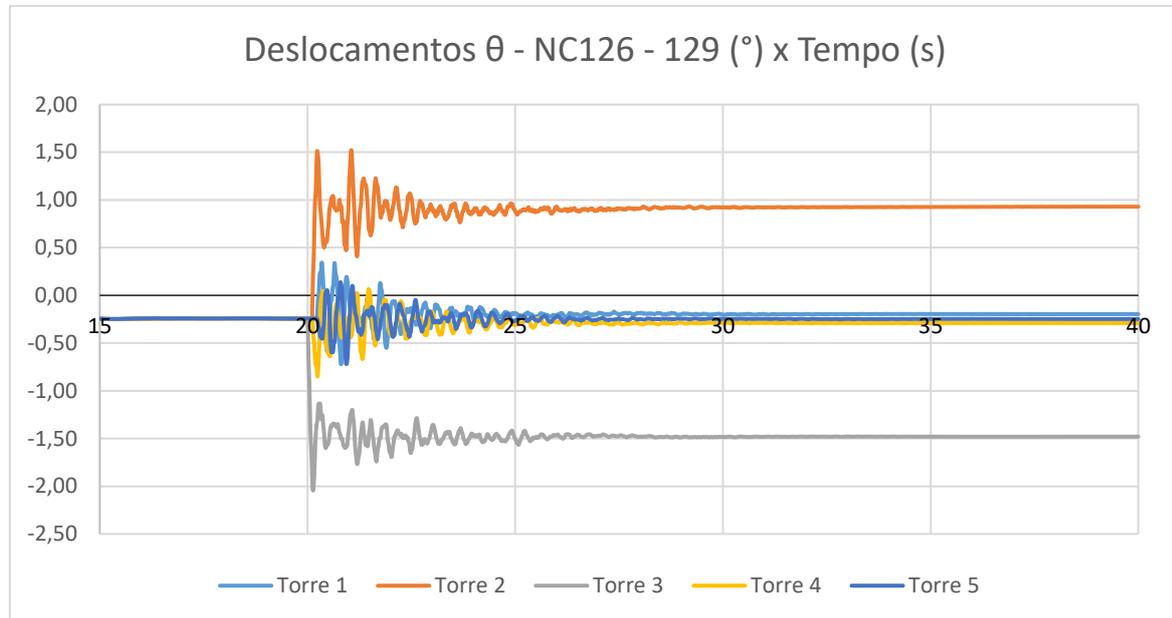


Fonte: Autor

5.4.4 Deslocamentos angulares

A Figura 5.38 ilustra os deslocamentos angulares no topo da torre estaiada no evento da ruptura do cabo condutor.

Figura 5.38 – Deslocamentos Angulares – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Condutor



Fonte: Autor

É possível verificar o comportamento similar ao das torres da LT de cinco torres estaiadas no caso da ruptura do cabo condutor, porém em menor intensidade. O deslocamento angular máximo no caso da ruptura da ruptura do cabo para-raios é cerca de 50% do valor do caso da ruptura do cabo condutor superior.

5.4.5 Barras que rompem no modelo de torres S1E2 com ruptura do cabo para-raios

Na ruptura do cabo para-raios, a quantidade de barras que rompe é menor do que na ruptura do cabo condutor. Além disso, a amplificação dinâmica média também é menor. Isso ocorre pois a o cabo para-raios tem seção bastante reduzida em relação ao cabo condutor (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 – Barras que rompem – Torres S1E2 – Ruptura Cabo Para-raios

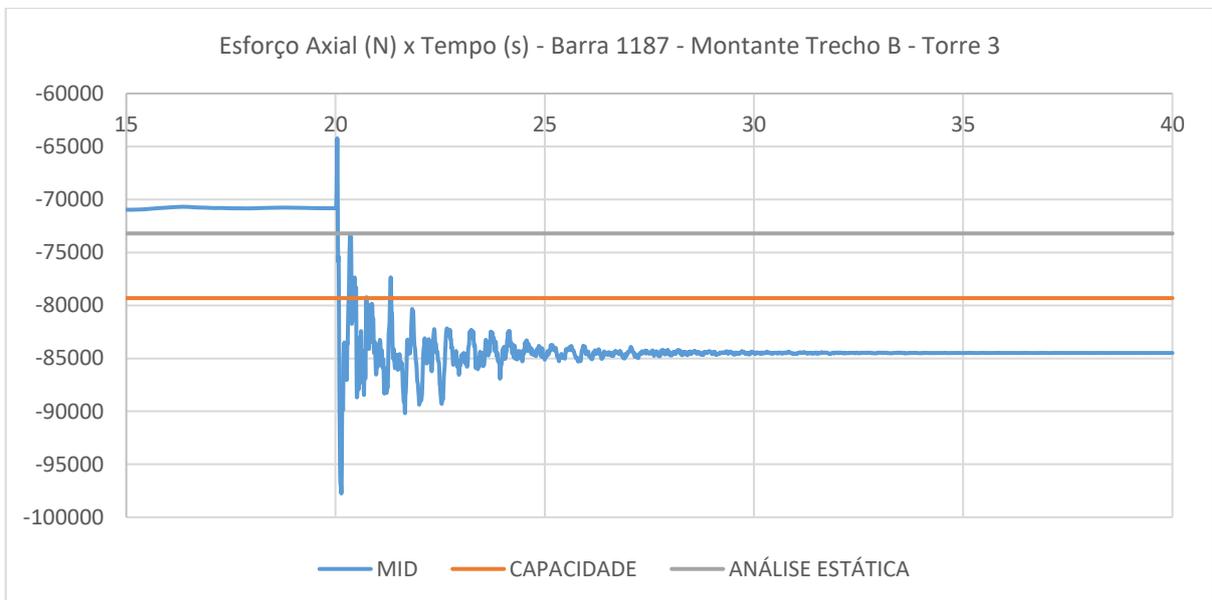
Torre	Nº de Barras	Proporcional	Esforço / Capacidade		Amplificação Dinâmica	
			Média	Máximo	Média	Máxima
Torre 1	7	12,5%	1,03	1,06	1,146	1,18
Torre 2	20	35,7%	1,09	1,22	1,158	1,4
Torre 3	19	33,9%	1,10	1,23	1,155	1,25
Torre 4	7	12,5%	1,03	1,08	1,147	1,19
Torre 5	3	5,4%	1,01	1,01	1,093	1,14
	56	100,0%	1,07			

Fonte: Autor

5.4.6 Análise dos esforços nas barras de torre S1E2 com ruptura do cabo para-raios

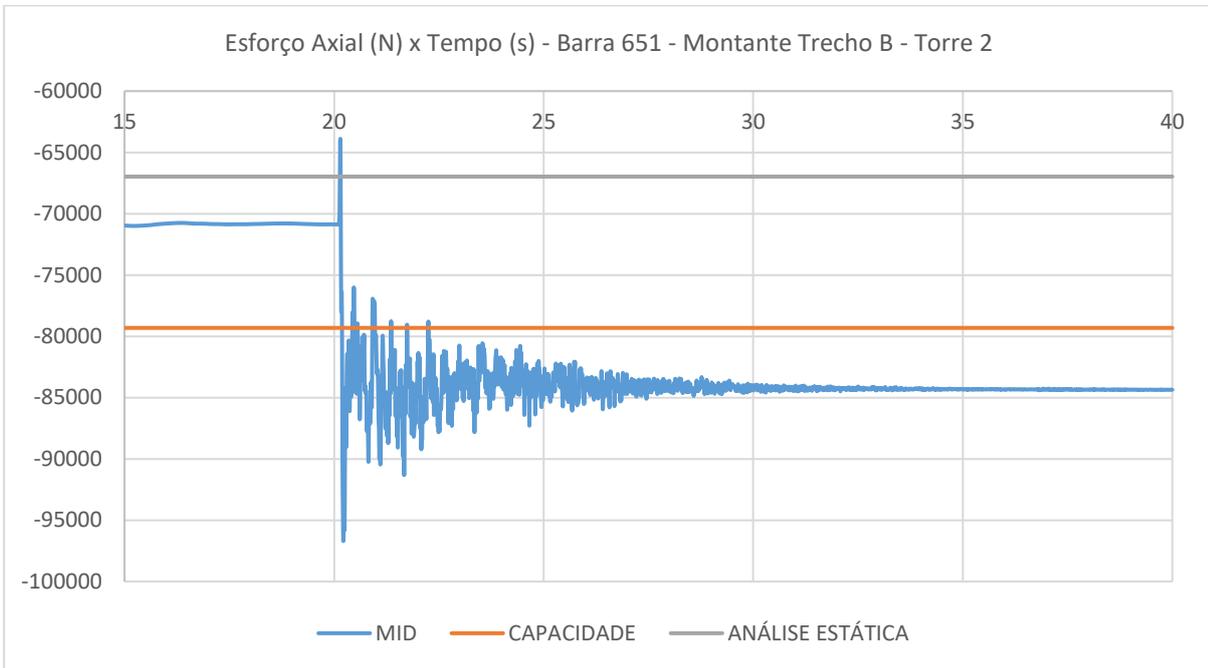
Os gráficos das Figuras 5.39 a 5.42 apresentam os esforços nas barras com ruptura do cabo para-raios.

Figura 5.39 – Esforço Axial – Barra 1187 – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Para-raios



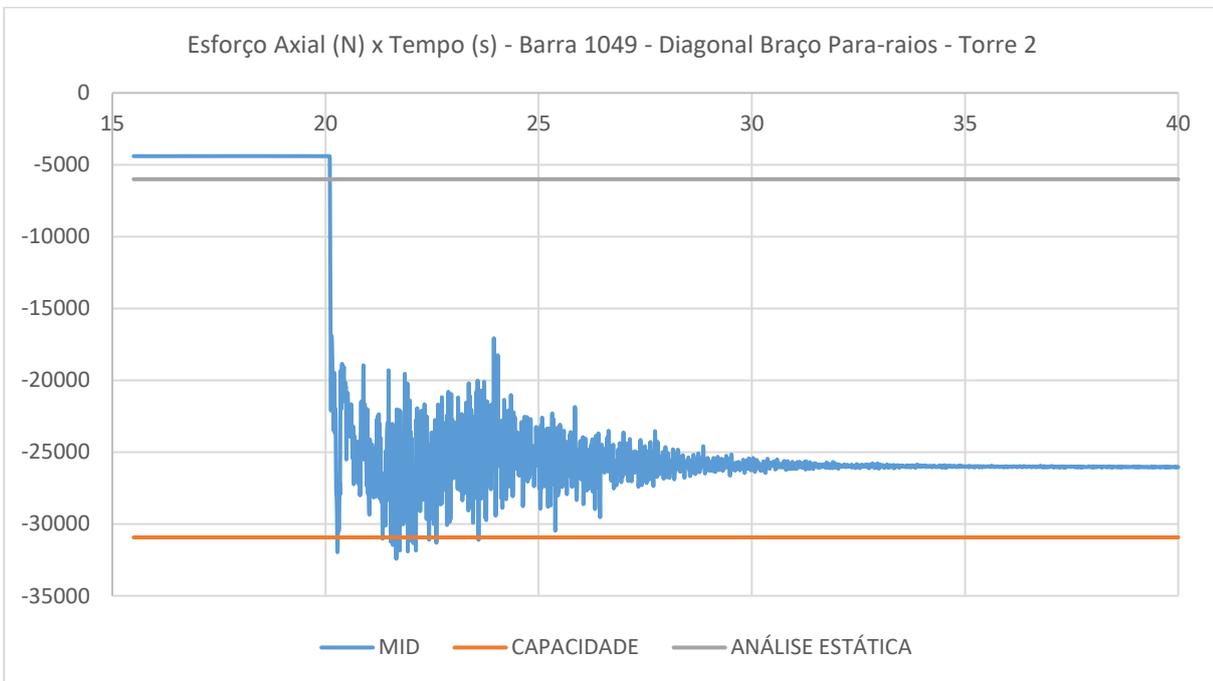
Fonte: Autor

Figura 5.40 – Esforço Axial – Barra 651 – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Para-raios



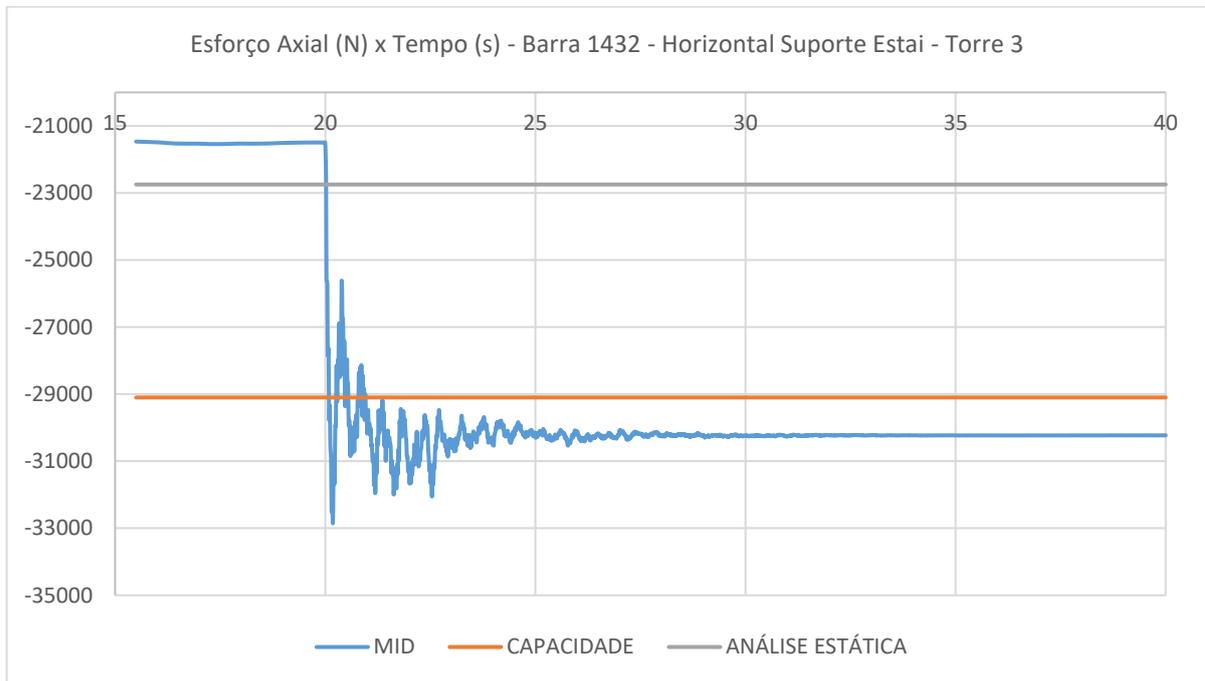
Fonte: Autor

Figura 5.41 – Esforço Axial – Barra 1049 – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Para-raios



Fonte: Autor

Figura 5.42 - Esforço Axial – Barra 1432 – Torre S1E2 – Ruptura Cabo Para-raios



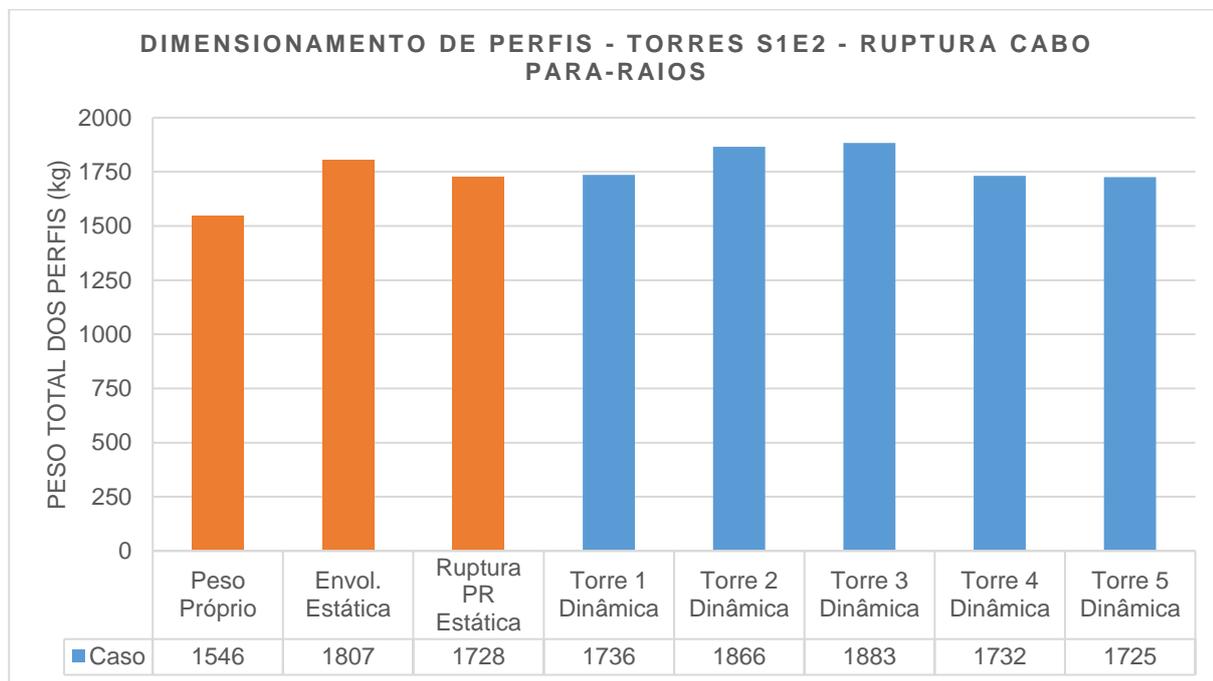
Fonte: Autor

Entre as barras que rompem, é possível verificar que a barra diagonal do braço de suporte do para-raios é a que apresenta maior discrepância entre o esforço da análise estática e o da análise dinâmica. O esforço dinâmico chega a 540% do esforço estático e 105% da capacidade da barra. Entre os montantes, é possível verificar que o esforço dinâmico alcança 144% do esforço estático e 123% da capacidade dimensionada da barra.

5.4.7 Dimensionamento das torres conforme esforços da análise dinâmica na hipótese de ruptura de cabo para-raios.

Como era esperado, com um menor número de barras que rompe, o novo dimensionamento com os esforços de ruptura de cabo para-raios é mais leve do que o para os cabos condutores. Ainda assim, é superior em 76 kg à torre dimensionada pela envoltória de cargas estáticas equivalentes (Figura 5.43).

Figura 5.43 – Dimensionamento das torres S1E2 – análise dinâmica da ruptura de cabo para-raios



Fonte: Autor

A envoltória estática resulta em dimensionamento mais leve que as torres 2 e 3, às quais são imediatamente atingidas pelo rompimento do cabo, porém mais pesados que as demais torres da linha de transmissão.

6 CONCLUSÕES

Os efeitos dinâmicos da ruptura de cabos não são facilmente representados com a utilização de carregamentos estáticos equivalentes. Apesar de os esforços serem relativamente condizentes com a análise estática na torre autoportante, houve barras onde ocorreu inversão de sentido de tensão, o que modifica o dimensionamento consideravelmente. Na torre estaiada, a discrepância entre os esforços obtidos pela análise dinâmica e a análise estática é substancialmente maior, com um número bastante maior de barras que rompem.

Não é simples identificar isoladamente os fatores que explicam essa diferença entre as comparações das duas torres, dentre as quais, pode-se enumerar:

A torre autoportante é consideravelmente mais pesada que a torre estaiada, tendo as duas praticamente a mesma altura. Como o amortecimento da estrutura foi considerado proporcional à massa, isso pode ter contribuído para uma resposta dinâmica mais moderada da torre autoportante.

A torre autoportante possui uma estrutura com perfis mais longos com grandes trechos não travados, o que faz com que boa parte dos perfis sejam escolhidos devido à esbeltez limite, ficando então superdimensionados em relação aos esforços encontrados na envoltória de ruptura de cabo. Na torre estaiada, devido à geometria mais compacta, sem os pés que se abrem em direção às fundações, e com a largura do corpo praticamente constante ao longo da sua altura, as barras em geral possuem uma sobra de resistência menor em relação aos esforços de dimensionamento, conforme pode ser observado nas tabelas Tabela 4.5 e Tabela 4.12.

Os cabos, tanto condutores quanto para-raios, das torres estaiadas têm maior massa e maior tensão de ruptura que os cabos das torres autoportantes. Apesar da envoltória estática ter considerado essas características no dimensionamento, esse fator pode estar sendo subestimado pela carga estática equivalente.

Apesar de tais incertezas, é possível afirmar que a utilização unicamente de uma envoltória de cargas estáticas equivalente pode não resultar em um dimensionamento adequado para a ruptura de cabos.

6.1 MEDIDAS MITIGADORAS POSSÍVEIS

Com a crescente evolução de métodos de análise e simulação computacional de estruturas, é cada vez mais natural que a análise dinâmica seja incorporada no dia-a-dia de projetos correntes de torres de linhas de transmissão ou outras estruturas onde tal análise seja importante para obtenção de dimensionamentos precisos e seguros. Dessa forma, é possível que as torres sejam dimensionadas para os esforços da ruptura de cabo de forma bastante precisa.

Tal consideração de esforços, para evitar o superdimensionamento e encarecimento das estruturas de suporte da LT, poderia ser feito conforme os esforços das torres mais imediatamente posteriores às torres mais afetadas. No caso das LT simuladas no presente trabalho, as torres 1 e 4. Dessa forma, no evento da ruptura de cabo causar o colapso de uma torre, as demais estariam protegidas do efeito cascata que poderia vir a ocorrer.

6.2 SUGESTÃO PARA ESTUDOS POSTERIORES

A investigação das peculiaridades dos efeitos dinâmicos da ruptura de cabo ainda pode contribuir com novas informações que seriam de grande utilidade para os projetistas e fabricantes de torres metálicas de LT. A normatização do dimensionamento de tais estruturas poderia contemplar com maior clareza os procedimentos corretos para obtenção de cargas estáticas equivalentes mais precisas, ou indicar quando é imprescindível a análise dinâmica dessas estruturas.

Podem ser feitos estudos investigando a influência isolada de cada característica da LT na resposta dinâmica, e o quanto essas características poderiam ser parametrizadas para criação de cargas estáticas equivalentes mais fiéis ao comportamento dinâmico. Atualmente a prática usual é a consideração de uma parcela da tração de ruptura do cabo como carga, porém outros fatores podem ser avaliados, como vão entre as torres, frequência natural da torre, rigidez da torre, massa linear dos cabos, entre outros.

REFERÊNCIAS

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

ABNT. **NBR 16730**: Cordoalha de fios de aço zincados para eletrificação – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações, versão corrigida. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. **NBR 8842**: Suportes metálicos treliçados para linhas de transmissão – Resistência ao carregamento. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios – Procedimento. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT. **NBR 8850**: Execução de suportes metálicos treliçados para linhas de transmissão – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ALUBAR. **Catálogo Técnico Condutores Elétricos de Alumínio**. 2015. https://alubar.net.br/img/site/arquivo/Cat_Tec_Alubar_Aluminio_2015.pdf. Acesso em 21/11/2018.

ASCE. AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCE 10-15**: Design of Latticed Steel Transmission Structures. 2015.

CIGRÉ B2-12 (WG22). **Technical Brochure. Mechanical Security of Overhead Lines**. Containing Cascading Failures and Mitigating Their Effects. 2012.

CIMAF. **Manual Técnico de Cabos**. <https://www.cimaf.com.br>. Acesso em 03/02/2018. 2009

BELGO BEKAERT. **Fios e Cordoalhas de Aço Zincado para Eletrificação e Telefonia**. <https://www.belgobekaert.com.br/wp-content/uploads/2019/02/Folder-eletrificacao.pdf>, acesso em 25/06/2019.

BENTES, J. L. **Análise Dinâmica da Ruptura de Cabos em Torres Autoportantes e Estaiadas de Linhas de Transmissão**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2013.

CAPPELLARI, T. T. O. **Determinação da Resposta Dinâmica de Feixes de Condutores em Linhas Aéreas de Transmissão**. 2005, Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CARLOS, T. B. **Análise dinâmica de torres estaiadas de linhas de transmissão submetidas à ruptura de cabo.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2015.

CLARK, M.; RICHARDS, D. J.; CLUTTERBUCK, D. **Measured dynamic Performance of Electricity Transmission Towers Following Controlled Broken-Wire Events.** *In: General Session of CIGRÉ*, 41., Paris. Proceeding [...]. Paper nº. B2-313. Paris, France, 2006.

CSA. CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA S37-01 (R2011)** Antennas, Towers, and Antenna-Supporting Structures, 2011.

GROEHS. A. G. **Mecânica Vibratória.** Editora Unisinos, São Leopoldo, 2005.

IEC. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60826:2003.** Design criteria of overhead transmission lines. 3rd ed, International standard, Geneva, Switzerland, 2003.

KAMINSKI JR. J., MIGUEL L.F.F., MENEZES R.C.R. **Aspectos Relevantes na Análise Dinâmica de Torres de LT Submetidas à Ruptura de Cabos.** *In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.* 2005, Curitiba, Brasil. Anais [...]. Curitiba, 2005.

KAMINSKI Jr., J. **Incertezas de Modelo na Análise de Torres Metálicas Trelaçadas de Linhas de Transmissão.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

KIAKOJOURI, F., DE BIAGI, V., CHIAIA, B., SHEIDAI, M. R. **Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects.** *Engineering Structures.* Vol 206. 2020.

KORDI, B. **Icy Winters in Canada's Past and Future.** 2016. <https://www.air-worldwide.com/publications/air-currents/2016/icy-winters-in-canadas-past-and-future/>. Acesso em 08/11/2020.

KEMPNER JR., L. **Longitudinal Impact Loading on Electrical Transmission Line Towers: A Scale Model Study.** 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Portland State University, Portland, Oregon, 1997.

LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI, J. A.; FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. **Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

LI, J. X.; LI, H. N.; FU, X. **Stability and Dynamic Analyses of Transmission Tower-Line Systems Subjected to Conductor Breaking.** *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, Vol. 17, No. 6, 2017.

MENEZES, R. C. R.; KAMINSKI JR., J.; FADEL MIGUEL, L. F.; MIGUEL, L. F. F.; ALVA, G. M. S. **Análise Dinâmica da Ruptura de Cabos num Tramo de LT.**

In: Encontro Regional Iberoamericano do CIGRÉ (XII ERIAC), 12., 2007, Foz do Iguaçu, Brasil. **Anais** [...]. Foz do Iguaçu, 2007.

NEXANS BRASIL. **Cabos de Alumínio Nu com Alma de Aço**. 2011. <http://www.nexans.com.br>. Acesso em 04/10/2011.

STAROSSEK, U. **Typology of progressive collapse**. Engineering Structures, v. 29, p. 2302-2307. 2007.

STAROSSEK, U. **Progressive collapse of structures**. Thomas Telford, 153p. 2009.

TIAN, L; LIU, K. **Uncertainty Analysis of the Dynamic Responses of a Transmission Tower-Line System Subjected to Cable Rupture**. Journal of Aerospace Engineering. Vol. 34, Issue 1, 2021.

APENDICE A – NÓS E ELEMENTOS DA TORRE SS

Número	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Coord. Z (m)
1	2,5000	39,0000	0,0000
2	0,0000	39,0000	0,0000
3	0,5000	38,2500	0,5000
4	-3,2000	37,2000	0,0000
5	3,2000	35,1000	0,0000
6	-3,6000	33,0000	0,0000
7	0,5000	33,0000	0,5000
8	1,8635	15,0000	1,8635
9	0,0000	15,0000	1,8635
10	1,8635	15,0000	0,0000
11	2,3180	9,0000	2,3180
12	0,4545	9,0000	2,3180
13	2,3180	9,0000	0,4545
14	1,9315	3,0000	2,7725
15	2,7725	3,0000	1,9315
16	3,0000	0,0000	3,0000
17	-2,5000	39,0000	0,0000
18	-0,5000	38,2500	0,5000
19	-0,5000	38,2500	-0,5000
20	0,5000	38,2500	-0,5000
21	-0,5000	33,0000	0,5000
22	-0,5000	33,0000	-0,5000
23	0,5000	33,0000	-0,5000
24	-1,8635	15,0000	1,8635
25	-1,8635	15,0000	-1,8635
26	1,8635	15,0000	-1,8635
27	0,0000	15,0000	-1,8635
28	-1,8635	15,0000	0,0000
29	-2,3180	9,0000	2,3180
30	-2,3180	9,0000	-2,3180
31	2,3180	9,0000	-2,3180
32	-0,4545	9,0000	2,3180
33	-0,4545	9,0000	-2,3180
34	0,4545	9,0000	-2,3180
35	-2,3180	9,0000	0,4545
36	-2,3180	9,0000	-0,4545
37	2,3180	9,0000	-0,4545
38	-1,9315	3,0000	2,7725
39	-1,9315	3,0000	-2,7725
40	1,9315	3,0000	-2,7725
41	-2,7725	3,0000	1,9315
42	-2,7725	3,0000	-1,9315
43	2,7725	3,0000	-1,9315

44	-3,0000	0,0000	3,0000
45	-3,0000	0,0000	-3,0000
46	3,0000	0,0000	-3,0000
47	0,5000	37,2000	0,5000
48	0,5000	36,1500	0,5000
49	0,5000	35,1000	0,5000
50	0,5000	34,0500	0,5000
51	0,5379	32,5000	0,5379
52	0,6288	31,3000	0,6288
53	0,7348	29,9000	0,7348
54	0,8560	28,3000	0,8560
55	0,9848	26,6000	0,9848
56	1,1666	24,2000	1,1666
57	1,4166	20,9000	1,4166
58	1,6893	17,3000	1,6893
59	2,1665	11,0000	2,1665
60	0,0000	11,0000	2,1665
61	2,1665	11,0000	0,0000
62	2,4089	7,8000	2,4089
63	2,4999	6,6000	2,4999
64	2,5908	5,4000	2,5908
65	2,6817	4,2000	2,6817
66	2,7727	3,0000	2,7727
67	0,7499	7,8000	2,4089
68	1,0453	6,6000	2,4998
69	1,3407	5,4000	2,5907
70	1,6361	4,2000	2,6816
71	2,4089	7,8000	0,7499
72	2,4998	6,6000	1,0453
73	2,5907	5,4000	1,3407
74	2,6816	4,2000	1,6361
75	-0,5000	37,2000	0,5000
76	-0,5000	37,2000	-0,5000
77	0,5000	37,2000	-0,5000
78	-0,5000	36,1500	0,5000
79	-0,5000	36,1500	-0,5000
80	0,5000	36,1500	-0,5000
81	-0,5000	35,1000	0,5000
82	-0,5000	35,1000	-0,5000
83	0,5000	35,1000	-0,5000
84	-0,5000	34,0500	0,5000
85	-0,5000	34,0500	-0,5000
86	0,5000	34,0500	-0,5000
87	-0,5379	32,5000	0,5379
88	-0,5379	32,5000	-0,5379
89	0,5379	32,5000	-0,5379

90	-0,6288	31,3000	0,6288
91	-0,6288	31,3000	-0,6288
92	0,6288	31,3000	-0,6288
93	-0,7348	29,9000	0,7348
94	-0,7348	29,9000	-0,7348
95	0,7348	29,9000	-0,7348
96	-0,8560	28,3000	0,8560
97	-0,8560	28,3000	-0,8560
98	0,8560	28,3000	-0,8560
99	-0,9848	26,6000	0,9848
100	-0,9848	26,6000	-0,9848
101	0,9848	26,6000	-0,9848
102	-1,1666	24,2000	1,1666
103	-1,1666	24,2000	-1,1666
104	1,1666	24,2000	-1,1666
105	-1,4166	20,9000	1,4166
106	-1,4166	20,9000	-1,4166
107	1,4166	20,9000	-1,4166
108	-1,6893	17,3000	1,6893
109	-1,6893	17,3000	-1,6893
110	1,6893	17,3000	-1,6893
111	-2,1665	11,0000	2,1665
112	-2,1665	11,0000	-2,1665
113	2,1665	11,0000	-2,1665
114	0,0000	11,0000	-2,1665
115	-2,1665	11,0000	0,0000
116	-2,4089	7,8000	2,4089
117	-2,4089	7,8000	-2,4089
118	2,4089	7,8000	-2,4089
119	-2,4999	6,6000	2,4999
120	-2,4999	6,6000	-2,4999
121	2,4999	6,6000	-2,4999
122	-2,5908	5,4000	2,5908
123	-2,5908	5,4000	-2,5908
124	2,5908	5,4000	-2,5908
125	-2,6817	4,2000	2,6817
126	-2,6817	4,2000	-2,6817
127	2,6817	4,2000	-2,6817
128	-2,7727	3,0000	2,7727
129	-2,7727	3,0000	-2,7727
130	2,7727	3,0000	-2,7727
131	-0,7499	7,8000	2,4089
132	-0,7499	7,8000	-2,4089
133	0,7499	7,8000	-2,4089
134	-1,0453	6,6000	2,4998
135	-1,0453	6,6000	-2,4998

136	1,0453	6,6000	-2,4998
137	-1,3407	5,4000	2,5907
138	-1,3407	5,4000	-2,5907
139	1,3407	5,4000	-2,5907
140	-1,6361	4,2000	2,6816
141	-1,6361	4,2000	-2,6816
142	1,6361	4,2000	-2,6816
143	-2,4089	7,8000	0,7499
144	-2,4089	7,8000	-0,7499
145	2,4089	7,8000	-0,7499
146	-2,4998	6,6000	1,0453
147	-2,4998	6,6000	-1,0453
148	2,4998	6,6000	-1,0453
149	-2,5907	5,4000	1,3407
150	-2,5907	5,4000	-1,3407
151	2,5907	5,4000	-1,3407
152	-2,6816	4,2000	1,6361
153	-2,6816	4,2000	-1,6361
154	2,6816	4,2000	-1,6361
155	-1,9645	13,6667	-1,9645
156	-2,0655	12,3333	-2,0655
157	1,9645	13,6667	-1,9645
158	2,0655	12,3333	-2,0655
159	1,9645	13,6667	1,9645
160	2,0655	12,3333	2,0655
161	-1,9645	13,6667	1,9645
162	-2,0655	12,3333	2,0655
163	-1,0833	13,0000	-2,0150
164	-2,0150	13,0000	-1,0833
165	2,0150	13,0000	-1,0833
166	1,0833	13,0000	-2,0150
167	1,0833	13,0000	2,0150
168	2,0150	13,0000	1,0833
169	-2,0150	13,0000	1,0833
170	-1,0833	13,0000	2,0150

Número	Nó Inicial	Nó Final	Perfil	Cap. Comp. (N)	Cap. Tração (N)	Classificação
1	1	2	L 40x40x3mm	14402	73500	Suporte Tracionado ParaRaio
2	17	2	L 40x40x3mm	14402	73500	Suporte Tracionado ParaRaio
3	1	3	L 50x50x3mm	35881	92590	Suporte Comprimido ParaRaio
4	17	18	L 50x50x3mm	35881	92590	Suporte Comprimido ParaRaio
5	17	19	L 50x50x3mm	35881	92590	Suporte Comprimido ParaRaio
6	1	20	L 50x50x3mm	35881	92590	Suporte Comprimido ParaRaio
7	4	75	L 60x60x4mm	53882	147636	Suporte Comprimido Condutor
8	4	76	L 60x60x4mm	53882	147636	Suporte Comprimido Condutor
9	4	18	L 45x45x3mm	15023	83045	Suporte Tracionado Condutor
10	4	19	L 45x45x3mm	15023	83045	Suporte Tracionado Condutor
11	5	49	L 60x60x4mm	53882	147636	Suporte Comprimido Condutor
12	5	83	L 60x60x4mm	53882	147636	Suporte Comprimido Condutor
13	5	48	L 45x45x3mm	15023	83045	Suporte Tracionado Condutor
14	5	80	L 45x45x3mm	15023	83045	Suporte Tracionado Condutor
15	6	21	L 60x60x4mm	41500	147636	Suporte Comprimido Condutor
16	6	22	L 60x60x4mm	41500	147636	Suporte Comprimido Condutor
17	6	84	L 45x45x3mm	11836	83045	Suporte Tracionado Condutor
18	6	85	L 45x45x3mm	11836	83045	Suporte Tracionado Condutor
19	2	3	L 40x40x3mm	21171	73500	Diagonal Topo
20	2	18	L 40x40x3mm	21171	73500	Diagonal Topo
21	2	19	L 40x40x3mm	21171	73500	Diagonal Topo
22	2	20	L 40x40x3mm	21171	73500	Diagonal Topo
23	18	75	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
24	19	76	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
25	3	47	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
26	20	77	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
27	47	48	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
28	75	78	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
29	77	80	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
30	76	79	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
31	48	49	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
32	78	81	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
33	79	82	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
34	80	83	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
35	49	50	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
36	81	84	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
37	82	85	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
38	83	86	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
39	50	7	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
40	84	21	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
41	85	22	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo
42	86	23	L 40x40x3mm	47110	73500	Vertical Topo

43	7	51	L 45x45x4mm	82708	109454	Vertical Trecho A
44	21	87	L 45x45x4mm	82708	109454	Vertical Trecho A
45	22	88	L 45x45x4mm	82708	109454	Vertical Trecho A
46	23	89	L 45x45x4mm	82708	109454	Vertical Trecho A
47	51	52	L 45x45x4mm	76216	109454	Vertical Trecho A
48	87	90	L 45x45x4mm	76216	109454	Vertical Trecho A
49	88	91	L 45x45x4mm	76216	109454	Vertical Trecho A
50	89	92	L 45x45x4mm	76216	109454	Vertical Trecho A
51	52	53	L 45x45x4mm	67265	109454	Vertical Trecho A
52	90	93	L 45x45x4mm	67265	109454	Vertical Trecho A
53	91	94	L 45x45x4mm	67265	109454	Vertical Trecho A
54	92	95	L 45x45x4mm	67265	109454	Vertical Trecho A
55	53	54	L 45x45x4mm	58230	109454	Vertical Trecho A
56	93	96	L 45x45x4mm	58230	109454	Vertical Trecho A
57	94	97	L 45x45x4mm	58230	109454	Vertical Trecho A
58	95	98	L 45x45x4mm	58230	109454	Vertical Trecho A
59	54	55	L 65x65x5mm	131103	201727	Vertical Trecho B
60	96	99	L 65x65x5mm	131103	201727	Vertical Trecho B
61	97	100	L 65x65x5mm	131103	201727	Vertical Trecho B
62	98	101	L 65x65x5mm	131103	201727	Vertical Trecho B
63	55	56	L 65x65x5mm	100100	201727	Vertical Trecho B
64	99	102	L 65x65x5mm	100100	201727	Vertical Trecho B
65	100	103	L 65x65x5mm	100100	201727	Vertical Trecho B
66	101	104	L 65x65x5mm	100100	201727	Vertical Trecho B
67	56	57	L 65x65x5mm	58152	201727	Vertical Trecho B
68	102	105	L 65x65x5mm	58152	201727	Vertical Trecho B
69	103	106	L 65x65x5mm	58152	201727	Vertical Trecho B
70	104	107	L 65x65x5mm	58152	201727	Vertical Trecho B
71	57	58	L 75x75x5mm	76283	231318	Vertical Trecho C
72	105	108	L 75x75x5mm	76283	231318	Vertical Trecho C
73	106	109	L 75x75x5mm	76283	231318	Vertical Trecho C
74	107	110	L 75x75x5mm	76283	231318	Vertical Trecho C
75	58	8	L 75x75x5mm	130652	231318	Vertical Trecho C
76	108	24	L 75x75x5mm	130652	231318	Vertical Trecho C
77	109	25	L 75x75x5mm	130652	231318	Vertical Trecho C
78	110	26	L 75x75x5mm	130652	231318	Vertical Trecho C
79	47	20	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
80	19	75	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
81	3	77	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
82	18	76	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
83	20	47	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
84	76	78	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
85	75	79	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
86	76	78	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
87	19	75	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
88	18	76	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo

89	76	78	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
90	75	79	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
91	79	81	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
92	78	82	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
93	82	84	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
94	81	85	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
95	85	21	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
96	84	22	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
97	3	77	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
98	20	47	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
99	47	80	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
100	77	48	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
101	48	83	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
102	80	49	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
103	49	86	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
104	83	50	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
105	50	23	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
106	86	7	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
107	23	51	L 40x40x3mm	46694	73500	Diagonal Trecho A
108	22	87	L 40x40x3mm	46694	73500	Diagonal Trecho A
109	21	88	L 40x40x3mm	46694	73500	Diagonal Trecho A
110	7	89	L 40x40x3mm	46694	73500	Diagonal Trecho A
111	51	92	L 40x40x3mm	31137	73500	Diagonal Trecho A
112	87	91	L 40x40x3mm	31137	73500	Diagonal Trecho A
113	88	90	L 40x40x3mm	31137	73500	Diagonal Trecho A
114	89	52	L 40x40x3mm	31137	73500	Diagonal Trecho A
115	52	95	L 40x40x3mm	23480	73500	Diagonal Trecho A
116	90	94	L 40x40x3mm	23480	73500	Diagonal Trecho A
117	91	93	L 40x40x3mm	23480	73500	Diagonal Trecho A
118	92	53	L 40x40x3mm	23480	73500	Diagonal Trecho A
119	53	98	L 40x40x3mm	17624	73500	Diagonal Trecho A
120	93	97	L 40x40x3mm	17624	73500	Diagonal Trecho A
121	94	96	L 40x40x3mm	17624	73500	Diagonal Trecho A
122	95	54	L 40x40x3mm	17624	73500	Diagonal Trecho A
123	54	101	L 60x60x4mm	62013	147636	Diagonal Trecho B
124	96	100	L 60x60x4mm	62013	147636	Diagonal Trecho B
125	97	99	L 60x60x4mm	62013	147636	Diagonal Trecho B
126	98	55	L 60x60x4mm	62013	147636	Diagonal Trecho B
127	55	104	L 60x60x4mm	39268	147636	Diagonal Trecho B
128	99	103	L 60x60x4mm	39268	147636	Diagonal Trecho B
129	100	102	L 60x60x4mm	39268	147636	Diagonal Trecho B
130	101	56	L 60x60x4mm	39268	147636	Diagonal Trecho B
131	56	107	L 60x60x4mm	23218	147636	Diagonal Trecho B
132	102	106	L 60x60x4mm	23218	147636	Diagonal Trecho B
133	103	105	L 60x60x4mm	23218	147636	Diagonal Trecho B
134	104	57	L 60x60x4mm	23218	147636	Diagonal Trecho B

135	57	110	L 65x65x4mm	23123	160363	Diagonal Trecho C
136	105	109	L 65x65x4mm	23123	160363	Diagonal Trecho C
137	106	108	L 65x65x4mm	23123	160363	Diagonal Trecho C
138	107	58	L 65x65x4mm	23123	160363	Diagonal Trecho C
139	58	10	L 75x75x5mm	30574	231318	Diagonal Trecho C - Metade
140	108	28	L 75x75x5mm	30574	231318	Diagonal Trecho C - Metade
141	109	28	L 75x75x5mm	30574	231318	Diagonal Trecho C - Metade
142	110	10	L 75x75x5mm	30574	231318	Diagonal Trecho C - Metade
143	3	75	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
144	18	47	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
145	19	77	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
146	20	76	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
147	47	78	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
148	75	48	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
149	76	80	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
150	77	79	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
151	48	81	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
152	78	49	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
153	79	83	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
154	80	82	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
155	49	84	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
156	81	50	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
157	82	86	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
158	83	85	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
159	84	7	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
160	50	21	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
161	86	22	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
162	85	23	L 40x40x3mm	37802	73500	Diagonal Topo
163	7	87	L 40x40x3mm	46694	73500	Diagonal Trecho A
164	21	51	L 40x40x3mm	46694	73500	Diagonal Trecho A
165	22	89	L 40x40x3mm	46694	73500	Diagonal Trecho A
166	23	88	L 40x40x3mm	46694	73500	Diagonal Trecho A
167	87	52	L 40x40x3mm	31137	73500	Diagonal Trecho A
168	51	90	L 40x40x3mm	31137	73500	Diagonal Trecho A
169	89	91	L 40x40x3mm	31137	73500	Diagonal Trecho A
170	88	92	L 40x40x3mm	31137	73500	Diagonal Trecho A
171	90	53	L 40x40x3mm	23480	73500	Diagonal Trecho A
172	52	93	L 40x40x3mm	23480	73500	Diagonal Trecho A
173	92	94	L 40x40x3mm	23480	73500	Diagonal Trecho A
174	91	95	L 40x40x3mm	23480	73500	Diagonal Trecho A
175	93	54	L 40x40x3mm	17624	73500	Diagonal Trecho A
176	53	96	L 40x40x3mm	17624	73500	Diagonal Trecho A
177	95	97	L 40x40x3mm	17624	73500	Diagonal Trecho A
178	94	98	L 40x40x3mm	17624	73500	Diagonal Trecho A
179	96	55	L 60x60x4mm	62013	147636	Diagonal Trecho B
180	54	99	L 60x60x4mm	62013	147636	Diagonal Trecho B

181	98	100	L 60x60x4mm	62013	147636	Diagonal Trecho B
182	97	101	L 60x60x4mm	62013	147636	Diagonal Trecho B
183	99	56	L 60x60x4mm	39268	147636	Diagonal Trecho B
184	55	102	L 60x60x4mm	39268	147636	Diagonal Trecho B
185	101	103	L 60x60x4mm	39268	147636	Diagonal Trecho B
186	100	104	L 60x60x4mm	39268	147636	Diagonal Trecho B
187	102	57	L 60x60x4mm	23218	147636	Diagonal Trecho B
188	56	105	L 60x60x4mm	23218	147636	Diagonal Trecho B
189	104	106	L 60x60x4mm	23218	147636	Diagonal Trecho B
190	103	107	L 60x60x4mm	23218	147636	Diagonal Trecho B
191	105	58	L 65x65x4mm	23123	160363	Diagonal Trecho C
192	57	108	L 65x65x4mm	23123	160363	Diagonal Trecho C
193	107	109	L 65x65x4mm	23123	160363	Diagonal Trecho C
194	106	110	L 65x65x4mm	23123	160363	Diagonal Trecho C
195	108	9	L 75x75x5mm	30574	231318	Diagonal Trecho C - Metade
196	58	9	L 75x75x5mm	30574	231318	Diagonal Trecho C - Metade
197	110	27	L 75x75x5mm	30574	231318	Diagonal Trecho C - Metade
198	109	27	L 75x75x5mm	30574	231318	Diagonal Trecho C - Metade
199	3	18	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
200	20	19	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
201	47	75	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
202	77	76	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
203	48	78	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
204	80	79	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
205	49	81	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
206	83	82	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
207	50	84	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
208	86	85	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
209	7	21	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
210	22	23	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
211	3	20	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
212	18	19	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
213	47	77	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
214	75	76	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
215	48	80	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
216	78	79	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
217	49	83	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
218	81	82	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
219	50	86	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
220	84	85	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
221	7	23	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
222	21	22	L 40x40x3mm	47296	73500	Horizontal Topo
223	75	77	L 40x40x3mm	38888	73500	Diagonal Horizontal Topo
224	47	76	L 40x40x3mm	38888	73500	Diagonal Horizontal Topo
225	81	83	L 40x40x3mm	38888	73500	Diagonal Horizontal Topo
226	49	82	L 40x40x3mm	38888	73500	Diagonal Horizontal Topo

227	21	23	L 40x40x3mm	38888	73500	Diagonal Horizontal Topo
228	7	22	L 40x40x3mm	38888	73500	Diagonal Horizontal Topo
229	8	9	L 75x75x5mm	71927	231318	Horizontal Trecho C
230	24	9	L 75x75x5mm	71927	231318	Horizontal Trecho C
231	25	27	L 75x75x5mm	71927	231318	Horizontal Trecho C
232	26	27	L 75x75x5mm	71927	231318	Horizontal Trecho C
233	8	10	L 75x75x5mm	71927	231318	Horizontal Trecho C
234	24	28	L 75x75x5mm	71927	231318	Horizontal Trecho C
235	25	28	L 75x75x5mm	71927	231318	Horizontal Trecho C
236	26	10	L 75x75x5mm	71927	231318	Horizontal Trecho C
237	27	163	L 65x65x4mm	25218	160363	Diagonal Trecho C
238	163	112	L 65x65x4mm	25218	160363	Diagonal Trecho C
239	28	164	L 65x65x4mm	25218	160363	Diagonal Trecho C
240	164	112	L 65x65x4mm	25218	160363	Diagonal Trecho C
241	10	165	L 65x65x4mm	25218	160363	Diagonal Trecho C
242	165	113	L 65x65x4mm	25218	160363	Diagonal Trecho C
243	27	166	L 65x65x4mm	25218	160363	Diagonal Trecho C
244	166	113	L 65x65x4mm	25218	160363	Diagonal Trecho C
245	9	167	L 65x65x4mm	25218	160363	Diagonal Trecho C
246	167	59	L 65x65x4mm	25218	160363	Diagonal Trecho C
247	10	168	L 65x65x4mm	25218	160363	Diagonal Trecho C
248	168	59	L 65x65x4mm	25218	160363	Diagonal Trecho C
249	28	169	L 65x65x4mm	25218	160363	Diagonal Trecho C
250	169	111	L 65x65x4mm	25218	160363	Diagonal Trecho C
251	9	170	L 65x65x4mm	25218	160363	Diagonal Trecho C
252	170	111	L 65x65x4mm	25218	160363	Diagonal Trecho C
253	12	59	L 75x75x5mm	35939	231318	Diagonal Pe
254	32	111	L 75x75x5mm	35939	231318	Diagonal Pe
255	33	112	L 75x75x5mm	35939	231318	Diagonal Pe
256	34	113	L 75x75x5mm	35939	231318	Diagonal Pe
257	13	59	L 75x75x5mm	35939	231318	Diagonal Pe
258	35	111	L 75x75x5mm	35939	231318	Diagonal Pe
259	36	112	L 75x75x5mm	35939	231318	Diagonal Pe
260	37	113	L 75x75x5mm	35939	231318	Diagonal Pe
261	59	60	L 60x60x4mm	21783	147636	Horizontal Pe
262	111	60	L 60x60x4mm	21783	147636	Horizontal Pe
263	112	114	L 60x60x4mm	21783	147636	Horizontal Pe
264	113	114	L 60x60x4mm	21783	147636	Horizontal Pe
265	59	61	L 60x60x4mm	21783	147636	Horizontal Pe
266	111	115	L 60x60x4mm	21783	147636	Horizontal Pe
267	112	115	L 60x60x4mm	21783	147636	Horizontal Pe
268	113	61	L 60x60x4mm	21783	147636	Horizontal Pe
269	60	12	L 60x60x4mm	24175	147636	Vertical Secundaria Pe
270	60	32	L 60x60x4mm	24175	147636	Vertical Secundaria Pe
271	114	33	L 60x60x4mm	24175	147636	Vertical Secundaria Pe
272	114	34	L 60x60x4mm	24175	147636	Vertical Secundaria Pe

273	13	61	L 60x60x4mm	24175	147636	Vertical Secundaria Pe
274	35	115	L 60x60x4mm	24175	147636	Vertical Secundaria Pe
275	36	115	L 60x60x4mm	24175	147636	Vertical Secundaria Pe
276	37	61	L 60x60x4mm	24175	147636	Vertical Secundaria Pe
277	25	155	L 75x75x5mm	135167	231318	Vertical Trecho C
278	155	156	L 75x75x5mm	135167	231318	Vertical Trecho C
279	156	112	L 75x75x5mm	135167	231318	Vertical Trecho C
280	26	157	L 75x75x5mm	135167	231318	Vertical Trecho C
281	157	158	L 75x75x5mm	135167	231318	Vertical Trecho C
282	158	113	L 75x75x5mm	135167	231318	Vertical Trecho C
283	8	159	L 75x75x5mm	135167	231318	Vertical Trecho C
284	159	160	L 75x75x5mm	135167	231318	Vertical Trecho C
285	160	59	L 75x75x5mm	135167	231318	Vertical Trecho C
286	24	161	L 75x75x5mm	135167	231318	Vertical Trecho C
287	161	162	L 75x75x5mm	135167	231318	Vertical Trecho C
288	162	111	L 75x75x5mm	135167	231318	Vertical Trecho C
289	59	11	L 65x65x5mm	121132	201727	Vertical Principal Pe
290	111	29	L 65x65x5mm	121132	201727	Vertical Principal Pe
291	112	30	L 65x65x5mm	121132	201727	Vertical Principal Pe
292	113	31	L 65x65x5mm	121132	201727	Vertical Principal Pe
293	11	62	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
294	29	116	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
295	30	117	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
296	31	118	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
297	62	63	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
298	116	119	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
299	117	120	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
300	118	121	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
301	63	64	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
302	119	122	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
303	120	123	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
304	121	124	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
305	64	65	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
306	122	125	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
307	123	126	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
308	124	127	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
309	65	66	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
310	125	128	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
311	126	129	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
312	127	130	L 65x65x5mm	133925	201727	Vertical Principal Pe
313	66	16	L 65x65x5mm	70287	201727	Vertical Principal Pe
314	128	44	L 65x65x5mm	70287	201727	Vertical Principal Pe
315	129	45	L 65x65x5mm	70287	201727	Vertical Principal Pe
316	130	46	L 65x65x5mm	70287	201727	Vertical Principal Pe
317	12	67	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
318	32	131	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe

319	33	132	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
320	34	133	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
321	67	68	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
322	131	134	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
323	132	135	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
324	133	136	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
325	68	69	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
326	134	137	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
327	135	138	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
328	136	139	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
329	69	70	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
330	137	140	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
331	138	141	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
332	139	142	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
333	70	14	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
334	140	38	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
335	141	39	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
336	142	40	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
337	13	71	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
338	35	143	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
339	36	144	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
340	37	145	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
341	71	72	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
342	143	146	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
343	144	147	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
344	145	148	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
345	72	73	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
346	146	149	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
347	147	150	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
348	148	151	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
349	73	74	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
350	149	152	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
351	150	153	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
352	151	154	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
353	74	15	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
354	152	41	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
355	153	42	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
356	154	43	L 60x60x4mm	63155	147636	Vertical Secundaria Pe
357	14	16	L 60x60x4mm	40159	147636	Vertical Secundaria Pe
358	38	44	L 60x60x4mm	40159	147636	Vertical Secundaria Pe
359	39	45	L 60x60x4mm	40159	147636	Vertical Secundaria Pe
360	40	46	L 60x60x4mm	40159	147636	Vertical Secundaria Pe
361	15	16	L 60x60x4mm	40159	147636	Vertical Secundaria Pe
362	41	44	L 60x60x4mm	40159	147636	Vertical Secundaria Pe
363	42	45	L 60x60x4mm	40159	147636	Vertical Secundaria Pe
364	43	46	L 60x60x4mm	40159	147636	Vertical Secundaria Pe

365	12	11	L 50x50x3mm	12908	92590	Horizontal Externa Pe
366	32	29	L 50x50x3mm	12908	92590	Horizontal Externa Pe
367	33	30	L 50x50x3mm	12908	92590	Horizontal Externa Pe
368	34	31	L 50x50x3mm	12908	92590	Horizontal Externa Pe
369	13	11	L 50x50x3mm	12908	92590	Horizontal Externa Pe
370	35	29	L 50x50x3mm	12908	92590	Horizontal Externa Pe
371	36	30	L 50x50x3mm	12908	92590	Horizontal Externa Pe
372	37	31	L 50x50x3mm	12908	92590	Horizontal Externa Pe
373	11	67	L 50x50x3mm	11475	92590	Diagonal Externa Pe
374	29	131	L 50x50x3mm	11475	92590	Diagonal Externa Pe
375	30	132	L 50x50x3mm	11475	92590	Diagonal Externa Pe
376	31	133	L 50x50x3mm	11475	92590	Diagonal Externa Pe
377	11	71	L 50x50x3mm	11475	92590	Diagonal Externa Pe
378	29	143	L 50x50x3mm	11475	92590	Diagonal Externa Pe
379	30	144	L 50x50x3mm	11475	92590	Diagonal Externa Pe
380	31	145	L 50x50x3mm	11475	92590	Diagonal Externa Pe
381	67	62	L 50x50x3mm	16296	92590	Horizontal Externa Pe
382	131	116	L 50x50x3mm	16296	92590	Horizontal Externa Pe
383	132	117	L 50x50x3mm	16296	92590	Horizontal Externa Pe
384	133	118	L 50x50x3mm	16296	92590	Horizontal Externa Pe
385	71	62	L 50x50x3mm	16296	92590	Horizontal Externa Pe
386	143	116	L 50x50x3mm	16296	92590	Horizontal Externa Pe
387	144	117	L 50x50x3mm	16296	92590	Horizontal Externa Pe
388	145	118	L 50x50x3mm	16296	92590	Horizontal Externa Pe
389	62	68	L 50x50x3mm	13555	92590	Diagonal Externa Pe
390	116	134	L 50x50x3mm	13555	92590	Diagonal Externa Pe
391	117	135	L 50x50x3mm	13555	92590	Diagonal Externa Pe
392	118	136	L 50x50x3mm	13555	92590	Diagonal Externa Pe
393	62	72	L 50x50x3mm	13555	92590	Diagonal Externa Pe
394	116	146	L 50x50x3mm	13555	92590	Diagonal Externa Pe
395	117	147	L 50x50x3mm	13555	92590	Diagonal Externa Pe
396	118	148	L 50x50x3mm	13555	92590	Diagonal Externa Pe
397	68	63	L 50x50x3mm	21186	92590	Horizontal Externa Pe
398	134	119	L 50x50x3mm	21186	92590	Horizontal Externa Pe
399	135	120	L 50x50x3mm	21186	92590	Horizontal Externa Pe
400	136	121	L 50x50x3mm	21186	92590	Horizontal Externa Pe
401	72	63	L 50x50x3mm	21186	92590	Horizontal Externa Pe
402	146	119	L 50x50x3mm	21186	92590	Horizontal Externa Pe
403	147	120	L 50x50x3mm	21186	92590	Horizontal Externa Pe
404	148	121	L 50x50x3mm	21186	92590	Horizontal Externa Pe
405	63	69	L 50x50x3mm	16063	92590	Diagonal Externa Pe
406	119	137	L 50x50x3mm	16063	92590	Diagonal Externa Pe
407	120	138	L 50x50x3mm	16063	92590	Diagonal Externa Pe
408	121	139	L 50x50x3mm	16063	92590	Diagonal Externa Pe
409	63	73	L 50x50x3mm	16063	92590	Diagonal Externa Pe
410	119	149	L 50x50x3mm	16063	92590	Diagonal Externa Pe

411	120	150	L 50x50x3mm	16063	92590	Diagonal Externa Pe
412	121	151	L 50x50x3mm	16063	92590	Diagonal Externa Pe
413	69	64	L 50x50x3mm	28705	92590	Horizontal Externa Pe
414	137	122	L 50x50x3mm	28705	92590	Horizontal Externa Pe
415	138	123	L 50x50x3mm	28705	92590	Horizontal Externa Pe
416	139	124	L 50x50x3mm	28705	92590	Horizontal Externa Pe
417	73	64	L 50x50x3mm	28705	92590	Horizontal Externa Pe
418	149	122	L 50x50x3mm	28705	92590	Horizontal Externa Pe
419	150	123	L 50x50x3mm	28705	92590	Horizontal Externa Pe
420	151	124	L 50x50x3mm	28705	92590	Horizontal Externa Pe
421	64	70	L 50x50x3mm	19010	92590	Diagonal Externa Pe
422	122	140	L 50x50x3mm	19010	92590	Diagonal Externa Pe
423	123	141	L 50x50x3mm	19010	92590	Diagonal Externa Pe
424	124	142	L 50x50x3mm	19010	92590	Diagonal Externa Pe
425	64	74	L 50x50x3mm	19010	92590	Diagonal Externa Pe
426	122	152	L 50x50x3mm	19010	92590	Diagonal Externa Pe
427	123	153	L 50x50x3mm	19010	92590	Diagonal Externa Pe
428	124	154	L 50x50x3mm	19010	92590	Diagonal Externa Pe
429	70	65	L 50x50x3mm	38319	92590	Horizontal Externa Pe
430	140	125	L 50x50x3mm	38319	92590	Horizontal Externa Pe
431	141	126	L 50x50x3mm	38319	92590	Horizontal Externa Pe
432	142	127	L 50x50x3mm	38319	92590	Horizontal Externa Pe
433	74	65	L 50x50x3mm	38319	92590	Horizontal Externa Pe
434	152	125	L 50x50x3mm	38319	92590	Horizontal Externa Pe
435	153	126	L 50x50x3mm	38319	92590	Horizontal Externa Pe
436	154	127	L 50x50x3mm	38319	92590	Horizontal Externa Pe
437	65	14	L 50x50x3mm	22306	92590	Diagonal Externa Pe
438	125	38	L 50x50x3mm	22306	92590	Diagonal Externa Pe
439	126	39	L 50x50x3mm	22306	92590	Diagonal Externa Pe
440	127	40	L 50x50x3mm	22306	92590	Diagonal Externa Pe
441	65	15	L 50x50x3mm	22306	92590	Diagonal Externa Pe
442	125	41	L 50x50x3mm	22306	92590	Diagonal Externa Pe
443	126	42	L 50x50x3mm	22306	92590	Diagonal Externa Pe
444	127	43	L 50x50x3mm	22306	92590	Diagonal Externa Pe
445	14	66	L 50x50x3mm	46381	92590	Horizontal Externa Pe
446	38	128	L 50x50x3mm	46381	92590	Horizontal Externa Pe
447	39	129	L 50x50x3mm	46381	92590	Horizontal Externa Pe
448	40	130	L 50x50x3mm	46381	92590	Horizontal Externa Pe
449	15	66	L 50x50x3mm	46381	92590	Horizontal Externa Pe
450	41	128	L 50x50x3mm	46381	92590	Horizontal Externa Pe
451	42	129	L 50x50x3mm	46381	92590	Horizontal Externa Pe
452	43	130	L 50x50x3mm	46381	92590	Horizontal Externa Pe
453	115	114	L 80x80x6mm	38270	294000	Horizontal Diagonal Pe
454	114	61	L 80x80x6mm	38270	294000	Horizontal Diagonal Pe
455	61	60	L 80x80x6mm	38270	294000	Horizontal Diagonal Pe
456	60	115	L 80x80x6mm	38270	294000	Horizontal Diagonal Pe

457	38	41	L 75x75x5mm	130244	231318	Horizontal Interna Pe
458	140	152	L 75x75x5mm	105121	231318	Horizontal Interna Pe
459	137	149	L 75x75x5mm	79832	231318	Horizontal Interna Pe
460	134	146	L 75x75x5mm	59063	231318	Horizontal Interna Pe
461	131	143	L 75x75x5mm	45407	231318	Horizontal Interna Pe
462	32	35	L 75x75x5mm	35993	231318	Horizontal Interna Pe
463	15	14	L 75x75x5mm	130244	231318	Horizontal Interna Pe
464	74	70	L 75x75x5mm	105121	231318	Horizontal Interna Pe
465	73	69	L 75x75x5mm	79832	231318	Horizontal Interna Pe
466	72	68	L 75x75x5mm	59063	231318	Horizontal Interna Pe
467	71	67	L 75x75x5mm	45407	231318	Horizontal Interna Pe
468	13	12	L 75x75x5mm	35993	231318	Horizontal Interna Pe
469	40	43	L 75x75x5mm	130244	231318	Horizontal Interna Pe
470	142	154	L 75x75x5mm	105121	231318	Horizontal Interna Pe
471	139	151	L 75x75x5mm	79832	231318	Horizontal Interna Pe
472	136	148	L 75x75x5mm	59063	231318	Horizontal Interna Pe
473	133	145	L 75x75x5mm	45407	231318	Horizontal Interna Pe
474	34	37	L 75x75x5mm	35993	231318	Horizontal Interna Pe
475	42	39	L 75x75x5mm	130244	231318	Horizontal Interna Pe
476	153	141	L 75x75x5mm	105121	231318	Horizontal Interna Pe
477	150	138	L 75x75x5mm	79832	231318	Horizontal Interna Pe
478	147	135	L 75x75x5mm	59063	231318	Horizontal Interna Pe
479	144	132	L 75x75x5mm	45407	231318	Horizontal Interna Pe
480	36	33	L 75x75x5mm	35993	231318	Horizontal Interna Pe
481	9	28	L 75x75x5mm	35993	231318	Horizontal Trecho C
482	28	27	L 75x75x5mm	35993	231318	Horizontal Trecho C
483	27	10	L 75x75x5mm	35993	231318	Horizontal Trecho C
484	10	9	L 75x75x5mm	35993	231318	Horizontal Trecho C
485	114	60	L 60x60x4mm	21783	147636	Horizontal Pe
486	115	61	L 60x60x4mm	21783	147636	Horizontal Pe
487	27	9	L 75x75x5mm	71927	231318	Horizontal Trecho C
488	28	10	L 75x75x5mm	71927	231318	Horizontal Trecho C
489	61	12	L 75x75x5mm	80995	231318	Diagonal Interna Pe
490	13	67	L 75x75x5mm	32383	231318	Diagonal Interna Pe
491	71	68	L 75x75x5mm	39291	231318	Diagonal Interna Pe
492	72	69	L 75x75x5mm	48328	231318	Diagonal Interna Pe
493	73	70	L 75x75x5mm	60228	231318	Diagonal Interna Pe
494	74	14	L 75x75x5mm	75863	231318	Diagonal Interna Pe
495	114	37	L 75x75x5mm	80995	231318	Diagonal Interna Pe
496	34	145	L 75x75x5mm	32383	231318	Diagonal Interna Pe
497	133	148	L 75x75x5mm	39291	231318	Diagonal Interna Pe
498	136	151	L 75x75x5mm	48328	231318	Diagonal Interna Pe
499	139	154	L 75x75x5mm	60228	231318	Diagonal Interna Pe
500	142	43	L 75x75x5mm	75863	231318	Diagonal Interna Pe
501	115	33	L 75x75x5mm	80995	231318	Diagonal Interna Pe
502	36	132	L 75x75x5mm	32383	231318	Diagonal Interna Pe

503	144	135	L 75x75x5mm	39291	231318	Diagonal Interna Pe
504	147	138	L 75x75x5mm	48328	231318	Diagonal Interna Pe
505	150	141	L 75x75x5mm	60228	231318	Diagonal Interna Pe
506	153	39	L 75x75x5mm	75863	231318	Diagonal Interna Pe
507	60	35	L 75x75x5mm	80995	231318	Diagonal Interna Pe
508	32	143	L 75x75x5mm	32383	231318	Diagonal Interna Pe
509	131	146	L 75x75x5mm	39291	231318	Diagonal Interna Pe
510	134	149	L 75x75x5mm	48328	231318	Diagonal Interna Pe
511	137	152	L 75x75x5mm	60228	231318	Diagonal Interna Pe
512	140	41	L 75x75x5mm	75863	231318	Diagonal Interna Pe
513	27	155	L 60x60x4mm	18119	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
514	155	163	L 60x60x4mm	72835	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
515	163	156	L 60x60x4mm	66832	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
516	28	155	L 60x60x4mm	18119	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
517	155	164	L 60x60x4mm	72835	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
518	164	156	L 60x60x4mm	66832	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
519	10	157	L 60x60x4mm	18119	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
520	157	165	L 60x60x4mm	72835	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
521	165	158	L 60x60x4mm	66832	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
522	27	157	L 60x60x4mm	18119	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
523	157	166	L 60x60x4mm	72835	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
524	166	158	L 60x60x4mm	66832	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
525	9	159	L 60x60x4mm	18119	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
526	159	167	L 60x60x4mm	72835	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
527	167	160	L 60x60x4mm	66832	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
528	10	159	L 60x60x4mm	18119	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
529	159	168	L 60x60x4mm	72835	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
530	168	160	L 60x60x4mm	66832	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
531	28	161	L 60x60x4mm	18119	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
532	161	169	L 60x60x4mm	72835	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
533	169	162	L 60x60x4mm	66832	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
534	9	161	L 60x60x4mm	18119	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
535	161	170	L 60x60x4mm	72835	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
536	170	162	L 60x60x4mm	66832	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
537	170	162	L 60x60x4mm	66832	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
538	165	166	L 60x60x4mm	57583	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
539	167	168	L 60x60x4mm	57583	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
540	169	170	L 60x60x4mm	57583	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
541	163	28	L 60x60x4mm	47210	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
542	164	27	L 60x60x4mm	47210	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
543	166	10	L 60x60x4mm	47210	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
544	165	27	L 60x60x4mm	47210	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
545	168	9	L 60x60x4mm	47210	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
546	167	10	L 60x60x4mm	47210	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
547	169	9	L 60x60x4mm	47210	147636	Diagonal Secundaria Trecho C
548	170	28	L 60x60x4mm	47210	147636	Diagonal Secundaria Trecho C

APÊNDICE B – NÓS E ELEMENTOS DA TORRE ESTAIADA S1E2

Número	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Coord. Z (m)
1	0,00000	0,00000	0,00000
2	-0,21667	1,00000	0,21667
3	0,21667	1,00000	0,21667
4	0,21667	1,00000	-0,21667
5	-0,21667	1,00000	-0,21667
6	-0,43333	2,00000	0,43333
7	0,43333	2,00000	0,43333
8	0,43333	2,00000	-0,43333
9	-0,43333	2,00000	-0,43333
10	-0,65000	3,00000	0,65000
11	0,65000	3,00000	0,65000
12	0,65000	3,00000	-0,65000
13	-0,65000	3,00000	-0,65000
14	-0,65000	4,50000	0,65000
15	0,65000	4,50000	0,65000
16	0,65000	4,50000	-0,65000
17	-0,65000	4,50000	-0,65000
18	-0,65000	6,00000	0,65000
19	0,65000	6,00000	0,65000
20	0,65000	6,00000	-0,65000
21	-0,65000	6,00000	-0,65000
22	-0,65000	7,50000	0,65000
23	0,65000	7,50000	0,65000
24	0,65000	7,50000	-0,65000
25	-0,65000	7,50000	-0,65000
26	-0,65000	9,00000	0,65000
27	0,65000	9,00000	0,65000
28	0,65000	9,00000	-0,65000
29	-0,65000	9,00000	-0,65000
30	-0,65000	10,50000	0,65000
31	0,65000	10,50000	0,65000
32	0,65000	10,50000	-0,65000
33	-0,65000	10,50000	-0,65000
34	-0,65000	12,00000	0,65000
35	0,65000	12,00000	0,65000
36	0,65000	12,00000	-0,65000
37	-0,65000	12,00000	-0,65000
38	-0,65000	13,50000	0,65000
39	0,65000	13,50000	0,65000
40	0,65000	13,50000	-0,65000
41	-0,65000	13,50000	-0,65000
42	-0,65000	15,00000	0,65000

43	0,65000	15,00000	0,65000
44	0,65000	15,00000	-0,65000
45	-0,65000	15,00000	-0,65000
46	-0,65000	16,50000	0,65000
47	0,65000	16,50000	0,65000
48	0,65000	16,50000	-0,65000
49	-0,65000	16,50000	-0,65000
50	-0,65000	18,00000	0,65000
51	0,65000	18,00000	0,65000
52	0,65000	18,00000	-0,65000
53	-0,65000	18,00000	-0,65000
54	-0,65000	19,50000	0,65000
55	0,65000	19,50000	0,65000
56	0,65000	19,50000	-0,65000
57	-0,65000	19,50000	-0,65000
58	-0,65000	21,00000	0,65000
59	0,65000	21,00000	0,65000
60	0,65000	21,00000	-0,65000
61	-0,65000	21,00000	-0,65000
62	-0,65000	22,50000	0,65000
63	0,65000	22,50000	0,65000
64	0,65000	22,50000	-0,65000
65	-0,65000	22,50000	-0,65000
66	-0,65000	24,00000	0,65000
67	0,65000	24,00000	0,65000
68	0,65000	24,00000	-0,65000
69	-0,65000	24,00000	-0,65000
70	-0,65000	25,50000	0,65000
71	0,65000	25,50000	0,65000
72	0,65000	25,50000	-0,65000
73	-0,65000	25,50000	-0,65000
74	-0,65000	27,00000	0,65000
75	0,65000	27,00000	0,65000
76	0,65000	27,00000	-0,65000
77	-0,65000	27,00000	-0,65000
78	-0,65000	28,26000	0,65000
79	0,65000	28,26000	0,65000
80	0,65000	28,26000	-0,65000
81	-0,65000	28,26000	-0,65000
82	-0,65000	29,52000	0,65000
83	0,65000	29,52000	0,65000
84	0,65000	29,52000	-0,65000
85	-0,65000	29,52000	-0,65000
86	-0,65000	30,78000	0,65000
87	0,65000	30,78000	0,65000
88	0,65000	30,78000	-0,65000

89	-0,65000	30,78000	-0,65000
90	-0,65000	32,04000	0,65000
91	0,65000	32,04000	0,65000
92	0,65000	32,04000	-0,65000
93	-0,65000	32,04000	-0,65000
94	-0,65000	33,30000	0,65000
95	0,65000	33,30000	0,65000
96	0,65000	33,30000	-0,65000
97	-0,65000	33,30000	-0,65000
98	-0,65000	34,65000	0,65000
99	0,65000	34,65000	0,65000
100	0,65000	34,65000	-0,65000
101	-0,65000	34,65000	-0,65000
102	-0,65000	36,00000	0,65000
103	0,65000	36,00000	0,65000
104	0,65000	36,00000	-0,65000
105	-0,65000	36,00000	-0,65000
106	-0,65000	37,10000	0,65000
107	0,65000	37,10000	0,65000
108	0,65000	37,10000	-0,65000
109	-0,65000	37,10000	-0,65000
110	-0,65000	38,20000	0,65000
111	0,65000	38,20000	0,65000
112	0,65000	38,20000	-0,65000
113	-0,65000	38,20000	-0,65000
114	-0,65000	39,30000	0,65000
115	0,65000	39,30000	0,65000
116	0,65000	39,30000	-0,65000
117	-0,65000	39,30000	-0,65000
118	-0,65000	40,40000	0,65000
119	0,65000	40,40000	0,65000
120	0,65000	40,40000	-0,65000
121	-0,65000	40,40000	-0,65000
122	-0,65000	41,50000	0,65000
123	0,65000	41,50000	0,65000
124	0,65000	41,50000	-0,65000
125	-0,65000	41,50000	-0,65000
126	-0,65000	42,60000	0,65000
127	0,65000	42,60000	0,65000
128	0,65000	42,60000	-0,65000
129	-0,65000	42,60000	-0,65000
130	2,50000	43,50000	0,00000
131	0,00000	43,50000	0,00000
132	-2,50000	43,50000	0,00000
133	-3,50000	41,50000	0,00000
134	-2,55000	41,50000	0,21667

135	-2,55000	41,50000	-0,21667
136	-2,07500	42,05000	0,32500
137	-2,07500	42,05000	-0,32500
138	-1,60000	41,50000	0,43333
139	-1,60000	41,50000	-0,43333
140	-3,50000	36,00000	0,00000
141	-2,55000	36,00000	0,21667
142	-2,55000	36,00000	-0,21667
143	-2,07500	36,55000	0,32500
144	-2,07500	36,55000	-0,32500
145	-1,60000	36,00000	0,43333
146	-1,60000	36,00000	-0,43333
147	3,50000	36,00000	0,00000
148	2,55000	36,00000	0,21667
149	2,55000	36,00000	-0,21667
150	2,07500	36,55000	0,32500
151	2,07500	36,55000	-0,32500
152	1,60000	36,00000	0,43333
153	1,60000	36,00000	-0,43333
154	0,00000	33,30000	1,80000
155	0,00000	33,30000	-1,80000
156	-17,00000	0,00000	15,00000
157	17,00000	0,00000	15,00000
158	17,00000	0,00000	-15,00000
159	-17,00000	0,00000	-15,00000

Núm.	Nó Inicial	Nó Final	Perfil	Cap. Comp. (N)	Cap. Tração (N)	Tipo
1	1	2	L 60x60x4mm	77265	147636	Montante Pé
2	1	3	L 60x60x4mm	77265	147636	Montante Pé
3	1	4	L 60x60x4mm	77265	147636	Montante Pé
4	1	5	L 60x60x4mm	77265	147636	Montante Pé
5	2	6	L 60x60x4mm	77265	147636	Montante Pé
6	3	7	L 60x60x4mm	77265	147636	Montante Pé
7	4	8	L 60x60x4mm	77265	147636	Montante Pé
8	5	9	L 60x60x4mm	77265	147636	Montante Pé
9	6	10	L 60x60x4mm	77265	147636	Montante Pé
10	7	11	L 60x60x4mm	77265	147636	Montante Pé
11	8	12	L 60x60x4mm	77265	147636	Montante Pé
12	9	13	L 60x60x4mm	77265	147636	Montante Pé
13	2	3	L 40x40x3mm	47737	73500	Horizontal Pé
14	3	4	L 40x40x3mm	47737	73500	Horizontal Pé
15	4	5	L 40x40x3mm	47737	73500	Horizontal Pé
16	5	2	L 40x40x3mm	47737	73500	Horizontal Pé
17	6	7	L 40x40x3mm	29491	73500	Horizontal Pé
18	7	8	L 40x40x3mm	29491	73500	Horizontal Pé
19	8	9	L 40x40x3mm	29491	73500	Horizontal Pé
20	9	6	L 40x40x3mm	29491	73500	Horizontal Pé
21	10	11	L 40x40x3mm	13316	73500	Horizontal Pé
22	11	12	L 40x40x3mm	13316	73500	Horizontal Pé
23	12	13	L 40x40x3mm	13316	73500	Horizontal Pé
24	13	10	L 40x40x3mm	13316	73500	Horizontal Pé
25	12	10	L 40x40x3mm	6661	73500	Horizontal Pé
26	11	13	L 40x40x3mm	6661	73500	Horizontal Pé
27	2	7	L 40x40x3mm	44985	73500	Diagonal Pé
28	2	9	L 40x40x3mm	44985	73500	Diagonal Pé
29	3	8	L 40x40x3mm	44985	73500	Diagonal Pé
30	3	6	L 40x40x3mm	44985	73500	Diagonal Pé
31	4	7	L 40x40x3mm	44985	73500	Diagonal Pé
32	4	9	L 40x40x3mm	44985	73500	Diagonal Pé
33	5	6	L 40x40x3mm	44985	73500	Diagonal Pé
34	5	8	L 40x40x3mm	44985	73500	Diagonal Pé
35	6	11	L 40x40x3mm	36601	73500	Diagonal Pé
36	6	13	L 40x40x3mm	36601	73500	Diagonal Pé
37	7	10	L 40x40x3mm	36601	73500	Diagonal Pé
38	7	12	L 40x40x3mm	36601	73500	Diagonal Pé
39	8	11	L 40x40x3mm	36601	73500	Diagonal Pé
40	8	13	L 40x40x3mm	36601	73500	Diagonal Pé
41	9	10	L 40x40x3mm	36601	73500	Diagonal Pé
42	9	12	L 40x40x3mm	36601	73500	Diagonal Pé
43	10	14	L 65x65x5mm	71133	201727	Montante Trecho A
44	11	15	L 65x65x5mm	71133	201727	Montante Trecho A
45	12	16	L 65x65x5mm	71133	201727	Montante Trecho A

46	13	17	L 65x65x5mm	71133	201727	Montante Trecho A
47	14	18	L 65x65x5mm	71133	201727	Montante Trecho A
48	15	19	L 65x65x5mm	71133	201727	Montante Trecho A
49	16	20	L 65x65x5mm	71133	201727	Montante Trecho A
50	17	21	L 65x65x5mm	71133	201727	Montante Trecho A
51	18	22	L 65x65x5mm	71133	201727	Montante Trecho A
52	19	23	L 65x65x5mm	71133	201727	Montante Trecho A
53	20	24	L 65x65x5mm	71133	201727	Montante Trecho A
54	21	25	L 65x65x5mm	71133	201727	Montante Trecho A
55	22	26	L 65x65x5mm	71133	201727	Montante Trecho A
56	23	27	L 65x65x5mm	71133	201727	Montante Trecho A
57	24	28	L 65x65x5mm	71133	201727	Montante Trecho A
58	25	29	L 65x65x5mm	71133	201727	Montante Trecho A
59	10	15	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
60	10	17	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
61	11	14	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
62	11	16	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
63	12	15	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
64	12	17	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
65	13	14	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
66	13	16	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
67	14	19	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
68	14	21	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
69	15	18	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
70	15	20	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
71	16	19	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
72	16	21	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
73	17	18	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
74	17	20	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
75	18	23	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
76	18	25	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
77	19	22	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
78	19	24	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
79	20	23	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
80	20	25	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
81	21	22	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
82	21	24	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
83	22	27	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
84	22	29	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
85	23	26	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
86	23	28	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
87	24	27	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
88	24	29	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
89	25	26	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
90	25	28	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho A
91	26	27	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho A

92	27	28	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho A
93	28	29	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho A
94	29	26	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho A
95	27	29	L 50x50x3mm	13276	92590	Horizontal Trecho A
96	28	26	L 50x50x3mm	13276	92590	Horizontal Trecho A
97	26	30	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho B
98	27	31	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho B
99	28	32	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho B
100	29	33	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho B
101	30	34	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho B
102	31	35	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho B
103	32	36	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho B
104	33	37	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho B
105	34	38	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho B
106	35	39	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho B
107	36	40	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho B
108	37	41	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho B
109	38	42	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho B
110	39	43	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho B
111	40	44	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho B
112	41	45	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho B
113	26	31	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
114	26	33	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
115	27	30	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
116	27	32	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
117	28	31	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
118	28	33	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
119	29	30	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
120	29	32	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
121	30	35	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
122	30	37	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
123	31	34	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
124	31	36	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
125	32	35	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
126	32	37	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
127	33	34	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
128	33	36	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
129	34	39	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
130	34	41	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
131	35	38	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
132	35	40	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
133	36	39	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
134	36	41	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
135	37	38	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
136	37	40	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
137	38	43	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B

138	38	45	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
139	39	42	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
140	39	44	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
141	40	43	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
142	40	45	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
143	41	42	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
144	41	44	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho B
145	42	43	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho B
146	43	44	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho B
147	44	45	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho B
148	45	42	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho B
149	43	45	L 50x50x3mm	13276	92590	Horizontal Trecho B
150	44	42	L 50x50x3mm	13276	92590	Horizontal Trecho B
151	42	46	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho C
152	43	47	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho C
153	44	48	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho C
154	45	49	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho C
155	46	50	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho C
156	47	51	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho C
157	48	52	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho C
158	49	53	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho C
159	50	54	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho C
160	51	55	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho C
161	52	56	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho C
162	53	57	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho C
163	54	58	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho C
164	55	59	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho C
165	56	60	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho C
166	57	61	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho C
167	42	47	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
168	42	49	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
169	43	46	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
170	43	48	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
171	44	47	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
172	44	49	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
173	45	46	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
174	45	48	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
175	46	51	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
176	46	53	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
177	47	50	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
178	47	52	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
179	48	51	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
180	48	53	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
181	49	50	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
182	49	52	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
183	50	55	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C

184	50	57	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
185	51	54	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
186	51	56	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
187	52	55	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
188	52	57	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
189	53	54	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
190	53	56	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
191	54	59	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
192	54	61	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
193	55	58	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
194	55	60	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
195	56	59	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
196	56	61	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
197	57	58	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
198	57	60	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho C
199	58	59	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho C
200	59	60	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho C
201	60	61	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho C
202	61	58	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho C
203	59	61	L 50x50x3mm	13276	92590	Horizontal Trecho C
204	60	58	L 50x50x3mm	13276	92590	Horizontal Trecho C
205	58	62	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho D
206	59	63	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho D
207	60	64	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho D
208	61	65	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho D
209	62	66	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho D
210	63	67	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho D
211	64	68	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho D
212	65	69	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho D
213	66	70	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho D
214	67	71	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho D
215	68	72	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho D
216	69	73	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho D
217	70	74	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho D
218	71	75	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho D
219	72	76	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho D
220	73	77	L 75x75x5mm	103210	231318	Montante Trecho D
221	58	63	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
222	58	65	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
223	59	62	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
224	59	64	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
225	60	63	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
226	60	65	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
227	61	62	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
228	61	64	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
229	62	67	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D

230	62	69	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
231	63	66	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
232	63	68	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
233	64	67	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
234	64	69	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
235	65	66	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
236	65	68	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
237	66	71	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
238	66	73	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
239	67	70	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
240	67	72	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
241	68	71	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
242	68	73	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
243	69	70	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
244	69	72	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
245	70	75	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
246	70	77	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
247	71	74	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
248	71	76	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
249	72	75	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
250	72	77	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
251	73	74	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
252	73	76	L 40x40x3mm	22869	73500	Diagonal Trecho D
253	74	75	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho D
254	75	76	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho D
255	76	77	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho D
256	77	74	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho D
257	75	77	L 50x50x3mm	13276	92590	Horizontal Trecho D
258	76	74	L 50x50x3mm	13276	92590	Horizontal Trecho D
259	74	78	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
260	75	79	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
261	76	80	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
262	77	81	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
263	78	82	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
264	79	83	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
265	80	84	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
266	81	85	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
267	82	86	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
268	83	87	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
269	84	88	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
270	85	89	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
271	86	90	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
272	87	91	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
273	88	92	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
274	89	93	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
275	90	94	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E

276	91	95	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
277	92	96	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
278	93	97	L 75x75x5mm	125338	231318	Montante Trecho E
279	94	98	L 75x75x5mm	116995	231318	Montante Trecho E
280	95	99	L 75x75x5mm	116995	231318	Montante Trecho E
281	96	100	L 75x75x5mm	116995	231318	Montante Trecho E
282	97	101	L 75x75x5mm	116995	231318	Montante Trecho E
283	98	102	L 75x75x5mm	116995	231318	Montante Trecho E
284	99	103	L 75x75x5mm	116995	231318	Montante Trecho E
285	100	104	L 75x75x5mm	116995	231318	Montante Trecho E
286	101	105	L 75x75x5mm	116995	231318	Montante Trecho E
287	74	79	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
288	74	81	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
289	75	78	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
290	75	80	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
291	76	79	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
292	76	81	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
293	77	78	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
294	77	80	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
295	78	83	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
296	78	85	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
297	79	82	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
298	79	84	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
299	80	83	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
300	80	85	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
301	81	82	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
302	81	84	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
303	82	87	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
304	82	89	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
305	83	86	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
306	83	88	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
307	84	87	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
308	84	89	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
309	85	86	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
310	85	88	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
311	86	91	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
312	86	93	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
313	87	90	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
314	87	92	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
315	88	91	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
316	88	93	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
317	89	90	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
318	89	92	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
319	90	95	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
320	90	97	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
321	91	94	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E

322	91	96	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
323	92	95	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
324	92	97	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
325	93	94	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
326	93	96	L 45x45x3mm	36872	83045	Diagonais Trecho E
327	94	99	L 45x45x3mm	35150	83045	Diagonais Trecho E
328	94	101	L 45x45x3mm	35150	83045	Diagonais Trecho E
329	95	98	L 45x45x3mm	35150	83045	Diagonais Trecho E
330	95	100	L 45x45x3mm	35150	83045	Diagonais Trecho E
331	96	99	L 45x45x3mm	35150	83045	Diagonais Trecho E
332	96	101	L 45x45x3mm	35150	83045	Diagonais Trecho E
333	97	98	L 45x45x3mm	35150	83045	Diagonais Trecho E
334	97	100	L 45x45x3mm	35150	83045	Diagonais Trecho E
335	98	103	L 45x45x3mm	35150	83045	Diagonais Trecho E
336	98	105	L 45x45x3mm	35150	83045	Diagonais Trecho E
337	99	102	L 45x45x3mm	35150	83045	Diagonais Trecho E
338	99	104	L 45x45x3mm	35150	83045	Diagonais Trecho E
339	100	103	L 45x45x3mm	35150	83045	Diagonais Trecho E
340	100	105	L 45x45x3mm	35150	83045	Diagonais Trecho E
341	101	102	L 45x45x3mm	35150	83045	Diagonais Trecho E
342	101	104	L 45x45x3mm	35150	83045	Diagonais Trecho E
343	94	95	L 45x45x3mm	19183	83045	Horizontal Trecho E
344	95	96	L 45x45x3mm	19183	83045	Horizontal Trecho E
345	96	97	L 45x45x3mm	19183	83045	Horizontal Trecho E
346	97	94	L 45x45x3mm	19183	83045	Horizontal Trecho E
347	95	97	L 45x45x3mm	36116	83045	Horizontal Trecho E
348	94	96	L 45x45x3mm	36116	83045	Horizontal Trecho E
349	98	99	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho E - Estai
350	98	100	L 45x45x3mm	36116	83045	Horizontal Trecho E
351	98	101	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho E - Estai
352	99	101	L 45x45x3mm	36116	83045	Horizontal Trecho E
353	99	100	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho E - Estai
354	100	101	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Trecho E - Estai
355	102	103	L 45x45x3mm	19183	83045	Horizontal Trecho E - Braço
356	103	104	L 45x45x3mm	19183	83045	Horizontal Trecho E - Braço
357	104	105	L 45x45x3mm	19183	83045	Horizontal Trecho E - Braço
358	105	102	L 45x45x3mm	19183	83045	Horizontal Trecho E - Braço
359	103	105	L 45x45x3mm	36116	83045	Horizontal Trecho E
360	102	104	L 45x45x3mm	36116	83045	Horizontal Trecho E
361	102	106	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo - Região dos Braços
362	103	107	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo - Região dos Braços
363	104	108	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo - Região dos Braços
364	105	109	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo - Região dos Braços
365	106	110	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
366	107	111	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
367	108	112	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo

368	109	113	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
369	110	114	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
370	111	115	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
371	112	116	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
372	113	117	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
373	114	118	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
374	115	119	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
375	116	120	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
376	117	121	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
377	118	122	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
378	119	123	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
379	120	124	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
380	121	125	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
381	122	126	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
382	123	127	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
383	124	128	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
384	125	129	L 60x60x4mm	73277	147636	Montante Topo
385	102	107	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
386	102	109	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
387	103	106	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
388	103	108	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
389	104	107	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
390	104	109	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
391	105	106	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
392	105	108	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
393	106	111	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
394	106	113	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
395	107	110	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
396	107	112	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
397	108	111	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
398	108	113	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
399	109	110	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
400	109	112	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
401	110	115	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
402	110	117	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
403	111	114	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
404	111	116	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
405	112	115	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
406	112	117	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
407	113	114	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
408	113	116	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
409	114	119	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
410	114	121	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
411	115	118	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
412	115	120	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
413	116	119	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo

414	116	121	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
415	117	118	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
416	117	120	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
417	118	123	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
418	118	125	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
419	119	122	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
420	119	124	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
421	120	123	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
422	120	125	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
423	121	122	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
424	121	124	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
425	122	127	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
426	122	129	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
427	123	126	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
428	123	128	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
429	124	127	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
430	124	129	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
431	125	126	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
432	125	128	L 40x40x3mm	30395	73500	Diagonal Topo
433	109	144	L 50x50x3mm	18383	92590	Diagonal Principal Braço Condutor
434	144	140	L 50x50x3mm	18383	92590	Diagonal Principal Braço Condutor
435	106	143	L 50x50x3mm	18383	92590	Diagonal Principal Braço Condutor
436	143	140	L 50x50x3mm	18383	92590	Diagonal Principal Braço Condutor
437	105	146	L 50x50x3mm	41898	92590	Horizontal Principal Braço Condutor
438	146	142	L 50x50x3mm	41898	92590	Horizontal Principal Braço Condutor
439	142	140	L 50x50x3mm	41898	92590	Horizontal Principal Braço Condutor
440	102	145	L 50x50x3mm	41898	92590	Horizontal Principal Braço Condutor
441	145	141	L 50x50x3mm	41898	92590	Horizontal Principal Braço Condutor
442	141	140	L 50x50x3mm	41898	92590	Horizontal Principal Braço Condutor
443	109	143	L 40x40x3mm	6854	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
444	106	144	L 40x40x3mm	6854	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
445	109	146	L 40x40x3mm	10414	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
446	146	144	L 40x40x3mm	37201	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
447	144	142	L 40x40x3mm	37201	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
448	106	145	L 40x40x3mm	10414	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
449	145	143	L 40x40x3mm	37201	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
450	143	141	L 40x40x3mm	37201	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
451	105	145	L 40x40x3mm	10837	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
452	102	146	L 40x40x3mm	10837	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
453	145	142	L 40x40x3mm	16987	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
454	146	141	L 40x40x3mm	16987	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
455	141	142	L 40x40x3mm	47737	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
456	145	146	L 40x40x3mm	29491	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
457	143	144	L 40x40x3mm	42335	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
458	108	151	L 50x50x3mm	18383	92590	Diagonal Principal Braço Condutor
459	107	150	L 50x50x3mm	18383	92590	Diagonal Principal Braço Condutor

460	151	147	L 50x50x3mm	18383	92590	Diagonal Principal Braço Condutor
461	150	147	L 50x50x3mm	18383	92590	Diagonal Principal Braço Condutor
462	104	153	L 50x50x3mm	41898	92590	Horizontal Principal Braço Condutor
463	153	149	L 50x50x3mm	41898	92590	Horizontal Principal Braço Condutor
464	149	147	L 50x50x3mm	41898	92590	Horizontal Principal Braço Condutor
465	103	152	L 50x50x3mm	41898	92590	Horizontal Principal Braço Condutor
466	152	148	L 50x50x3mm	41898	92590	Horizontal Principal Braço Condutor
467	148	147	L 50x50x3mm	41898	92590	Horizontal Principal Braço Condutor
468	108	150	L 40x40x3mm	6854	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
469	107	151	L 40x40x3mm	6854	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
470	108	153	L 40x40x3mm	10414	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
471	153	151	L 40x40x3mm	37201	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
472	151	149	L 40x40x3mm	37201	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
473	107	152	L 40x40x3mm	10414	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
474	152	150	L 40x40x3mm	37201	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
475	150	148	L 40x40x3mm	37201	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
476	104	152	L 40x40x3mm	10837	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
477	103	153	L 40x40x3mm	10837	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
478	152	149	L 40x40x3mm	16987	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
479	153	148	L 40x40x3mm	16987	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
480	148	149	L 40x40x3mm	47737	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
481	152	153	L 40x40x3mm	29491	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
482	150	151	L 40x40x3mm	42335	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
483	129	137	L 50x50x3mm	18383	92590	Diagonal Principal Braço Condutor
484	137	133	L 50x50x3mm	18383	92590	Diagonal Principal Braço Condutor
485	126	136	L 50x50x3mm	18383	92590	Diagonal Principal Braço Condutor
486	136	133	L 50x50x3mm	18383	92590	Diagonal Principal Braço Condutor
487	125	139	L 50x50x3mm	41898	92590	Horizontal Principal Braço Condutor
488	139	135	L 50x50x3mm	41898	92590	Horizontal Principal Braço Condutor
489	135	133	L 50x50x3mm	41898	92590	Horizontal Principal Braço Condutor
490	122	138	L 50x50x3mm	41898	92590	Horizontal Principal Braço Condutor
491	138	134	L 50x50x3mm	41898	92590	Horizontal Principal Braço Condutor
492	134	133	L 50x50x3mm	41898	92590	Horizontal Principal Braço Condutor
493	129	136	L 40x40x3mm	6854	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
494	126	137	L 40x40x3mm	6854	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
495	129	139	L 40x40x3mm	10414	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
496	139	137	L 40x40x3mm	37201	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
497	137	135	L 40x40x3mm	37201	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
498	126	138	L 40x40x3mm	10414	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
499	138	136	L 40x40x3mm	37201	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
500	136	134	L 40x40x3mm	37201	73500	Diagonal Secundária Braço Condutor
501	125	138	L 40x40x3mm	10837	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
502	122	139	L 40x40x3mm	10837	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
503	138	135	L 40x40x3mm	16987	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
504	139	134	L 40x40x3mm	16987	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
505	134	135	L 40x40x3mm	47737	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor

506	136	137	L 40x40x3mm	42335	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
507	138	139	L 40x40x3mm	29491	73500	Horizontal Secundária Braço Condutor
508	129	132	L 65x65x5mm	34368	201727	Diagonal Braço ParaRaio
509	126	132	L 65x65x5mm	34368	201727	Diagonal Braço ParaRaio
510	128	130	L 65x65x5mm	34368	201727	Diagonal Braço ParaRaio
511	127	130	L 65x65x5mm	34368	201727	Diagonal Braço ParaRaio
512	126	131	L 40x40x3mm	13607	73500	Diagonal Braço ParaRaio - Topo
513	127	131	L 40x40x3mm	13607	73500	Diagonal Braço ParaRaio - Topo
514	128	131	L 40x40x3mm	13607	73500	Diagonal Braço ParaRaio - Topo
515	129	131	L 40x40x3mm	13607	73500	Diagonal Braço ParaRaio - Topo
516	131	132	L 45x45x3mm	5187	83045	Horizontal Braço ParaRaio
517	131	130	L 45x45x3mm	5187	83045	Horizontal Braço ParaRaio
518	106	107	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Topo
519	107	108	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Topo
520	108	109	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Topo
521	109	106	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Topo
522	122	123	L 40x40x3mm	13316	73500	Horizontal Topo - Braço
523	123	124	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Topo
524	124	125	L 40x40x3mm	13316	73500	Horizontal Topo - Braço
525	125	122	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Topo
526	126	127	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Topo
527	128	129	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Topo
528	126	128	L 50x50x3mm	13276	92590	Horizontal Topo
529	127	129	L 50x50x3mm	13276	92590	Horizontal Topo
530	126	129	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Topo
531	127	128	L 50x50x3mm	26539	92590	Horizontal Topo
532	98	154	L 60x60x4mm	28667	147636	Diagonal Braço Estai
533	99	154	L 60x60x4mm	28667	147636	Diagonal Braço Estai
534	100	155	L 60x60x4mm	28667	147636	Diagonal Braço Estai
535	101	155	L 60x60x4mm	28667	147636	Diagonal Braço Estai
536	94	154	L 60x60x4mm	57375	147636	Horizontal Braço Estai
537	95	154	L 60x60x4mm	57375	147636	Horizontal Braço Estai
538	96	155	L 60x60x4mm	57375	147636	Horizontal Braço Estai
539	97	155	L 60x60x4mm	57375	147636	Horizontal Braço Estai
540	156	154				Estai
541	157	154				Estai
542	158	155				Estai
543	159	155				Estai